



El ambiente
es de todos

Minambiente

Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021



ISBN: 978-958-5489-24-0

IVÁN DUQUE MÁRQUEZ
Presidente de la República de Colombia

CARLOS EDUARDO CORREA ESCAF
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

FRANCISCO JOSÉ CRUZ PRADA
Viceministro de Políticas y Normalización Ambiental

NICOLÁS GALARZA SÁNCHEZ
Viceministro de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Consejo Directivo

CARLOS EDUARDO CORREA ESCAF
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

ÁNGELA MARÍA OROZCO GÓMEZ
Ministra de Transporte

ALEJANDRA BOTERO BARCO
Directora del Departamento Nacional de Planeación

JUAN DANIEL OVIEDO ARANGO
Director del Departamento Administrativo
Nacional de Estadística

JUAN PABLO RUIZ SOTO
Delegado de Presidencia de la República

RAMÓN LEAL LEAL
Director Ejecutivo de la Asociación de Corporaciones
Autónomas Regionales y de Desarrollo sostenible

GILBERTO GALVIS BAUTISTA
Secretario Técnico del Consejo

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

YOLANDA GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
Directora General

GILBERTO GALVIS BAUTISTA
Secretario General

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

CONSTANTINO HERNÁNDEZ GARAY
Subdirector (E) de Estudios Ambientales

ANA CELIA SALINAS MARTÍN
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

HUGO ARMANDO SAAVEDRA UMBA
Subdirector de Meteorología

DANIEL USECHE SAMUDIO
Jefe Oficina del Servicio de Pronósticos y Alertas

TELLY DE JESÚS MONTH PARRA
Jefe Oficina Asesora de Planeación

ALICIA BARÓN LEGUIZAMÓN
Jefe Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ
Jefe Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

ANDRÉS FELIPE MARMOLEJO EGRED
Asesor de Cooperación y Asuntos Internacionales

JUAN PABLO MACHADO JIMÉNEZ
Coordinador Grupo de Comunicaciones y Prensa

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés

FRANCISCO ARMANDO ARIAS ISAZA
Director General

JESÚS ANTONIO GARAY TINOCO
Subdirector de Coordinación Científica

SANDRA RINCÓN CABAL
Subdirectora Administrativa

DAVID ALEJANDRO ALONSO CARVAJAL
Coordinador Programa Biodiversidad y Ecosistemas Marinos

MARIO ENRIQUE RUEDA HERNÁNDEZ
Coordinador Programa Valoración y Aprovechamiento
de Recursos Marinos y Costeros

LUISA FERNANDA ESPINOSA DÍAZ
Coordinadora Programa Calidad Ambiental Marina

PAULA CRISTINA SIERRA CORREA
Coordinadora de Investigación e Información
para Gestión Marina y Costera

CONSTANZA RICAURTE VILLOTA
Coordinadora Programa de Geociencias Marinas y Costeras

JULIÁN MAURICIO BETANCOURT PORTELA
Coordinador de Servicios Científicos

ISBN: 978-958-5489-24-0

Edición cartográfica

- Grupo de Redes (Ideam)
- Claudia Nicol Tetay Botía
- Ana María Vesga Güiza
- Jenny Paola Marín Salazar

Producción editorial

- Nelson Omar Vargas Martínez
- María Costanza Rosero Mesa
- Claudia Nicol Tetay Botía
- Ana María Vesga Güiza
- Jenny Paola Marín Salazar

Diseño de la carátula

- Ángela Acosta Barajas

Foto de portada

- Edgar Fernando Garzón Arias

Diseño y diagramación

- Unión Gráfica

Cítese como:

Ideam, Invemar (2021). Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.
Bogotá, D. C., 2021. 631 páginas.

**Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Diciembre de 2021, Bogotá, D. C., Colombia.**

Distribución gratuita.

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Autores

Instituto de Hidrología Meteorología y
Estudios Ambientales (Ideam).

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
José Benito Vives de Andrés (Invemar).

Pontificia Universidad Javeriana.

Universidad Industrial de Santander.

- Nelson Omar Vargas Martínez
 - Ana María Vesga Güiza
 - Claudia Nicol Tetay Botía
 - Jenny Paola Marín Salazar
 - María Costanza Rosero Mesa
 - Fabio Andrés Torres Cabrera
 - Doris Yolanda Sanabria Suárez
 - María Juliana Salcedo Hernández
 - Claudia Patricia Andramunio Acero
 - Jorge Luis Ceballos Liévano
 - Francisco Rojas Heredia
 - Vivian Farley Garzón Vargas
 - Alfonso Ladino Rincón
 - José Hernando Wilches Suárez
-
- César Augusto Bernal
 - Ostin Garcés Ordóñez
 - Diana Isabel Gómez López
 - Paola Sofía Obando Madera
 - Luisa Fernanda Espinosa Díaz
-
- Ángela María Zapata Anzola
 - Carlos Alberto Rivera Rondón
 - Mario Fernando Mora Goyes
-
- Yasmín Plata Díaz

Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.

- Jorge Alberto Díaz Martínez
- Liliana Salazar López

Consultora Secretaria Distrital de Ambiente.

- Luisa Fernanda Lagos Martínez

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

- Hernando Ovalle Serrano

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

- Myriam Liliana Martínez Peña
- Carolina Sarmiento Espitia

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

- Jorge Julián Vélez Upegui
- Adela Londoño Carvajal
- Fernando Mejía Fernández
- Juan David Cañas Duque
- Freddy Leonardo Franco Idárraga
- Jeannette del Carmen Zambrano Nájera
- Luisa Fernanda Calderón Castaño
- David Felipe Rincón Castañeda
- Mayra Andrea Castro Huertas
- Marinela del Carmen Valencia Giraldo
- Patricia Esther Jiménez Pérez
- Yesid Camilo Cabezas Suárez

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Laboratorio de Limnología

Consultores independientes

- Ana Karina Campillo Pérez
- Luisa del Pilar Galindo Garzón
- Mónica Rocío Bayona Arenas
- Jorge Augusto Acosta Rivera
- Laura García Rivas

Colaboradores

Academia Colombiana de Ciencias.

- Gabriel Roldán

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

- Camilo Bernal

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA).

- Juan Camilo Múnera

Consultores independientes.

- César Jiménez
- Claudia Garzón
- Diego Chalarca
- Iraidys Sierra
- Luz Consuelo Orjuela
- Martha García
- Nathalie Monsalve

Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas).

- Paola Vásquez

Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar).

- Jorge Armenta

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

- Aura Suárez

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare).

- John Fredy Quintero

Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño).

- María Fernanda Folleco

Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ).

- Patricia Rojas

Corporación Autónoma Regional del río Grande de la Magdalena (Cormagdalena).

- Diana Vargas

Corporación Autónoma Regional de Risaralda (Carder).

- Abelino Arias
- Jhony Galvis

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

- Andrés Rojas
- Sandra Escobar

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)
Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos.

- Ana Arriaga
- Martha Arteaga

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)
Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.

- Adriana Jiménez
- Claudia Buitrago
- David Román
- Diana Moreno
- Juan Diego González
- Liliana Otálvaro
- María Consuelo Vargas (Q.E.P.D.)
- Nelson Anillo
- Óscar Tosse

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina).

- Olga Queeman
- Tomás Guerrero

Empresa de Acueducto de Bogotá.

- Diana Carrillo
- Gerardo Arenas

Estudiante de Doctorado de la Universidad de MAINE, Estados Unidos.

- Edna Pedraza

Fundación Natura Colombia.
Proyecto GEF Magdalena Cauca Vive.

- Ana Cevelyn León
- Carlos Porto
- Carolina Reyes
- Javier Poloche
- María del Ángel Martínez
- Yesid Rendón

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Grupo de Acreditación de Laboratorios.

- Diana Cuarán
- Héctor Cárdenas
- Jeison Peñaloza
- John Cardeñosa
- Juan Zambrano
- Julián Guerrero
- Lady Fuertes
- Leonardo Pineda
- Tania Carpio
- Viviana Granados

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Laboratorio de Calidad Ambiental.

- Alexander Afanador
- Carlos Velásquez
- Darío González
- Jhonatan Uasapud
- Nury Mesa

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental
– Grupo de Suelos y Tierras.

- Alejandro Ospina
- Iván Cuéllar
- Liz Díaz

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Subdirección de Hidrología.

- Carolina Vega
- Claudia Contreras
- Diana Bohórquez
- Fabio Bernal
- Frambey Cuello
- Germán Sopó
- Henry Romero
- Jaime Villareal
- Jair Martínez
- Jairo Garzón
- Jorge González
- José Hernández
- José Pardo
- Luis Vanegas
- Manuel Rodríguez
- Maribel Durán
- Raúl Niño

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) Subdirección de Meteorología.	<ul style="list-style-type: none">• Juan Antonio Gómez• Martha Cadena
Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi).	<ul style="list-style-type: none">• Marcela Núñez
Universidad Católica de Oriente.	<ul style="list-style-type: none">• Silvia Villabona
Universidad de Antioquia (U de A).	<ul style="list-style-type: none">• Yimmy Montoya
Universidad del Cauca.	<ul style="list-style-type: none">• Osvar Cupitra
Universidad del Magdalena.	<ul style="list-style-type: none">• César Tamariz
Universidad del Tolima.	<ul style="list-style-type: none">• Gladys Reinoso
Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.	<ul style="list-style-type: none">• Jorge Díaz
Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.	<ul style="list-style-type: none">• Gabriel Pinilla• Marco Layton• Patricia Jaime
Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.	<ul style="list-style-type: none">• Ángela Jaramillo• Duván Mesa
Universidad Santo Tomás, sede Tunja.	<ul style="list-style-type: none">• Luz Ángela Cuéllar
Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).	<ul style="list-style-type: none">• Jeymmy Walteros

Agradecimientos

- Áreas Operativas, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA).
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM).
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas).
- Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar).
- Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira).
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño).
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda (Carder).
- Corporación Autónoma Regional de Sucre (Carsucre).
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina).
- Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos (Damcra).
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar).
- Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
- Laboratorio de Limnología, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).
- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- De manera especial el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales agradece al proyecto GEF Magdalena Cauca Vive, ejecutado por la Fundación Natura, por su financiación y acompañamiento al proceso de publicación digital.

Siglas

ACWI	<i>Advisory Committee on Water Information</i>
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AELS	Aula de Estudio Lago Sanabria
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
AMS	Espectrometría de Masa del Acelerador
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BM	Base de Medición
BTMA	Transportímetro de carga de fondo
CAM	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
Carder	Corporación Autónoma Regional de Risaralda
Cardique	Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique
Carsucre	Corporación Autónoma Regional de Sucre
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CEN	Comité Europeo de Normalización
CFC	Clorofluorocarbonados
CID	Carbono Inorgánico Disuelto
CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
Clivar	Variabilidad y Predictibilidad Climática
CNE	Catálogo Nacional de Estaciones
COAH	Herbario Amazónico Colombiano
Codechocó	Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó
Conpes	Consejo Nacional de Política Económica y Social
Corantioquia	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
Coralina	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina
Cormacarena	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena
Cormagdalena	Corporación Autónoma Regional del río Grande de la Magdalena
Cornare	Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare

Corpamag	Corporación Autónoma Regional del Magdalena
Corpocaldas	Corporación Autónoma Regional de Caldas
Corpocesar	Corporación Autónoma Regional del Cesar
Corpochivor	Corporación Autónoma Regional de Chivor
Corponariño	Corporación Autónoma Regional de Nariño
Corpourabá	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá
CRA	Corporación Autónoma Regional del Atlántico
CRC	Corporación Autónoma Regional del Cauca
CRQ	Corporación Autónoma Regional del Quindío
CTA	Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
CVS	Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge
Dadma	Departamento Administrativo Distrital del Medio Ambiente de Santa Marta
Dagma	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (Cali)
DAMA	Departamentos Administrativos del Medio Ambiente
Damab	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla
Damcra	Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DCP	Plataforma Colectora de Datos
DDS	Departamento de Desarrollo Sostenible de la OEA
DGPS	GPS diferencial
Dhime	Plataforma de Datos Hidrológicos y Meteorológicos
Dimar	Dirección General Marítima
Dinama	Dirección Nacional de Medio Ambiente
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DVDF	Difluoruro de Polivinilideno
Ecopetrol S. A.	Empresa Colombiana de Petróleos S. A.
EDI	<i>Equal Discharge Increment Method</i>
EMMA	Estaciones Meteorológicas Móviles de Altitud
ENA	Estudio Nacional del Agua
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPA	Establecimiento Público Ambiental
Erfen	Estudio Regional del Fenómeno de El Niño

ESA	<i>European Space Agency</i>
ETo	Evapotranspiración de referencia
ETP	Evapotranspiración Potencial
ETR	Evapotranspiración Real
EWI	<i>Equal Width Increment Method</i>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FEWS	<i>Flood Early Warning System</i>
FISP	<i>Federal Interagency Sedimentation Project</i>
Funias	Formulario Único Nacional de Inventarios de Aguas Subterráneas
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPR	Radares de Penetración del Suelo
GTS	Sensor Transporte de Gravas
Himat	Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras
HLC	Hora Legal de Colombia
HPC	<i>High Performance Computer</i>
HPDD	Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann”
IAvH	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Idiger	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Igrac	<i>International Groundwater Resources Assessment Centre</i>
Ingeominas	Instituto Colombiano de Geología y Minería
Invemar	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés
IRA	Índice de irregularidad interanual
IRD	<i>Institut de Recherche Pour le Développement</i>
Isarm	Gestión de los Recursos Acuíferos Transfronterizos
ISO	Organización Internacional de Normalización
GIRH	Gestión Integral del Recurso Hídrico
Gloss	Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar
GMS	<i>Geostationary Meteorological Satellite</i>
GNIP	Red Global de Isótopos en la Precipitación

GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRDC	<i>Global Runnoff Data Centre</i>
GTNH	Grupo de Trabajo de Niveles y Hielos
Labcam	Unidad de Laboratorios Ambientales de Calidad Ambiental Marina
LCD	<i>Liquid Crystal Display/Visualizador Digital de Datos</i>
LSC	Conteo de Centelleo de Líquidos
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Mavdt	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MHC	Modelo Hidrogeológico Conceptual
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NTC	Norma Técnica Colombiana
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OEA	Organización de Estados Americanos
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
Phi-Lac	Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe
Pirma	Programas Institucionales Regionales de Monitoreo del Agua
Pnaoci	Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia
Pnsub	Programa Nacional de Aguas Subterráneas
Pngirh	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico
Pnicm	Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y marinas de Contaminación del Mar
Pnmrh	Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico
Pnuma	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Pomca	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
PTFE	Politetrafluoroetileno
RAN	Registradores Automáticos de Niveles

Rbnasub	Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas
Redcam	Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia
RFID	Identificación por Radiofrecuencia
RIRH	Red Interamericana de Recursos Hídricos
SAT	Sistema de Alertas Tempranas
SCHM	Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología
SFRC	<i>School of Forest Resources & Conservation</i>
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIAC	Sistema de Información Ambiental de Colombia
Siata	Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
SIB	Sistema de Información Biológica
SINA	Sistema Nacional Ambiental
Sinchi	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
SMOC	Sistema Mundial de Observación del Clima
SOMV	Sistema de Observación, Medición y Vigilancia
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
Unesco	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VMM	Vigilancia Meteorológica Mundial
WGMS	<i>World Glacier Monitoring Service</i>
Zci-Zcit	Zona de Confluencia Intertropical

Tabla de contenido

- Introducción 37
- 1. Objetivos 44
- 2. Alcance 46
 - 2.1 Alcance temático..... 46
 - 2.2 Alcance institucional 47
 - 2.3 Alcance geográfico 47
 - 3.1 Marco normativo..... 49
- 3. Marco de referencia..... 49
 - 3.2 Marco institucional..... 56
- 4. Marco conceptual 58
 - 4.1 Ciclo del agua..... 58
 - 4.2 Monitoreo del agua 60
- 5. Antecedentes 63
 - 5.1 Redes de monitoreo 63
 - 5.1.1 Red Nacional de Monitoreo Hidrometeorológico..... 64
 - 5.1.2 Sistema Red Nacional de Radares Meteorológicos 67
 - 5.1.3 Red Nacional de Sedimentos 70
 - 5.1.4 Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua 72
 - 5.1.5 Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas 74
 - 5.1.6 Red Nacional de Isotopía 76
 - 5.1.7 Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras 78
 - 5.1.8 Redes regionales de monitoreo..... 79
 - 5.2 Protocolos y guías de monitoreo..... 80

6. Procedimiento general para el monitoreo del agua	83
6.1 Sistema de monitoreo	85
6.2 Recolección de datos	86
6.3 Transmisión de datos	87
6.4 Administración de los datos	89
6.5 Uso de la información	89
7. Monitoreo de agua meteórica	94
7.1 Precipitación.....	95
7.1.1 Selección de puntos.....	95
7.1.2 Frecuencia.....	97
7.1.3 Tipos de medición y/o métodos de recolección.....	97
7.1.4 Equipos	98
7.1.4.1 Pluviómetro.....	98
7.1.4.2 Pluviógrafo	106
7.1.5 Procedimientos para la toma de datos-Análisis de datos	108
7.1.5.1 Probeta.....	108
7.1.5.2 Reglilla	109
7.2 Evaporación, transpiración y evapotranspiración.....	112
7.2.1 Evaporación	112
7.2.2 Transpiración	112
7.2.3 Evapotranspiración	112
7.2.4 Selección de puntos.....	113
7.2.4.1 Evaporación.....	113
7.2.4.2 Evapotranspiración.....	114
7.2.5 Frecuencia.....	114
7.2.6 Equipos y métodos de medida-Métodos de estimación	114
7.2.6.1 Tanque de evaporación.....	115
7.2.6.2 Evaporímetro	118
7.2.6.3 Lisímetro	120
7.2.7 Procedimientos para medición-Estimación de variables.....	122
7.2.7.1 Tanque de evaporación.....	122
7.2.7.2 Evaporímetro de balanza.....	123
7.2.7.3 Lisímetro	123
7.2.7.4 Métodos indirectos.....	124
8. Monitoreo de agua superficial	126
8.1 Monitoreo de cantidad	127
8.1.1 Niveles	128
8.1.1.1 Selección de puntos	128
8.1.1.2 Frecuencia	130
8.1.1.3 Tipos de medición.....	131

8.1.1.4 Equipos	131
8.1.1.5 Procedimientos para la toma de niveles	145
8.1.2 Caudales	147
8.1.2.1 Selección de puntos	147
8.1.2.2 Frecuencia	148
8.1.2.3 Tipos de medición y procedimiento de aforo	148
8.1.2.4 Materiales y equipos	195
8.1.3 Observaciones en cuerpos de hielo y nieve	200
8.1.3.1 Selección de puntos	200
8.1.3.2 Frecuencia	201
8.1.3.3 Tipos de medición.....	201
8.1.3.4 Equipos-instrumentación.....	204
8.1.3.5 Procedimientos para las mediciones	210
8.1.4 Sedimentos	215
8.1.4.1 Medición de sedimentos y caudales sólidos.....	219
8.1.4.2 Frecuencia de monitoreo de sedimentos	221
8.1.4.3 Parámetros por medir y unidades de medida	221
8.1.4.4 Instrumentos de medida	222
8.1.4.5 Procedimientos de medición de sedimentos.....	260
8.1.4.6 Muestreo diario de sedimentos en suspensión	262
8.1.4.7 Aforos sólidos	267
8.1.4.8 Procedimiento para medir arrastre de fondo	283
8.1.4.9 Procedimientos de laboratorio	284
8.1.4.10 Registro y procesamiento de datos	290
8.1.4.11 Cálculos del aforo sólido.....	291
8.1.4.12 Caudales sólidos	295
8.1.4.13 Transporte de fondo y transporte total	297
8.1.4.14 Validación de datos: control de calidad	299
8.2 Monitoreo de calidad.....	310
8.2.1 Muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos.....	310
8.2.1.1 Selección de puntos	310
8.2.1.2 Frecuencia de monitoreo	313
8.2.1.3 Tipo de muestra.....	313
8.2.1.4 Parámetros de calidad del agua	314
8.2.1.5 Equipos	320
8.2.1.6 Procedimiento para la toma de muestras.....	322
8.2.1.7 Control de calidad en campo.....	328
8.2.1.8 Cantidad de muestra.....	331
8.2.1.9 Preservación de las muestras.....	332
8.2.1.10 Precauciones para evitar contaminación de muestras.....	340

8.2.1.11 Cadena de custodia.....	342
8.2.1.12 Almacenamiento y transporte de muestras.....	342
8.2.2 Monitoreo de comunidades hidrobiológicas.....	344
8.2.2.1 Recomendaciones generales para el monitoreo de las comunidades hidrobiológicas	345
8.2.2.2 Organismos planctónicos.....	349
8.2.2.3 Organismos bentónicos y asociados	379
8.2.2.4 Macroinvertebrados acuáticos.....	401
8.2.2.5 Macrófitas.....	423
8.2.2.6 Recomendaciones generales para el monitoreo de las comunidades hidrobiológicas	432
9. Monitoreo de aguas subterráneas	436
9.1 Monitoreo de cantidad	442
9.1.1 Selección de puntos de monitoreo.....	442
9.1.2 Frecuencia de monitoreo.....	444
9.1.3 Tipo de mediciones	447
9.1.3.1 Medición de niveles.....	447
9.1.3.2 Medición de parámetros hidráulicos	447
9.1.3.3 Medición de caudal y flujos de corriente subterránea	450
9.1.4 Materiales y equipos.....	450
9.1.4.1 Equipos para medición de niveles.....	450
9.1.4.2 Equipos para medición de parámetros hidráulicos.....	454
9.1.5 Procedimiento para la toma de datos	457
9.1.5.1 Toma de niveles	457
9.1.5.2 Toma de parámetros hidráulicos.....	462
9.2 Monitoreo de calidad	466
9.2.1 Selección de puntos de monitoreo.....	466
9.2.1.1 Monitoreo de puntos para abastecimiento.....	467
9.2.1.2 Monitoreo de puntos de contaminación difusa de aguas subterráneas	468
9.2.1.3 Monitoreo de fuentes puntuales.....	468
9.2.2 Frecuencia de monitoreo.....	470
9.2.3 Tipo de muestreo	472
9.2.3.1 Muestreo por bombeo.....	472
9.2.3.2 Muestreo a profundidad.....	472
9.2.3.3 Otros métodos de muestreo	473
9.2.3.4 Mediciones in situ.....	473
9.2.3.5 Parámetros físico-químicos y bacteriológicos	474
9.2.4 Materiales y equipos.....	475
9.2.4.1 Equipos para mediciones in situ	475
9.2.4.2 Equipos para medición de parámetros físico-químicos y bacteriológicos	476
9.2.5 Procedimiento para la toma de datos	485
9.2.5.1 Alistamiento	485

9.2.5.2 Recipientes	487
9.2.5.3 Toma de muestras	487
10. Monitoreo isotópico	500
10.1 En aguas meteóricas	501
10.1.1 Selección de los puntos de monitoreo	502
10.1.2 Frecuencia de monitoreo	503
10.1.3 Tipo de mediciones.....	503
10.1.4 Materiales y equipos	503
10.1.4.1 Diseño 1 - pluviómetro convencional.....	504
10.1.4.2 Diseño 2 - totalizador simple con embudo conectado al tanque de almacenamiento...	505
10.1.4.3 Diseño 3 - totalizador a base de parafina	506
10.1.4.4 Diseño 4 - totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión.....	506
10.1.4.5 Diseño 5 - totalizador enterrado.....	510
10.1.5 Procedimiento para toma de datos.....	515
10.1.5.1 Toma de muestras	515
10.1.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras	519
10.2 En aguas superficiales.....	520
10.2.1 Selección de puntos de monitoreo	521
10.2.2 Frecuencia de monitoreo	521
10.2.3 Tipos de medición.....	521
10.2.4 Materiales y equipos	522
10.2.5 Procedimiento para toma de datos.....	523
10.2.5.1 Toma de muestras.....	523
10.2.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras.....	527
10.3 En aguas subterráneas.....	527
10.3.1 Selección de los puntos de monitoreo.....	528
10.3.2 Frecuencia de monitoreo	528
10.3.3 Tipo de mediciones.....	528
10.3.4 Materiales y equipos	529
10.3.5 Procedimiento para toma de datos.....	530
10.3.5.1 Toma de muestras.....	531
10.3.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras.....	537
11. Monitoreo marino-costero	539
11.1 Calidad de aguas	539
11.1.1 Selección de los puntos	539
11.1.2 Frecuencia	540
11.1.3 Tipo de mediciones.....	540
11.1.4 Equipos.....	540
11.1.5 Procedimientos para la toma de muestras.....	542
11.1.5.1 Preparación del material y equipos de campo	542

11.1.5.2 Medición de parámetros in situ.....	542
11.1.5.3 Toma de muestras.....	543
11.1.5.4 Consideraciones para tener en cuenta antes y durante el muestreo	546
11.2 Calidad de sedimentos	547
11.2.1 Selección de puntos	547
11.2.2 Frecuencia	547
11.2.3 Tipo de mediciones.....	547
11.2.4 Equipos.....	547
11.2.4.1 Palas.....	547
11.2.4.2 Muestreador de plataforma	548
11.2.4.3 Muestreador de gravedad	549
11.2.5 Procedimientos para la toma de muestras.....	549
11.2.5.1 Análisis de contaminantes orgánicos (hidrocarburos, plaguicidas organoclorados y organofosforados, grasas y aceites, entre otros)	549
11.2.5.2 Granulometría	550
11.2.5.3 Análisis de metales.....	550
11.2.5.4 Análisis microbiológico.....	550
11.3 Monitoreo hidrobiológico marino (corales, pastos marinos, mangle, fitoplancton, zooplancton e ictioplancton).....	550
12. Flujo de información.....	555
13. Validación de información e incertidumbre	559
14. Plataformas de gestión de datos e información	562
15. Transparencia y acceso a la información	566
16. Bibliografía.....	569
Glosario.....	581
Anexos.....	582

Lista de figuras

Figura 3-1.	Principales instrumentos normativos que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico del país.....	55
Figura 3-2.	Esquema de institucionalidad que por norma tiene directa relación con el monitoreo del agua continental y marino costera, en el ámbito nacional y regional.....	57
Figura 4-1.	El ciclo hidrológico.....	59
Figura 4-2.	Tipos de redes de monitoreo según la cobertura y competencia institucional.....	60
Figura 5-1.	Distribución de estaciones de la Red Hidrometeorológica Nacional-IDEAM.....	65
Figura 5-2.	Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia.....	67
Figura 5-3.	Red de radares meteorológicos de IDEAM.....	69
Figura 5-4.	Localización de los puntos que integran la Red Nacional de Sedimentos del IDEAM.....	71
Figura 5-5.	Localización de las estaciones que integran la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua.....	73
Figura 5-6.	Localización de los puntos que integran la Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas.....	75
Figura 5-7.	Localización de las treinta y dos (32) estaciones de isotopía definidas en la fase de diseño de la Red Nacional de Isotopía.....	77
Figura 5-8.	Entidades que participan en la REDCAM.....	78

Figura 5-9.	Ubicación de las estaciones de muestreo de la REDCAM en las zonas costeras del Caribe y Pacífico colombianos.....	79
Figura 5-10.	Línea de tiempo de los protocolos o guías de monitoreo elaborados por el IDEAM.....	81
Figura 6-1.	Flujograma del procedimiento para el monitoreo del recurso hídrico.....	84
Figura 6-2.	Aspectos para tener en cuenta en la planificación de una adecuada recolección de datos en la etapa de campo.....	86
Figura 7-1.	Ubicación de un pluviómetro.....	96
Figura 7-2.	Pluviómetro de plástico.....	99
Figura 7-3.	Elementos de un pluviómetro: A, B: Embudo colector. C: Cilindro interior o depósito. D: Cilindro exterior.....	99
Figura 7-4.	Pluviómetro estación sede IDEAM–Bogotá.....	100
Figura 7-5.	Pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy-Ritacuba Blanco.....	101
Figura 7-6.	Vertimiento de la solución anticongelante dentro del pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy.....	101
Figura 7-7.	Pluviómetro de balancín.....	102
Figura 7-8.	Pluviómetro de balancín utilizado en algunas estaciones del IDEAM.....	103
Figura 7-9.	Pluviómetro de peso marca MPS Systems.....	103
Figura 7-10.	Pluviómetro de peso ubicado en la Sierra Nevada El Cocuy.....	104
Figura 7-11.	Datalogger en estación automática del IDEAM.....	104
Figura 7-12.	Pluviómetro EMMA (Estación Meteorológica Móvil de Altitud). Izquierda: Parque Nacional Natural Los Nevados, Derecha: Sierra Nevada El Cocuy-Ritacuba Blanco.....	105
Figura 7-13.	Pluviómetro convencional y pluviómetro automático ubicados en la estación meteorológica Las Cintas.....	106
Figura 7-14.	Pluviógrafo estación climatológica ordinaria Granja San Jorge.....	107
Figura 7-15.	Izquierda: Tambor donde se inscribe la altura de la lámina de agua. Derecha: Gráfico de registro continuo de las precipitaciones.....	108
Figura 7-16.	Lectura del pluviómetro con la probeta.....	109
Figura 7-17.	Lectura del pluviómetro con reglilla.....	110
Figura 7-18.	Medición de precipitación con flexómetro en un pluviómetro totalizador ubicado en El Cocuy.....	111
Figura 7-19.	Tanque evaporímetro clase “A” con gancho graduado y tanque tranquilizador.....	115
Figura 7-20.	Detalle de un tanque de evaporación.....	116
Figura 7-21.	Izquierda: Tanque de evaporación automático. Derecha: Gabinete donde se ubica el Datalogger utilizado por el IDEAM en sus estaciones meteorológicas.....	117
Figura 7-22.	Tanque de evaporación automático.....	118
Figura 7-23.	Detalle del evaporímetro Piché.....	119
Figura 7-24.	Izquierda: esquema de evaporímetro tipo Wild. Derecha: Evaporímetro tipo Wild.....	120
Figura 7-25.	Evaporímetro de esfera porosa tipo Livingstone.....	120
Figura 7-26.	Esquema de un lisímetro.....	121
Figura 7-27.	Tanque de evaporación utilizado en las estaciones meteorológicas del IDEAM.....	123
Figura 8-1.	Escala limnimétrica.....	132
Figura 8-2.	Tipos de miras hidrométricas.....	132
Figura 8-3.	Mira limnímetro Estación La Laja.....	133

Figura 8-4.	Diferentes tipos de instalaciones limnimétricas de acuerdo con el tipo de suelo.	134
Figura 8-5.	Maxímetro. Estación Puente Venado, río Venado.	134
Figura 8-6.	Diferentes tipos de máxímetro.	135
Figura 8-7.	Esquema de un limnicontacto.	136
Figura 8-8.	Izquierda: Sonda luminosa cuya operación es de manivela. Derecha: Sonda con sensor de presión.....	137
Figura 8-9.	Montaje de un punto de medición de nivel de agua provista de una sonda manométrica.....	138
Figura 8-10.	Limnígrafo.	139
Figura 8-11.	Estación limnigráfica. Izquierda: Esquema de una estación limnigráfica, Derecha: Estación las ánimas, río Chochal.....	139
Figura 8-12.	Estación limnigráfica. Arriba: Instalación de limnígrafo de pozo e instalación de limnígrafo de tubo con aleta de protección. Abajo: Instalación de limnígrafo neumático.....	141
Figura 8-13.	Esquema limnígrafo digital.	142
Figura 8-14.	Estación limnigráfica digital. Izquierda: Estación satelital Pilispi. Derecha: Estación automática El Banco Magdalena.	143
Figura 8-15.	Posición de puntos de observación en la sección trasnversal de una corriente.....	150
Figura 8-16.	Molinete hidrométrico.	151
Figura 8-17.	Distribuciones normales de velocidades de flujo en la vertical.	153
Figura 8-18.	Método de dos puntos (0.2–0.8) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical.	154
Figura 8-19.	Método de un punto (0.6) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical.	155
Figura 8-20.	Método de tres puntos (20%-60%-80 %) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical.	156
Figura 8-21.	Aforo por vadeo.....	158
Figura 8-22.	Aforo por suspensión.	159
Figura 8-23.	Relación entre la profundidad correcta (d) y la profundidad observada (dob).....	160
Figura 8-24.	Esquema de un tipo de aforo angular teodolito. Base 90° con sección de aforos.	162
Figura 8-25.	Esquema de un aforo con bote cautivo.....	163
Figura 8-26.	Aforo con lancha en movimiento.....	164
Figura 8-27.	Sumatoria de vectores de velocidad.	165
Figura 8-28.	Medición de la velocidad superficial del agua con un flotador.	167
Figura 8-29.	Medición de caudal con ADCP. A: Río Amazonas. B: Río San Juan. C: Transmisión del ADCP al computador. Estación Rumichaca, río Guáitara.	169
Figura 8-30.	Configuración típica de una medición con un instrumento de efecto Doppler.....	170
Figura 8-31.	Salida de un ADCP.	170
Figura 8-32.	Sondas de medición bidimensional y tridimensional.	171
Figura 8-33.	Medición en campo con equipo caudalímetro FlowTracker2.....	172
Figura 8-34.	Ubicación de la sonda dentro del agua, transversal al flujo del agua.....	173
Figura 8-35.	Interfaz de visualización de parámetros durante medición.....	174
Figura 8-36.	Aforo volumétrico.	175
Figura 8-37.	Ensayo con trazadores en el río Cravo Sur en el sector de La Cabaña, Yopal, Casanare.	176
Figura 8-38.	Conductividad según inyección constante.....	179
Figura 8-39.	Conductividad según inyección instantánea.	179

Figura 8-40.	Variación de la curva de respuesta de la concentración a lo largo del canal.....	180
Figura 8-41.	Trazadores automáticos.....	183
Figura 8-42.	Esquema de un vertedero rectangular: Izquierda: Con contracciones laterales. Derecha: Sin contracciones.....	184
Figura 8-43.	Esquema de un vertedero trapezoidal.....	185
Figura 8-44.	Esquema de un vertedero triangular de escotadura con ángulo de 90°.....	185
Figura 8-45.	Canaleta tipo Balloffet.....	187
Figura 8-46.	Medidor sin cuello (cutthroat).....	189
Figura 8-47.	Canaleta Parshall Parque Nacional Natural Los Nevados.....	192
Figura 8-48.	Esquema de un aforador Parshall.....	192
Figura 8-49.	Tarabita, Estación Carlosama. Río Blanco.....	199
Figura 8-50.	Esquema de medición de retroceso.....	202
Figura 8-51.	Ubicación de un punto fijo utilizando un talud de roca para mediciones de retroceso.....	202
Figura 8-52.	Evolución glaciar de la Sierra Nevada de El Cocuy o Güicán 1994 - 2015. Sector "Laguna la isla". Izquierda: aerofotografía (IGAC, 1994). Derecha: Imagen satelital SPOT 2015.....	203
Figura 8-53.	Izquierda: Baliza dispuesta sobre la superficie del glaciar y su medida entre dos periodos de tiempo. Derecha: Baliza Ritacuba Blanco 3, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán.....	205
Figura 8-54.	Distribución de la red de balizas.....	205
Figura 8-55.	Captura de valores de espesor de nieve con el uso de una sonda para nieve.....	206
Figura 8-56.	Esquema ilustrativo de radar de impulso para determinar espesores de hielo.....	207
Figura 8-57.	Transmisor utilizado para determinar el espesor del hielo, este envía una señal la cual es recibida por un receptor.....	207
Figura 8-58.	Izquierda: Detalle de perforadora Heucke. Derecha: Perforación de hielo empleando la perforadora Heucke.....	208
Figura 8-59.	Levantamiento topográfico utilizando un equipo GNSS diferencial.....	209
Figura 8-60.	Puntos de retroceso longitudinal monitoreados a 2015 en el volcán nevado Santa Isabel por el IDEAM.....	210
Figura 8-61.	Medición de balizas en monitoreo de glaciares colombianos.....	211
Figura 8-62.	Captura de medición del espesor de la capa de nieve con el uso de una sonda. Sierra Nevada El Cocuy.....	212
Figura 8-63.	Consideraciones generales para las mediciones en pozos de acumulación. Sierra Nevada de El Cocuy.....	213
Figura 8-64.	Tipos de sedimentos y procesos de medición.....	216
Figura 8-65.	Componentes del monitoreo de sedimentos.....	219
Figura 8-66.	Integradores puntuales y de profundidad para medición de sedimentos.....	225
Figura 8-67.	Zona muestreada y no muestreada en el perfil de una corriente, con respecto a los perfiles.....	226
Figura 8-68.	Río Fonce. Izquierda: Corriente profunda y aforada desde Tarabita. Derecha: Taquiza, corriente de aguas someras y vadeable.....	227
Figura 8-69.	Relación entre tiempo de llenado y velocidad en la boquilla de toma muestras del tipo USP en función del tamaño de la boquilla.....	230
Figura 8-70.	Muestreador tipo USP-61.....	231
Figura 8-71.	Muestreador para sedimentos en suspensión tipo USDH-48.....	233
Figura 8-72.	Muestreador para sedimento en suspensión tipo USDH-59.....	234

Figura 8-73.	Muestreador integrado de profundidad tipo U.S.D.-49.	235
Figura 8-74.	Uso del muestreador en aforo de bolsa plegable.....	236
Figura 8-75.	Canastilla de hierro soldado para botellas ½ l.	238
Figura 8-76.	Muestreador puntual de sedimento para conformar un Maxímetro de sedimentos.....	242
Figura 8-77.	Muestreador del Delta del Nilo para material de fondo.	243
Figura 8-78.	Muestreador de material de fondo usado en IDEAM.....	243
Figura 8-79.	Muestreadores usados para la medición de carga de sedimentos de fondo.....	244
Figura 8-80.	Muestreadores de sedimentos de fondo.....	247
Figura 8-81.	ADCP.....	251
Figura 8-82.	Representación esquemática de aforo, a) método tradicional, y b) con ADCP.	253
Figura 8-83.	Geófono de tubería ubicado en una superficie estable del lecho de una presa en el río Joganzi, Japón. El flujo es de derecha a izquierda.	257
Figura 8-84.	Placa de Impacto para medir el transporte de carga sólida en la corriente Erlenbach, Suiza (vista aguas abajo, con placas visibles en primer plano).....	257
Figura 8-85.	Placa de impacto para medir el transporte de carga sólida en la corriente Erlenbach, Suiza (vista lateral de la sección de aguas abajo, con placas visibles en la parte superior derecha y el agua que cae en un tipo de tina).....	258
Figura 8-86.	Sensor de transporte de gravas (SMT) experimental.....	258
Figura 8-87.	Diagramas del sistema detector de movimiento magnético de carga de fondo.....	259
Figura 8-88.	Un hidrófono (A) en poder de un marco fijo en el Torrent de Saint-Pierre, Francia, y (B) en el marco antes de la inmersión.....	260
Figura 8-89.	Procesos en el monitoreo de sedimentos.....	261
Figura 8-90.	Procedimiento de muestra de sedimentos en el laboratorio.	262
Figura 8-91.	Tamaño óptimo de la muestra diaria.....	263
Figura 8-92.	Botellas plásticas de 500 cm ³ y proceso de toma de muestras.....	263
Figura 8-93.	Medición del volumen muestreado con pipeta.	264
Figura 8-94.	Marcado y empaque de los filtros en una bolsa plástica para su envío o entrega.	267
Figura 8-95.	Procedimiento para realizar el aforo sólido puntual.....	268
Figura 8-96.	Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado.....	271
Figura 8-97.	Aforo sólido con muestreador de sedimentos en suspensión USDH-49.....	272
Figura 8-98.	Relación entre la velocidad de ingreso y la concentración de la muestra para muestreo isocinético y no isocinético de partículas mayores de 0.062 mm. Con V = velocidad media de la corriente, V _n =velocidad en la boquilla del muestreador, C=concentración media de sedimentos en la corriente, y C _s = concentración de sedimentos en la muestra.	273
Figura 8-99.	Método de muestreo de iguales incrementos de caudal (EDI): las muestras son tomadas en los centroides del flujo de cada incremento.....	275
Figura 8-100.	Velocidad de tránsito vertical en relación con el volumen muestreado en cada centroide de igual incremento de caudal.	276
Figura 8-101.	Método de igual incremento de anchura (EWI).	277
Figura 8-102.	Velocidad vertical de tránsito para el método de igual incremento de anchura (EWI), en relación con el volumen de la muestra, que es proporcional al caudal de agua en cada vertical.....	278

Figura 8-103. Nomograma para determinar el número de verticales de muestreo requeridas para obtener resultados dentro de un error relativo estándar aceptable.	280
Figura 8-104. Disposición del muestreador.	281
Figura 8-105. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado con bolsa plegable.....	282
Figura 8-106. Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio.	283
Figura 8-107. Proceso general de laboratorio de sedimentos.	286
Figura 8-108. Detalles de los procesos de medida de volumen y tarado de crisoles, filtración, evaporación, calcinación y pesado de la muestra y granulometría.....	287
Figura 8-109. Aspectos del procedimiento de filtración. A: Vertido del contenido de las probetas en los embudos con bomba de vacío prendida. B, C: Revisión de que no haya quedado sedimento en embudo, botella y probeta. D, E: Retiro, doblado y almacenamiento de filtros en horno de madera.....	288
Figura 8-110. Aspectos del procedimiento de calcinación. A: Numeración de los crisoles en base y al lado con cloruro férrico. B: Orden de filtros y crisoles C: Cargue de filtros en crisoles y bandejas. D: Cargue de crisoles en mufla por 30 min. E: Enfriamiento a 200 °C y retiro de crisoles. F: Enfriamiento a temperatura ambiente en desecador, antes del pesaje.	289
Figura 8-111. Aspectos del procedimiento para la granulometría del material de fondo. A: Pesaje de las muestras del aforo. B: Sí el pesaje es >0.5 g se pasan al análisis granulométrico. C: Colocación de la muestra en el primer tamiz y agitación de 15 min.	289
Figura 8-112. Aspectos del procedimiento para la granulometría del material en suspensión. A: Cuarteo de la muestra seca y toma de dos diagonales para la determinación. B: Paso de la muestra por los tamices 6.350 y 4.760 micras. C: Paso a microtamices y a la tamizadora por 15 min.....	290
Figura 8-113. Ejemplo de la curva que relaciona el caudal sólido con el caudal líquido.	293
Figura 8-114. Ejemplo de relación entre concentración media y concentración superficial.	294
Figura 8-115. Flujograma para el cálculo del transporte total diario de sedimentos en suspensión.....	295
Figura 8-116. Flujograma general de captura y procesamiento básico de la información.	299
Figura 8-117. Distribución homogénea de concentración de sedimentos.	305
Figura 8-118. Distribución heterogénea de concentración de sedimentos.	305
Figura 8-119. Proceso general de verificación de concentraciones.	306
Figura 8-120. Flujograma general de la validación de la información.....	307
Figura 8-121. Tipos y propósitos de las redes de monitoreo.....	311
Figura 8-122. Posibles sitios de monitoreo.....	312
Figura 8-123. Equipo multiparámetro, utilizado en campaña binacional 2017, Estación Carlosama.....	321
Figura 8-124. Equipos de monitoreo calidad de agua.	322
Figura 8-125. Verificación de equipos, toma de muestra y registro del parámetro in situ, estación hidrológica San Juan.	325
Figura 8-126. Preservación de muestras con ácido en Estación Pipiguay.	332
Figura 8-127. Recomendaciones para el filtrado y conservación de las muestras.	332
Figura 8-128. Mantenimiento de la refrigeración de las muestras con hielo en estación hidrológica San Juan.....	342
Figura 8-129. Algunas especies de Fitoplancton A: Phacus sp. B: Micrasterias sp. C: Pediastrum sp. D: Staurastrum sp...350	350
Figura 8-130. Zonas de interés para el estudio del fitoplancton. En el eje vertical: Zona fótica, epilimnio, transición epilimnio-metalimnio, máximo metalimnético de oxígeno, transición metalimnio-hipolimnio, hipolimnio profundo. En el eje horizontal la zona limnética y la zona litoral.	352

Figura 8-131.	Toma de muestras cualitativas tipo Van Dorn.	354
Figura 8-132.	Observación de parámetros multiparamétricos y transparencia con el disco Secchi.....	358
Figura 8-133.	Ejemplos de lanzamiento de red y uso de pértiga telescópica.	359
Figura 8-134.	Muestreo con red de fitoplancton, proceso de filtrado.	359
Figura 8-135.	Cámaras de sedimentación Utermöhl.	361
Figura 8-136.	Proceso de sedimentación de una muestra de fitoplancton.....	363
Figura 8-137.	Esquema del fondo de la cámara de sedimentación y las posibilidades de conteo de células. A. Campos al azar, cada punto representa un campo óptico. B. Transectos, también pueden ser horizontales. C. Dirección del conteo de todo el fondo de la cámara.	364
Figura 8-138.	Algunas especies de zooplancton. A: Plationus patulus.B: Platyias quadricornis. C: Testudinella mucronata.D: Cyclopodia Mf. E: Arcella discoideas. F: Keratella cochlearis.....	368
Figura 8-139.	Concentración de muestra con botella Van Dorn y red de plancton.....	369
Figura 8-140.	Estaciones de muestreo sugeridas para el muestreo de plancton en sistemas lénticos.....	372
Figura 8-141.	Toma de muestras cuantitativas de zooplancton con trampa Schindlers-Patalas.	373
Figura 8-142.	Proceso de sedimentación de la muestra de zooplancton en las cámaras Sedgwick-Rafter.	375
Figura 8-143.	Cámara Borogov para conteo de zooplancton.	376
Figura 8-144.	Algunas especies de algas perifíticas. A: Anabaena sp. B: Gomphonema sp. C: Trachelomonas sp. D: Eunotia sp.	379
Figura 8-145.	Elementos para la construcción de un perifitómetro.	382
Figura 8-146.	Área del cuadrante.....	383
Figura 8-147.	Elementos utilizados para el muestreo de algas perifíticas sobre sustratos duros.....	383
Figura 8-148.	Elemento para muestrear las algas perifíticas de sustratos blandos.....	384
Figura 8-149.	Muestreo de algas perifíticas.	385
Figura 8-150.	Estrujamiento o squeezing de plantas acuáticas para el muestreo de algas perifíticas.....	386
Figura 8-151.	Proceso de instalación y recolección de sustratos artificiales para la obtención de las muestras de la comunidad perifítica.	387
Figura 8-152.	Celda de conteo Palmer Maloney.....	391
Figura 8-153.	Descripción del proceso para el conteo de la muestra de perifiton en las cámaras Sedgwick-Rafter. ..	392
Figura 8-154.	Algunas especies de Diatomeas. Arriba: a) Tabellaria ffenestra, b) Pinnularia microstaurum, c) Gomphonema coronatum, abajo: d) Frustulia saxonica, e) Encyonema sp, f) Navicula sp.....	395
Figura 8-155.	Características para el monitoreo de diatomeas: corriente vadeable, buena iluminación, sustratos abundantes.	396
Figura 8-156.	Cepillado de la superficie superior del sustrato. El volumen resultante es de color pardo, se recoge en una vasija y se le adiciona la solución fijadora.	397
Figura 8-157.	Sustratos muestreados y estimación del área total muestreada.	397
Figura 8-158.	Muestra antes de la digestión (izquierda: Suriella sp) y después de digestión de materia orgánica (derecha: Suriella angusta).	399
Figura 8-159.	Sobre una lámina cubreobjetos se dispensa una gota de muestra A. Sobre una placa de calefacción se coloca la lámina portaobjetos con una gota del medio de montaje. Cuando se observa la formación de burbujas en el medio de montaje B, se coloca la A.	400

Figura 8-160.	Algunas especies de macroinvertebrados bénticos, A: Ithytrichiasp. B: Hidroptitasp. C: Psephenossp. D: Anacroneuriasp. E: Microcilloepus. F: Anacroneuriasp.....	402
Figura 8-161.	Red tipo Surber.	407
Figura 8-162.	Draga Peterson.	407
Figura 8-163.	Acorazonador.	407
Figura 8-164.	Red rectangular.	407
Figura 8-165.	Hábitats típicos en un tramo de río de bajo orden. C=Centro, RD=Ribera derecha, RI=Ribera izquierda. ...	412
Figura 8-166.	Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Surber-río Bogotá, antes de Villapinzón.	413
Figura 8-167.	Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con red rectangular.....	414
Figura 8-168.	Draga tipo Petersen utilizada para la toma de muestras de bentos.....	415
Figura 8-169.	Muestreo de macrófitas con la red D.	416
Figura 8-170.	Toma de muestras de bentos con corazonador.	417
Figura 8-171.	Representación gráfica de la toma de muestras de macroinvertebrados asociados a macrófitas.	419
Figura 8-172.	Muestreo de macroinvertebrados bentónicos en sedimentos con la draga Ekman.....	420
Figura 8-173.	Algunas macrófitas acuáticas.	424
Figura 8-174.	Cuadrante para cobertura de macrófitas.	426
Figura 8-175.	Uso de cuadrante para la evaluación de cobertura de macrófitas.	429
Figura 8-175.	Uso de cuadrante para la evaluación de cobertura de macrófitas.	429
Figura 9-1.	Componentes de un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC).....	438
Figura 9-2.	Izquierda: Toma de niveles en pozo profundo-CARSUCRE. Derecha: Toma de niveles de piezómetro-Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)	439
Figura 9-3.	Izquierda: Determinaciones de parámetros in situ para un manantial-CORPOCESAR. Derecha: Medición de niveles de aljibes-CORPOGUAJIRA.....	440
Figura 9-4.	Muestreo en la zona no saturada, con el uso de tensiómetros y de lisímetros-CVC.....	440
Figura 9-5.	Factores para determinar la frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea.	444
Figura 9-6.	Tipos de pruebas de bombeo.....	448
Figura 9-7.	Diagrama esquemático de un ensayo de bombeo típico en el que aparecen indicadas las diversas mediciones.	449
Figura 9-8.	Sonda de nivel de agua con señal acústica y luminosa, con marco y carrete.....	451
Figura 9-9.	A.Sonda para medición de niveles con carrete motorizado. B. Sonda compacta, de carrete liviano con cable y punta delgada para usos en pozos de poco diámetro. C. Modelo de sonda que mide temperatura, nivel, conductividad.	451
Figura 9-10.	Tipo de sondas con sensor de fondo.	452
Figura 9-11.	Tipo de registradores automáticos. A. Registrador de nivel de aguas subterráneas autónomo con módem de red móvil utilizado para la medición del nivel y de la temperatura del agua (OTT, 2019). B: Registradores que miden nivel, temperatura y conductividad (Solinst, 2021). C. Registrador de datos nivel de aguas subterráneas de alta precisión utilizado para el monitoreo a largo y corto plazo del nivel y la temperatura del agua (Sandox, 2021).....	453
Figura 9-12.	Registradores compactos tipo Divers, para la medición y el registro automático del nivel del agua subterránea, conductividad y temperatura.	454

Figura 9-13.	Prueba de bombeo a caudal constante Pozo Servicio Geológico Colombiano (SGC) Riohacha 2 (N: 1 765 265, E: 1 132 644).	454
Figura 9-14.	Bomba sumergible para grandes caudales utilizada en pruebas de bombeo.	455
Figura 9-15.	A. Bomba sumergible tipo lapicero de hasta 200 gpm (galones por minuto) (Barnes de Colombia S. A, 2019). B.Bomba sumergible de hasta 60 gpm (Evans, 2021). C.Bomba sumergible de Caudal hasta 90 l/min (5,4 m ³ /h) (Pedrollo S.p.A, 2021)	455
Figura 9-16.	Uso de sonda eléctrica para medición de niveles de agua en el pozo de bombeo.	456
Figura 9-17.	Izquierda: medición de caudales por métodos volumétricos de aforo y medidor de corriente. Derecha: aforo de caudales pequeños.	457
Figura 9-18.	Izquierda: Monitoreo de niveles realizado en el municipio de Puerto Gaitán. Derecha: Esquema que ilustra la medición de niveles con el uso de una sonda manual.	458
Figura 9-19.	Izquierda: Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas en estado estático. Derecha: Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas en estado dinámico. .	458
Figura 9-20.	Medición de la altura de la boca del pozo o del aljibe-CORPOCESAR.....	459
Figura 9-21.	Tubería de 3/4 de pulgada de diámetro opcional para las mediciones de niveles con sonda-CORPOCESAR.	460
Figura 9-22.	Medición de nivel piezométrico. Izquierda: CARSUCRE. Derecha: CORPOGUAJIRA.	461
Figura 9-23.	Medición de los niveles de agua subterránea utilizando un Diver.....	461
Figura 9-24.	Instalación de un Diver en un pozo de monitoreo-CORPOURABÁ.	461
Figura 9-25.	Prueba de bombeo a caudal constante pozo SGC Hospital de Maicao.	463
Figura 9-26.	Arriba: Interpretación método Cooper-Jacob fase de bombeo a caudal constante del pozo, Batallón Cisneros. Abajo: Interpretación método Theis fase de recuperación pozo, La Marina 2011.....	464
Figura 9-27.	Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de abastecimiento de agua subterránea.	468
Figura 9-28.	Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales.	469
Figura 9-29.	Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales.	469
Figura 9-30.	Medición de parámetros in situ y toma de muestras en un manantial-CORPOCESAR.....	473
Figura 9-31.	Izquierda: Medidor multiparámetros de bolsillo.	476
Figura 9-32.	Bomba peristáltica.	477
Figura 9-33.	Ejemplo de uso de una bomba peristáltica.....	477
Figura 9-34.	Izquierda. Bomba de muestreo de acero inoxidable de bajo caudal de 10 ml/min y Bomba de purga para pozos poco profundos y con caudales de hasta 2.5 gpm (galones por minuto (Geotech Environmental Equipment, 2021). Derecha: Bomba Grundfos diseñada para tomar muestras en pozos de monitoreo con un diámetro a partir de 50 mm y una profundidad de entre 90 metros, de cauda de 2 m ³ /hora. (Maser, 2021).....	478
Figura 9-35.	Bomba eléctrica sumergible de plástico.	478
Figura 9-36.	Izquierda. Bomba de muestreo de vejiga-bladder. Derecha: Bomba de vejiga de acero inoxidable para monitoreo de calidad y contaminación en aguas subterráneas.....	479
Figura 9-37.	Funcionamiento de la bomba vejiga.	479
Figura 9-38.	Izquierda: Bomba inercial. Derecha: Mecanismo de operación de la bomba inercial.	480
Figura 9-39.	Tipos de bailers para muestreo de agua subterránea. Izquierda: Bailers en acero inoxidable. Derecha: Bailers en plástico.....	480

Figura 9-40.	Muestreo en pozo profundo Internado Aremasain–Riohacha utilizando un bailer-CORPOGUAJIRA. .	481
Figura 9-41.	Muestreador de intervalo discretos.	482
Figura 9-42.	Copas de succión para muestreo de agua del suelo-lisímetros. Izquierda: Copas de succión (lisímetros) para el muestreo de agua del suelo para análisis químicos. Derecha: Muestreador de agua del suelo con almacenamiento en el vástago.	482
Figura 9-43.	Sistemas de vacío para muestreo de agua del suelo–lisímetros.	483
Figura 9-44.	Muestreadores multinivel que permiten el monitoreo de varias zonas en un sistema.	484
Figura 9-45.	Tipos de piezómetros para hincar. Procedimiento de hincado de los piezómetros y toma de muestras.....	485
Figura 9-46.	Medición in situ con un medidor multiparámetro en un pozo profundo de extracción.	489
Figura 9-47.	Ejemplo de un muestreo portable.	489
Figura 9-48.	Medición de parámetros in situ con medidores multiparamétricos-CORPOCALDAS.....	490
Figura 9-49.	Muestreo en pozos profundos utilizando un bailer-CORALINA.	490
Figura 9-50.	Muestreo de calidad para control de acuífero, proyecto CVC en áreas de aplicación de vinazas-Valle del Cauca.....	496
Figura 10-1.	Ubicación del colector minimizando la influencia de estructuras cercanas.....	502
Figura 10-2.	Pluviómetro convencional utilizado para muestreo con base de eventos o con transferencia diaria. Izquierda: Esquema del pluviómetro. Derecha: Ejemplo de un pluviómetro utilizado en la Estación Isotópica de Ibagué–Tolima. Red Nacional de Isotopía–IDEAM.	504
Figura 10-3.	Muestreo isotópico de un pluviómetro colocado en el Parque Nacional Natural Los Nevados–IDEAM. ...	505
Figura 10-4.	Totalizador simple. Izquierda: Pelota de tenis de mesa dentro del embudo. Derecha: Malla de acero inoxidable dentro del embudo.	505
Figura 10-5.	Totalizador con tubo sumergido con uso de una capa delgada de aceite de parafina.	506
Figura 10-6.	Totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión.	507
Figura 10-7.	Totalizador simple con tubo sumergido.	508
Figura 10-8.	Totalizador comercial con tubo sumergido. Izquierda: Rain Sampler RS1. Derecha: Rain Sampler RS1. ..	509
Figura 10-9.	Izquierda. Totalizador Rain Sampler RS1. ubicado en las instalaciones del Área Operativa 07- Pasto- IDEAM. Derecha: Totalizador Rain Sampler RS2, instalado en la estación climatológica del IDEAM, del Aeropuerto El Caraño, en Quibdó. Red Nacional de Isotopía–IDEAM.	510
Figura 10-10.	Totalizador enterrado.	511
Figura 10-11.	Totalizador enterrado ubicado en la estación climatológica del IDEAM, de Carmen de Tonchalá- Norte de Santander-Red Nacional de Isotopía-IDEAM.	511
Figura 10-12.	Totalizador ubicado en el Parque Natural Los Nevados-IDEAM.	512
Figura 10-13.	Totalizador Rain Sampler RS1, ubicado en las Estación climatológica del IDEAM, Duitama- Red Nacional de Isotopía- IDEAM.....	512
Figura 10-14.	A: Jarra. B: Probeta. C: Balanza electrónica. D: Embudo de decantación.	513
Figura 10-15.	Recipiente de PEAD de color blanco para la acumulación de agua.	514
Figura 10-16.	Frascos para la recolección de muestras.....	514
Figura 10-17.	Frascos de muestreo isotópico de ^2H , ^{18}O y ^3H 50 y 500 ml de PEAD.	515
Figura 10-18.	Totalizador Rain Sampler RS1 (Palmex) que hace parte de la estación isotópica de la Red Global de Isótopos en la Precipitación de la OIEA.	516
Figura 10-19.	Muestreo de un totalizador Palmex, referencia Rain Sampler, ubicado en la Estación Bremen–CRQ...	516

Figura 10-20.	Medición con probeta de la lluvia acumulada en un totalizador enterrado que hace parte de la estación isotópica de la Red Nacional de Isotopía del IDEAM ubicada en San Andrés Islas.....	516
Figura 10-21.	Muestreo de un totalizador Palmex, referencia Rain Sampler, ubicado en la Estación La Montaña-CRQ....	517
Figura 10-22.	Calicata para recolección en la nieve-IDEAM.....	518
Figura 10-23.	Muestreo de agua en drenaje de páramo de la red de muestreo isotópico de aguas superficiales y meteóricas de alta montaña del IDEAM.....	521
Figura 10-24.	Muestreo de agua en drenaje de superpáramo de la red de muestreo isotópico de aguas superficiales y meteóricas de alta montaña del IDEAM.....	521
Figura 10-25.	Izquierda: Botella de Van Dorn. Derecha: Muestreador de Kemmerer.....	522
Figura 10-26.	Medidor multiparámetro portátil de temperatura y pH / EC / TDS.....	523
Figura 10-27.	Medición de parámetros físicos en el río El Roble, previo a muestreo isotópico-CRQ.....	524
Figura 10-28.	Muestreo hidroquímico, complementario a los análisis isotópicos-CRQ.....	526
Figura 10-29.	Toma de muestras de agua subterránea de un piezómetro a través de un bailer.	529
Figura 10-30.	Medición in situ de parámetros físicoquímicos utilizando una sonda multiparamétrica.....	529
Figura 10-31.	Toma de muestras de agua subterránea directa de la boca de pozo-CORPOGUAJIRA.....	532
Figura 10-32.	Colección de agua subterránea para análisis de carbono-14.....	533
Figura 10-33.	Colección de agua subterránea para análisis de carbono-14.....	534
Figura 10-34.	Proceso de filtrado de muestra de agua subterránea utilizando equipo que incluye embudo de filtración, frasco de vacío y una bomba de vacío.	536
Figura 11-1.	Botellas oceanográficas. A: Niskin. B: Nansen. C: Kemmerer. Usadas para la extracción de muestras de agua, operadas desde una embarcación menor.....	540
Figura 11-2.	A: Dispositivo para muestreo de compuestos orgánicos (hidrocarburos y plaguicidas). B: Botella Ruttner.	541
Figura 11-3.	Alistamiento de recipientes para el muestreo.	542
Figura 11-4.	Toma de datos in situ en el departamento de Córdoba.	543
Figura 11-5.	Verificación de equipos en campo.	543
Figura 11-6.	Toma de muestra superficial en el departamento de Nariño.....	544
Figura 11-7.	Preservación de muestras de agua en campo.	545
Figura 11-8.	Tipo de palas para muestreo. A: Pala manual. B: Pala tipo draga Ekman. C: Dragas Van Veen.....	548
Figura 11-9.	Box Corer.	548
Figura 11-10.	Multimuestreador de gravedad (Multicore).	549
Figura 12-1.	Flujo de información para la gestión integral del agua y el recurso hídrico.	556
Figura 14-1.	Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).	563

Lista de tablas

Tabla 5-1.	Localización de radares meteorológicos de Colombia instalados por el IDEAM.....	68
Tabla 6-1.	Medios de transmisión de datos.....	88
Tabla 8-1.	Características de los sensores de nivel.....	144
Tabla 8-2.	Recomendaciones de uso de los métodos de aforo.....	149
Tabla 8-3.	Factor de corrección K para valores dados de φ	160
Tabla 8-4.	Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua.	168
Tabla 8-5.	Ventajas y desventajas del equipo FlowTracker2.....	174
Tabla 8-6.	Dimensiones a partir de la relación con el ancho de la sección de acceso (B).....	188
Tabla 8-7.	Valores de Ks y Ns.....	191
Tabla 8-8.	Valores para diferentes tamaños del aforador.....	193
Tabla 8-9.	Valores de M y N en unidades métricas, para el cálculo de la descarga en un aforador Parshall.....	194
Tabla 8-10.	Equipos en general para medición de caudal a partir de aforos.....	195

Tabla 8-11.	Lista de chequeo para aforo líquido. Equipos y personal requerido.....	196
Tabla 8-12.	Muestreadores y métodos de muestreo de carga de sedimentos en suspensión en ríos.	222
Tabla 8-13.	Características y parámetros de operación de muestreadores de sedimento suspendido.	228
Tabla 8-14.	Características de instrumentos para medición de concentración y transporte de sedimentos.	232
Tabla 8-15.	Características tecnológicas seleccionadas para el monitoreo de la carga de fondo.	248
Tabla 8-16.	Tabla de conversión, medición del volumen.	264
Tabla 8-17.	Errores en la operación de instrumentos de muestreo de sedimentos.	301
Tabla 8-18.	Ejemplo de aplicación del método de verificación de las concentraciones.	304
Tabla 8-19.	Descripción de los sitios de monitoreo.	313
Tabla 8-20.	Parámetros básicos recomendados para el monitoreo de calidad del agua.	315
Tabla 8-21.	Parámetros para exigir por autoridades ambientales según uso del recurso (listado no exhaustivo). ...	316
Tabla 8-22.	Materiales y equipos para el monitoreo de calidad del agua.	320
Tabla 8-23.	Recomendaciones para el almacenamiento y preservación en el manejo de muestras.	336
Tabla 8-24.	Listado de formatos para el muestreo y procesamiento de las comunidades hidrobiológicas.	346
Tabla 8-25.	Sustratos típicos que deberían ser muestreados en los ecosistemas acuáticos para obtener una muestra representativa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos.	411
Tabla 8-26.	Evaluación visual y por medio de una escala de cinco niveles.	429
Tabla 9-1.	Ejemplo de frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea teniendo en cuenta factores ambientales.	445
Tabla 9-2.	Longitud típica de recolección de datos de nivel de agua en función del uso previsto.	446
Tabla 9-3.	Frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia.	471
Tabla 9-4.	Lista de parámetros sugeridos para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea.	474
Tabla 9-5.	Condiciones de calibración y uso de equipos portátiles.	486
Tabla 9-6.	Criterios usuales para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros.	488
Tabla 9-7.	Procedimientos para muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea.	492
Tabla 9-8.	Volumen requerido, recipientes, técnicas de conservación recomendadas y tiempo máximo hasta el análisis para muestras de agua subterránea colectada.	494
Tabla 10-1.	Volúmenes de agua recogidas (ml) en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación (ejemplos de pluviómetros bien establecidos. A: Pluviómetros de 5", por ejemplo, UK Mk2/Mk3 o Nipher. B: Diseño estandarizado OMM, por ejemplo, Hellmann o Tretyakov. C: NOAA 8". D: NOAA 12").	512
Tabla 10-2.	Actividades específicas típicas de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.	520
Tabla 11-1.	Equipos utilizados para el muestreo de aguas.	541



Río Magdalena
📷 Oscar Martínez

Introducción

Este documento técnico actualiza anteriores protocolos que se han producido para suplir necesidades de orientación en la realización de prácticas hidrológicas de monitoreo, los cuales se mencionarán en el numeral 5.2 *Protocolos y guías de monitoreo*. En esta oportunidad se presentan nuevos procedimientos, conservando una visión integral del ciclo hidrológico en el ámbito continental y marino-costero.

La aplicación de prácticas estandarizadas y soportadas en preceptos científicos para realizar el monito-

reo del agua, permite fortalecer el conocimiento de los sistemas hídricos y mejorar la comprensión de las funcionalidades, presiones y afectaciones, con fines de gestión y planificación desde campos de actuación nacionales, regionales y locales. Es importante resaltar que, más allá de las tecnologías y prácticas de campo es pertinente, además, garantizar el fortalecimiento del talento humano de las instituciones encargadas del monitoreo, la base de laboratorios acreditados, la asequibilidad de las acciones y estrategias de monitoreo y la gestión de la información. Este último

componente facilita la disposición de información de alta calidad, oportuna, precisa, completa, relevante, accesible y, ante todo, útil a los diferentes usuarios.

Desde el punto de vista institucional, el protocolo se alinea con los principios, objetivos y componentes, tanto operativos como estratégicos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), promulgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en 2010 e implementada desde su Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico (DGIRH). A su vez, contribuye con la garantía de información confiable como insumo para programas formulados de esta política pública del agua (de manera particular, el Programa Nacional de Aguas Subterráneas y Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico), más los instrumentos de planificación para la ordenación ambiental del territorio y del recurso hídrico.

El protocolo está dirigido a las entidades que tienen responsabilidades directas de monitoreo para la evaluación y seguimiento del recurso hídrico, sus presiones, afectaciones y singularidades, tanto a nivel nacional (IDEAM e INVEMAR) como regional (autoridades ambientales). Sin embargo, dada la universalidad de las prácticas hidrológicas, su uso se hace extensivo a otras instituciones, que por sus intereses, funciones o competencias requieran realizar monitoreo del agua con diferentes propósitos de planificación, control, seguimiento, evaluación o investigación.

El documento consta de tres partes: **Contexto general** que incluye la definición de objetivos y alcan-

ce del protocolo, seguido por un marco referencial normativo e institucional, un marco conceptual de monitoreo del agua y los recursos hídricos, una cronología comentada de antecedentes y una descripción del procedimiento general para el monitoreo del agua. En la segunda sección, denominada **Técnicas y procedimientos**, se describen las metodologías para el monitoreo de aguas meteóricas, aguas superficiales, subterráneas y marino-costeras, tanto en cantidad como en calidad. Finalmente, el apartado sobre **Gestión de datos e información** consolida las estrategias y recomendaciones para el aprovechamiento y difusión eficiente y oportuna de datos de alta calidad.

El documento se construyó con la participación de expertos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, la Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos (DAMCRA) del MADS y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis (INVEMAR). De igual manera, es oportuno agradecer los aportes de expertos del Ministerio de Ambiente, autoridades ambientales, investigadores de prestigiosas universidades y expertos nacionales independientes.

Se espera de esta manera, dejar en la documentación oficial del país, un producto actualizable, de fácil acceso y consulta para su uso extensivo por parte de técnicos, profesionales, investigadores e innovadores en los temas de monitoreo del agua y los recursos hídricos.



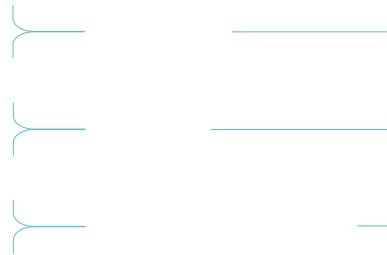
Caño Cristales
📷 Claudia Andramunio



Campaña de monitoreo Cesar-ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM



Contexto general





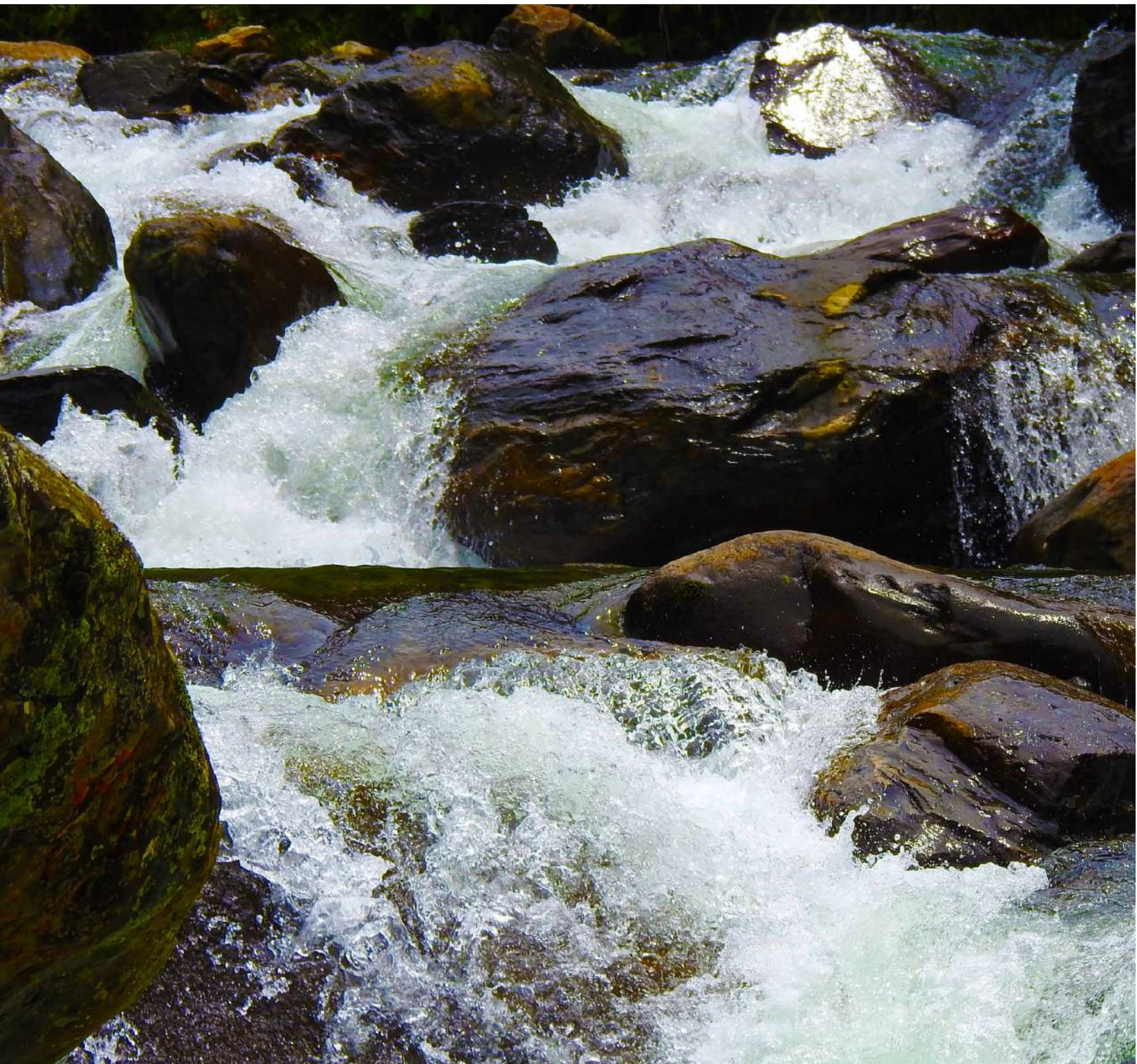
Pensilvania, Caldas
Edgar Garzón

1. Objetivos

El principal objetivo del protocolo es proveer una guía de procedimientos para un monitoreo representativo del recurso hídrico a las instituciones y usuarios, considerando los ciclos y procesos del agua en la naturaleza, sus manifestaciones y relaciones.

Para este fin, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Reconocer las responsabilidades y roles institucionales para el monitoreo del recurso hídrico en Colombia, con base en la normativa vigente.
- Establecer técnicas y procedimientos para el monitoreo del agua y del recurso hídrico, basados en las prácticas hidrológicas estandarizadas a nivel internacional.
- Orientar la gestión de datos e información proveniente del monitoreo del agua para garantizar su calidad, oportunidad, 'replicabilidad', interoperabilidad y disponibilidad para actores sociales, gremiales e instituciones que lo requieran.



Río Pensilvania
■ Edgar Garzón

2. Alcance

El protocolo comprende los componentes estratégicos, programático y metodológico del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico. Además, brinda los lineamientos sobre qué, cómo y dónde monitorear el recurso hídrico en el país, de tal manera que se estandaricen los procedimientos y técnicas en el ámbito nacional, garantizando su ‘replicabilidad’ a nivel regional y local. Se constituye como una herramienta para la generación de conoci-

miento sobre el agua a través de información de alta calidad, para lo cual orienta el paso a paso desde la preparación de la campaña de monitoreo, hasta que el dato esté disponible para su uso.

2.1 Alcance temático

El protocolo abarca el monitoreo del agua en la integralidad del dominio del ciclo hidrológico, proporcionando las herramientas conceptuales y metodoló-

gicas para evaluar el estado y la dinámica del agua en cantidad y calidad. Refiere las variables determinadas por los procesos de este ciclo, como la precipitación, evapotranspiración, escorrentía (niveles y caudales), aguas subterráneas (niveles piezométricos, variables hidráulicas) y sedimentos; así como también variables relacionadas con el estado y la dinámica de la calidad del agua en sus manifestaciones fisicoquímicas e hidrobiológicas. El protocolo considera todas las masas de agua como objeto de monitoreo (cuerpos de agua lénticos y lóticos).

En el ámbito marino costero, se presentan las metodologías implementadas para el monitoreo de calidad, tanto en agua como en sedimentos. Adicionalmente, se incluye un aparte con recomendaciones para el desarrollo e implementación del monitoreo de organismos marinos y estuarinos.

Es importante resaltar que el protocolo no incluye el seguimiento a variables asociadas con agua potable ni saneamiento básico.

2.2 Alcance institucional

El protocolo está dirigido a las instituciones con responsabilidad directa en el monitoreo del agua y del recurso hídrico a nivel nacional, regional y local. De la misma manera, puede ser utilizado por otros actores institucionales, gremiales o sociales que requieran realizar monitoreos para cumplir propósitos de evaluación, seguimiento o investigación. Esto desde luego, incluye a la academia como autor institucional involucrado en temas de investigación.

En este orden de ideas, el protocolo contribuye con la generación de información estandarizada, validada, sistematizada y representativa, útil para la toma de decisiones en los escenarios de planificación y gestión ambiental y territorial.

2.3 Alcance geográfico

El protocolo es aplicable en todo el territorio nacional, tanto en cuerpos lénticos como lóticos, con fines de evaluación local, regional o nacional.



Laguna de La Cocha
📹 Oscar Darío Velásquez

3. Marco de referencia

El protocolo está concebido como una herramienta útil para estandarizar y homologar prácticas de monitoreo hidrológico, a la vez que promueve la validación, sistematización y difusión oportuna de los datos a través de los sistemas interoperables de información. En este sentido, el documento se alinea con los principios, objetivos y líneas estratégicas y operativas de la PNGIRH y sus programas derivados, tales como el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) y el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB).

En términos generales, el protocolo suple los requerimientos y mandatos de la normatividad vigente y fija las reglas técnicas para aquellas instituciones o actores que quieran realizar monitoreo del recurso hídrico con cualquier propósito.

A continuación, se describen los aspectos normativos e institucionales con mayor relevancia para el monitoreo del recurso hídrico en el país.

3.1 Marco normativo

La pertinencia de *disponer de información sobre el recurso hídrico*, la responsabilidad de adquirirla y el

enfoque integral de dicha información, como soporte de decisiones en la gestión ambiental en el país, tiene su fundamento legal con la expedición del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974), el cual estableció en su artículo 20 que:

Se organizará y mantendrá al día un sistema de información ambiental, con los datos físicos, económicos, sociales, legales, y en general, concernientes a los recursos naturales renovables y al medio ambiente (subrayado fuera del texto). Condición que denota la necesidad de disponer de información representativa en la dimensión temporal.

En el marco del mencionado sistema de información, el Código de Recursos Naturales Renovables estableció que, mediante el sistema de información ambiental, se procesarán y analizarán, entre otras especies de información relacionadas con el recurso hídrico, las referidas a: (...); b) *Hidrometeorológica, hidrológica, hidrogeológica y climática; (...)* h) *La información legal a que se refiere el Título VI, Capítulo I, Parte I del Libro II;* i) *Los niveles de contaminación por regiones;* j) *El inventario de fuentes de emisión y de contaminación* (Decreto Ley 2811 de 1974; Artículo 21. Subrayado fuera del texto).

Con la expedición de la *Ley 99 de 1993*, mediante la cual se crea el Ministerio de Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, se establecen lineamientos para fortalecer el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se instauran las principales funciones relacionadas con la información ambiental (que, como se señaló anteriormente, incluye el agua en todas sus formas) de la siguiente manera:

Al Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) le corresponde *Coordinar, promover y orientar las acciones de investigación sobre el medio ambiente y los recursos naturales renovables, establecer el Sistema de Información Ambiental, y organizar el inventario de la biodiversidad y de los recursos genéticos nacionales; promover la investigación de modelos alternativos de desarrollo sostenible; ejercer la Secretaría Técnica y Administrativa del Consejo del Programa Nacional de Ciencias y del Medio Ambiente y el Hábitat.* (Ley 99 de 1993, Artículo 5, numeral 20; subrayado fuera del texto).

El IDEAM deberá obtener, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la nación y tendrá a su cargo el establecimiento y funcionamiento de infraestructuras meteorológicas e hidrológicas nacionales para proveer informaciones, predicciones, avisos y servicios de asesoramiento a la comunidad (...). (Ley 99 de 1993, Artículo 17, inciso 2; subrayado fuera del texto).

Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" se refiere el Artículo 18 de la Ley 99 de 1993 que le atribuye (...) *como encargo principal la investigación ambiental básica y aplicada de los recursos naturales renovables, el medio ambiente y los ecosistemas costeros y oceánicos de los mares adyacentes al territorio nacional. El INVEMAR emitirá conceptos técnicos sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos marinos, y prestará asesoría y apoyo científico y técnico al Ministerio, a las entidades territoriales y a las Corporaciones Autónomas Regionales (...),* (subrayado fuera del texto).

A las Corporaciones Autónomas Regionales les ordena Implantar y operar el Sistema de Información Ambiental en el área de su jurisdicción, de acuerdo con las 57 directrices trazadas por el Ministerio del Medio Ambiente; (...). (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 22; subrayado fuera del texto).

En este marco, es oportuno mencionar que el monitoreo del agua soporta varias funciones de administración, control y seguimiento de las autoridades ambientales, entre las que se destacan:

Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de las actividades de exploración, explotación, beneficio, transporte, uso y depósito de los recursos naturales no renovables, incluida la actividad portuaria con exclusión de las competencias atribuidas al Ministerio del Medio Ambiente, así como de otras actividades, proyectos o factores que generen o puedan generar deterioro ambiental. Esta función comprende la expedición de la respectiva licencia ambiental (...). (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 11; subrayado fuera del texto).

Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos, a las aguas en cualquiera de sus formas, al aire o a los suelos, así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos, estas funciones comprenden expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos. (Ley 99 de 1993, Artículo 31, numeral 12; subrayado fuera del texto).

En relación con las disposiciones de la Ley 99 de 1993, el Decreto 1277 de 1994, organiza y establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), refiriendo en el Artículo 2, Capítulo 1, su objeto de: suministrar los conocimientos, los datos y la información ambiental que requieren el Ministerio del Medio Ambiente y demás entidades del SINA y establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de la planificación y el ordenamiento ambiental del territorio. Con respecto al apoyo que tiene que brindar el Instituto a las corporaciones para el *desarrollo de sus funciones relativas al ordenamiento, manejo y uso de los recursos naturales renovables en la respectiva región*, el IDEAM deberá:

Asesorar a las corporaciones en la implementación y operación del Sistema de Información Ambiental, de acuerdo con las directrices trazadas por el Ministerio del Medio Ambiente. (Decreto 1277 de 1994, Artículo 7, literal a, Capítulo 1).

Suministrar a las Corporaciones información para el establecimiento de estándares y normas de calidad ambiental. (Decreto 1277 de 1994, Artículo 7, literal f, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

Como integrante del Sistema Nacional Ambiental, al IDEAM también le corresponde prestar su asesoría, junto con las corporaciones, a las entidades territoriales y a los centros poblados en materia de investigación, toma de datos y manejo de información (Artículo 8, literal b, Capítulo 1).

Además de las funciones previstas en este Decreto en desarrollo de su objeto, el IDEAM deberá (...) ser la fuente oficial de información científica en las áreas de su competencia y autoridad máxima en las áreas de hidrología y meteorología. (Artículo 15, numeral 1).

Así mismo, en el numeral 13, del Artículo 15 del Decreto 0291 de 2004, se establece que dentro de las funciones de la Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM, se encuentra *acreditar a los laboratorios ambientales del sector público y privado que produzcan información física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales, relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables*. En este sentido, el IDEAM como organismo encargado de otorgar esta acreditación, asegura que los monitoreos efectuados sean válidos y aceptados por las diferentes autoridades ambientales.

Por otro lado, el Decreto 1276 de 1994 que organiza y reestructura el INVEMAR, define su objeto como el encargado de emitir conceptos técnicos sobre la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos marinos (Artículo 2, literal c, Capítulo 1; subrayado fuera del texto) y el de cumplir con los objetivos que se establezcan para el Sistema de Investigación Ambiental en el área de su competencia (Artículo 2, literal e, Capítulo 1). Entre sus funciones, se consideran:

Desarrollar actividades de coordinación con los demás institutos científicos vinculados al Ministerio del Medio Ambiente y apoyar al IDEAM en el manejo de la información necesaria para el establecimiento de políticas, planes, programas y proyectos, así como de indicadores y modelos predictivos sobre el comportamiento de la naturaleza y sus procesos. (Decreto 1276 de 1994, Artículo 3, literal 5, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

Colaborar con el Ministerio del Medio Ambiente, las Corporaciones y los grandes centros urbanos, en la definición de las variables que deban ser contempladas en los estudios de impacto ambiental de los proyectos, obras o actividades que afecten el mar, las costas y sus

recursos. (Decreto 1276 de 1994, Artículo 3, literal 11, Capítulo 1; subrayado fuera del texto).

Con respecto a la articulación con el Sistema de Información Ambiental, según el Artículo 11, Capítulo 2, el INVEMAR deberá colaborar con el IDEAM en la proposición de variables que deben contemplar los estudios de impacto ambiental, de tal forma que se normalice la colecta de información, cuando esta se requiera y se facilite el análisis, evaluación y procesamiento de la misma.

En relación con el control y seguimiento del recurso hídrico, la Ley 1450 de 2011 precisó las competencias de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, de los grandes centros urbanos y de los establecimientos públicos, en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico:

La Gestión Integral del Recurso Hídrico-GIRH en relación con las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, los grandes centros urbanos y los Establecimientos Públicos Ambientales implica en su área de jurisdicción:

(...)

d) La evaluación, control y seguimiento ambiental de la calidad del recurso hídrico, de los usos del agua y de los vertimientos; (...). (Ley 1450 de 2011, Artículo 215, numeral d).

Particularmente, en el ámbito marino costero, la Ley 1450 de 2011 establece la autoridad marina de las Corporaciones: *Las Corporaciones Autónomas Regionales y las de Desarrollo Sostenible de los departamentos costeros, ejercerán sus funciones de autoridad ambiental en las zonas marinas hasta el límite de las líneas de base rectas establecidas en el Decreto 1436 de 1984, salvo las competencias que de manera privativa corresponden al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*

(MAVDT) y a la *Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA)* (...). (Ley 1450 de 2011, Artículo 208; subrayado fuera del texto).

Con la publicación de *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico* en el año 2010 (MAVDT, 2010), se busca garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente. En este sentido, su planteamiento y desarrollo considera el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) y las normas, guías técnicas e instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas y acuíferos, los cuales son abordados de la siguiente manera:

Según el Artículo 8 del Decreto 1323 de 2007 *las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones para el Desarrollo Sostenible, las Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos, las creadas por el Artículo 13 de la Ley 768 del 2002 y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, deberán realizar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción, para lo cual deberán aplicar los protocolos y estándares establecidos en el SIRH.*

De acuerdo con el Artículo 2 de este decreto, el SIRH se define como (...) *el conjunto que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico.*

En el mismo sentido, el Artículo 9 del Decreto 1323 de 2007 (Comp. en el Decreto 1076 de 2015) establece que *en los términos del artículo 23 del Decreto-ley 2811 de 1974, los titulares de licencias, permisos o concesiones que autorizan el uso del recurso hídrico, están obligados a recopilar y a suministrar sin costo alguno la información sobre la utilización del mismo a las Autoridades Ambientales competentes.*

El Artículo 16 del Decreto 1640 de 2012 (Comp. en el Decreto 1076 de 2015) establece que *El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico se adelantará a nivel de las Zonas Hidrográficas definidas en el mapa de zonificación ambiental del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, las cuales serán el espacio para monitorear el estado del recurso hídrico y el impacto que sobre este tienen las acciones desarrolladas en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* También que *El programa será implementado por el IDEAM y el INVEMAR en coordinación con las autoridades ambientales competentes, de conformidad con las funciones establecidas en el Capítulo 5 del Título 3, Parte 2, libro 2 (...).*

La implementación del Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, de conformidad con el Artículo 2.2.3.4.1.8 del Decreto 1076 de 2015.

Adicionalmente, en el ámbito marino-costero, se contempla la *Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos de las Zonas Costeras e Insulares de Colombia–PNAOCI* (Ministerio de Medio Ambiente, 2000), que busca entre otros objetivos, proporcionar un ambiente marino y costero sano para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población costera.

También se establece el *Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Con-*

Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar (PNICM) 2004 (Garay et al., 2004), el cual busca promover y fortalecer acciones tendientes a prevenir, evaluar, conservar, rehabilitar, restaurar y manejar el deterioro de los ambientes, ecosistemas y recursos marinos y costeros causados por la contaminación. Dentro de las estrategias de este programa se encuentra la caracterización de la contaminación y el

monitoreo ambiental, en donde se aborda el Programa Nacional de la Calidad Ambiental como un compromiso permanente del Ministerio de Ambiente, el INVEMAR y las corporaciones autónomas regionales costeras.

En la Figura 3-1 se representa la relación de los principales instrumentos normativos, que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico en el país.



Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados
■ Jorge Luis Ceballos

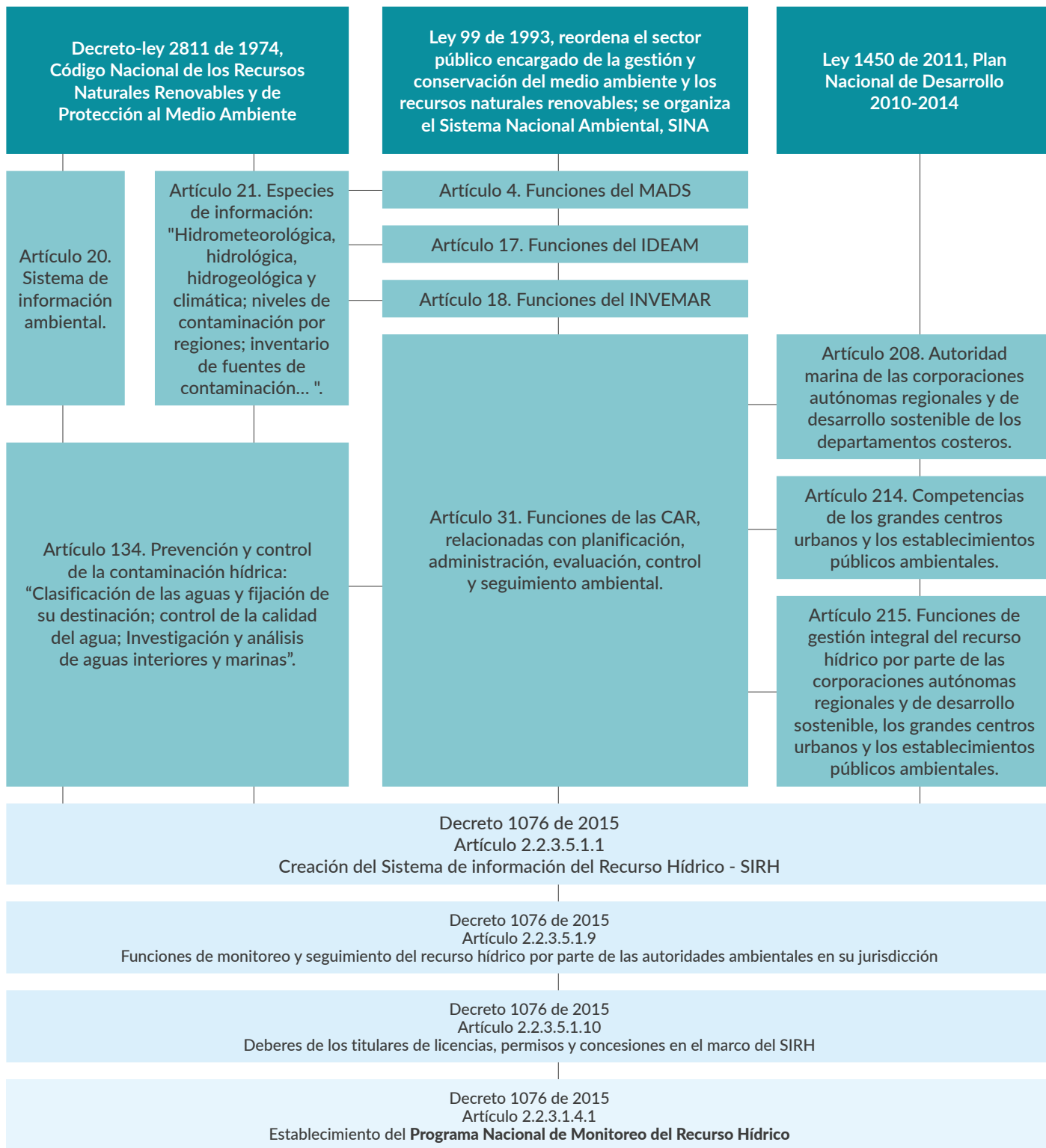


Figura 3-1. Principales instrumentos normativos que fundamentan el marco legal para el desarrollo de los procesos de monitoreo del recurso hídrico del país.

3.2 Marco institucional

La PNGIRH establece que se requiere hacer seguimiento al estado del recurso bajo los nuevos lineamientos, enfoques y prioridades; en el mismo sentido, la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia (PNAOCI), necesitan herramientas de monitoreo del agua para el seguimiento de la calidad ambiental marina.

De acuerdo con lo expuesto en la sección correspondiente al marco normativo, el monitoreo del agua se entiende como un proceso orientado en virtud de la gestión del recurso hídrico en el marco del SINA, lo cual convoca la acción de los actores involucrados en la planificación, administración, evaluación, investigación, control y seguimiento del recurso hídrico a nivel local, regional y nacional.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), como ente rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y definir las políticas y regulaciones a las que se sujetan la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la nación, le corresponde dirigir el SINA¹.

En este contexto, el *monitoreo del agua* en el marco del ciclo hidrológico *constituye una herramienta técnica para soportar los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos, así como la ordenación y manejo de unidades ambientales costeras*; estos enfoques se incluyen en

el marco normativo reglamentario y apuntan a los seis objetivos de la PNGIRH, que consideran el agua como factor de desarrollo en todos los aspectos. Adicionalmente, permite ampliar, consolidar, estandarizar las metodologías para el monitoreo y apuntar a estrategias como el conocimiento, la planificación, conservación de procesos hidrológicos y la gestión integral del recurso hídrico. En este sentido, guían la responsabilidad de las entidades y usuarios del SINA en el quehacer del monitoreo. La estrategia 3.3 del objetivo 3 de la política (...) *orienta a mejorar las prácticas y herramientas de monitoreo y seguimiento del recurso hídrico, como medio para realizar una gestión eficiente del agua y medir el logro de los objetivos y metas de la PNGIRH (...)*, con acciones estratégicas enfocadas a *Articular y optimizar las redes y los programas de monitoreo regional del recurso hídrico superficial, subterráneo y marino costero, mediante acciones como la integración de redes de monitoreo, establecimiento de reglamentos y protocolos de monitoreo de la calidad del recurso hídrico, entre otras*. Por otro lado, la estrategia 5.1 del objetivo 5 relacionada con el mejoramiento de la capacidad de gestión pública del recurso hídrico, (...) *orienta a fortalecer las acciones de las autoridades ambientales en la planificación, administración, monitoreo y control del recurso hídrico (...)*. De esta manera, el protocolo se alinea con los objetivos de la política de modo que se constata como una guía para la correcta aplicación de procesos metodológicos en el monitoreo del recurso hídrico continental y marino-costero (MAVDT, 2010). La Figura 3-2 esquematiza los actores institucionales del SINA que, de acuerdo con la normatividad vigente, tienen directa relación con el monitoreo del recurso hídrico en Colombia.

¹ Decreto 3570, Art 1 Objetivos del MADS. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/ministerio/objetivos-y-funciones>

A escala nacional, el monitoreo de los recursos hídricos continentales está a cargo del IDEAM; por su parte, el INVEMAR se encarga de monitorear la franja marino-costera con aportes en las jurisdicciones y áreas específicas de su competencia del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), el Instituto de Investigaciones Ambien-

tales del Pacífico John Von Neumann (IIAP), la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). En el ámbito regional, la competencia es atribuida a las autoridades ambientales: corporaciones autónomas regionales y de desarrollo sostenible y unidades ambientales urbanas.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS

Ente rector, formulador de políticas y coordinador

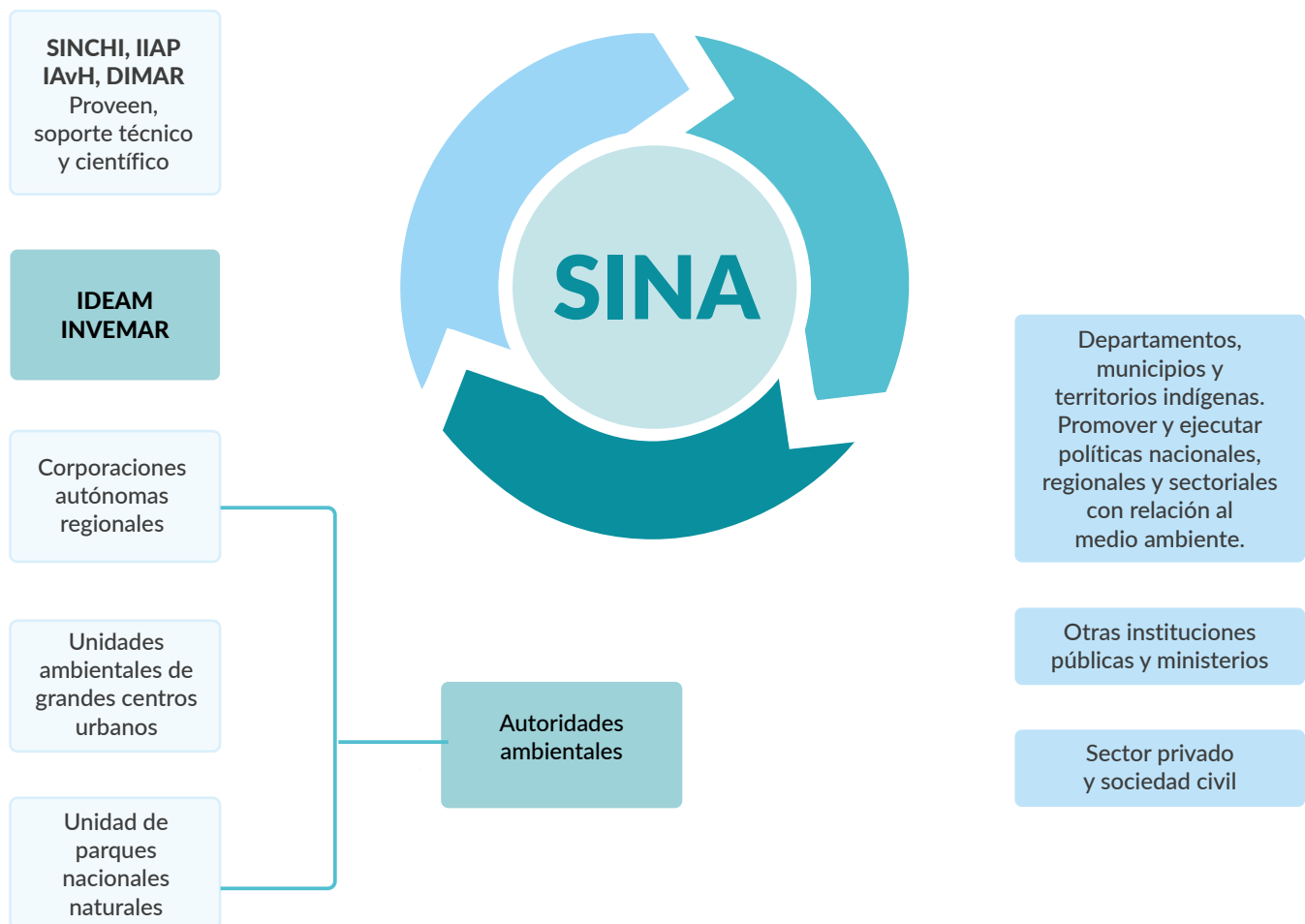


Figura 3-2. Esquema de institucionalidad que por norma tiene directa relación con el monitoreo del agua continental y marino costera, en el ámbito nacional y regional.

4. Marco conceptual

El marco conceptual del monitoreo del agua no puede ser otro que el ciclo hidrológico para conocer el estado y dinámica del agua como elemento, sus procesos y afectaciones tanto en cantidad como en calidad, a causa de las actividades socioeconómicas y presiones antrópicas.

4.1 Ciclo del agua

El ciclo hidrológico es un mecanismo continuo y permanente por el cual el agua circula en las diferentes capas de la tierra (atmósfera, hidrósfera, litósfera) a

través de cambios de estado físico (sólido, líquido, gaseoso), dinamizados con la radiación solar y la gravedad terrestre. Dentro de los procesos más importantes en el ciclo del agua se encuentran la evaporación, transpiración, precipitación, escorrentía e infiltración, los cuales se esquematizan en la Figura 4-1.

La **evaporación** corresponde al proceso mediante el cual el agua se incorpora a la atmósfera por acción combinada de las condiciones de presión de vapor y temperatura. Se presenta con mayor intensidad en los océanos, es la principal fuente de agua que ingresa a

la atmósfera y proporciona alrededor del 90 % de su humedad (*United States Geological Survey [USGS], 2017*).

La **transpiración**, a su vez, comprende el agua en fase líquida que incorporan las plantas en sus procesos metabólicos, para luego disponerla en la atmósfera en forma gaseosa a través de sus estomas.

El total de agua que se reincorpora a la atmósfera por estos dos procesos anteriores, se reconoce de manera indistinta como **evapotranspiración**.

Una vez en la atmósfera, el agua se moviliza a su alrededor y se presenta en forma de nubes, que corresponden a la expresión física de la **condensación** de vapor de agua en forma de gotas microscópicas. Estas gotas, ya en estado líquido, alcanzan su punto

de saturación, colisionan, se adhieren y ganan peso hasta producir la **precipitación** por acción de la gravedad. Este proceso se da con mayor frecuencia en la zona continental que en los océanos, donde es mayor la evaporación, y constituye el principal medio por el cual el agua retorna a la tierra (*USGS, 2017*).

El agua dulce que cae en estado líquido o sólido (nieve, granizo o en forma de condensación, como neblina y rocío) puede escurrir a través de la superficie por quebradas y ríos (**escorrentía superficial**) hasta llegar al mar, o **infiltrarse** en el subsuelo para alimentar unidades de roca y sedimento que constituyen acuíferos o sistemas acuíferos en los cuales el agua fluye en respuesta al gradiente hidráulico de la zona saturada.

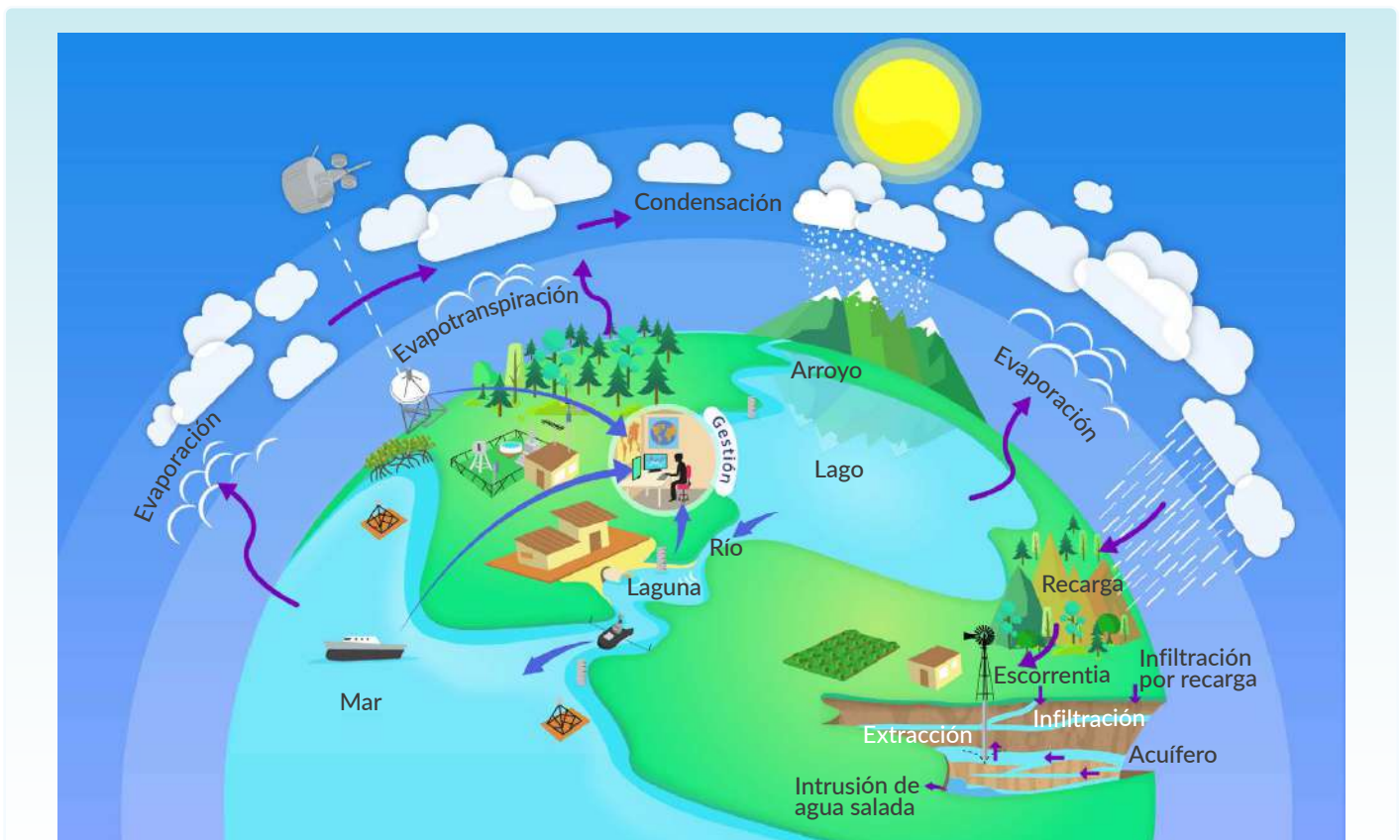


Figura 4-1. El ciclo hidrológico.

Fuente: (*Características, 2017*), (*Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT], 2017*).

Finalmente, el agua dulce se puede **acumular** en estado sólido en los glaciares, los cuales están distribuidos a nivel mundial en un 90 % en la Antártida y 10 % en Groenlandia y nevados de alta montaña; en estado líquido en arroyos, estanques, lagos naturales y de origen antrópico, humedales y acuíferos. El agua que llega a los mares es incorporada a los océanos, donde se acumula cerca del 96.5 % del agua disponible en el planeta (USGS, 2017), (Pabón et al., 2001).

El ciclo hidrológico abarca el dominio continental, marino y las zonas de intercambio o transición entre ambos. Por su parte, el monitoreo se ocupa del seguimiento tanto espacial como temporal de las variables de este ciclo.

4.2 Monitoreo del agua

Los procesos naturales e interacciones que hacen parte del ciclo hidrológico son muy complejos y es imposible cubrirlos en su integralidad teniendo en cuenta su variación continua en el tiempo y en el espacio. Es por esto que, contar con un monitoreo y seguimiento permanente, integral, oportuno, asequible, sistematizado y soportado en principios y métodos científicos, se vuelve parte esencial para conocer los procesos e interacciones del agua.

El monitoreo del agua se define como el proceso diseñado científicamente para observar, medir, muestrear y analizar mediante métodos técnicos normalizados, variables físicas, químicas y biológicas, para luego realizar un seguimiento del progreso de un programa o hecho en particular en favor de la consecución de sus objetivos y guiar las decisiones de gestión (Vrba & Soblsek, 1988).

El monitoreo se puede realizar por métodos directos de observación, ya sea en puntos estratégicos, estaciones y redes físicas definidas en un programa de monitoreo, o por estaciones espaciales o métodos indirectos mediante sensores remotos.

En Colombia, se han implementado redes que permiten recolectar información sobre el recurso hídrico, convirtiéndose en la principal herramienta utilizada para una adecuada gestión del agua. Este tipo de redes obedecen a tres niveles jerárquicos: *redes nacionales, redes regionales y redes locales y/o específicas* (Figura 4-2), las cuales se organizan dependiendo de sus ámbitos de intervención, las competencias institucionales, objetivos, densidades de puntos de observación, frecuencia de observación y otras especificidades propias de cada nivel.

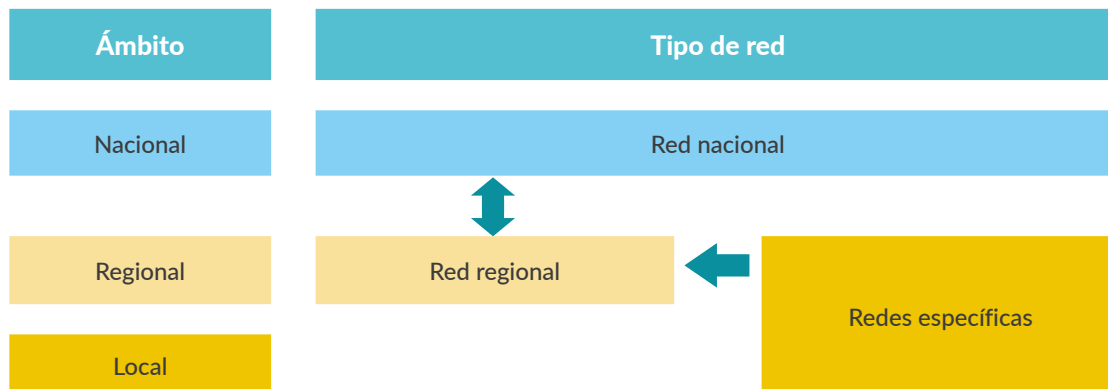


Figura 4-2. Tipos de redes de monitoreo según la cobertura y competencia institucional. Fuente: (Vargas, 2001).

Las **redes nacionales** son redes de referencia cuyo objetivo es adquirir los datos representativos sobre las tendencias de largo plazo y las variaciones de las características cuantitativas (agua lluvia, niveles, caudales, sedimentos) y cualitativas (calidad, isotopía) en todo el país, que permitan la definición de políticas y planes de gestión integral del recurso hídrico de aplicación en todo el territorio nacional. Este nivel está en cabeza del MADS, con la participación de sus institutos nacionales adscritos, en especial IDEAM e INVEMAR que tienen que ver con el monitoreo del recurso hídrico.

Actualmente, el IDEAM orienta la implementación y operación de las redes de monitoreo hidrológico, meteorológico y de calidad del agua; adicionalmente, tiene a su cargo la Red Nacional de Aguas Subterráneas y de Isotopía, distribuidas geográficamente por todo el país.

En el ámbito marino-costero se encuentran la Red de Mareógrafos, la Red de Boyas para medición de oleaje administrada por la DIMAR y la Red de Calidad de Aguas y Sedimentos (REDCAM, a cargo del INVEMAR).

Las **redes regionales** son aquellas redes de referencia operadas por las autoridades ambientales, con cobertura en sus áreas de jurisdicción, las cuales permiten tener información para cuantificar y administrar el recurso hídrico, comprender el estado de su calidad y gestionar su uso eficiente. Este tipo de redes obtienen datos precisos y detallados que pueden ser complementados con los datos básicos de la red nacional. Se consideran las redes hidrológicas, meteorológicas, además de las redes de aguas subterráneas y las redes monitoreo de calidad del agua con parámetros tanto fisicoquímicos como hidrobiológicos, así como las de los ecosistemas especiales del área de su jurisdicción.

Las **redes locales o específicas** hacen referencia a aquellas que se encuentran ubicadas en zonas de influencia de proyectos específicos y obedecen a estudios sobre zonas particulares con necesidades de monitoreo puntuales; por lo tanto, son operadas por empresas que manejan proyectos hidroeléctricos, extracción minera o de hidrocarburos, sistemas de abastecimiento, entidades estatales, consultoras, entre otras. Adicionalmente, en esta categoría se agrupan las redes permanentes o transitorias que se ocupan de hacer seguimiento a variables que buscan brindar información sobre situaciones particulares (red de vertimientos, redes de estaciones de servicio, redes de isotopía, entre otras).

La información de monitoreo de agua y recurso hídrico puede brindar un apoyo a la ejecución de programas nacionales e internacionales como: I) componente nacional del sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), II) componente nacional del Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar (GLOSS), III) componente nacional del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), IV) componente nacional del proyecto de Variabilidad y Predictibilidad Climática (CLIVAR), V) componente nacional del programa Estudio Regional del Fenómeno de El Niño (ERFEN), y VI) Red de Alertas de Eventos Hidrometeorológicos (IDEAM, 2014a).

Hay que considerar del mismo modo las *redes internacionales*, útiles para realizar un seguimiento global o regional. En el caso de redes globales como la Red Global de Isótopos en la Precipitación (GNIP), establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que, en cooperación con los servicios meteorológicos y autoridades nacionales, contiene

datos de isótopos estables (^2H , ^{18}O y ^3H), obtenidos a partir de muestras compuestas mensuales de agua lluvia tomadas en zonas con características específicas para la instalación del instrumento y propias para el muestreo de estos isótopos.

A través de la Red Interamericana de Recursos Hídricos (RIRH), se busca un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos de las Américas, a partir del fortalecimiento de alianzas, educación y experiencia técnica. Esta red incorpora varios portales regionales del agua, que promueven el intercambio de información entre profesionales, actores del proceso de gestión y tomadores de decisiones en los recursos hídricos (RIRH, 2017). También se considera la iniciativa de Gestión de los Recursos Acuíferos Transfronterizos (ISARM) del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y el Departamento de Desarrollo Sostenible (DDS) de la Organización de Estados Americanos (OEA), que monitorea los sistemas acuíferos transfronterizos, brindando así un apoyo a los países del continente americano en su uso sostenible y protección (OEA, 2017).

Se destaca el Banco Mundial de Datos Hidrológicos (*Global Runoff Data Centre-GRDC*), el cual permite analizar las tendencias climáticas globales y evaluar los impactos y riesgos ambientales a través de un intercambio entre proveedores y usuarios de datos. A este banco se remite la información hidrológica de los principales ríos del mundo, entre ellos la de los ríos Magdalena y Cauca en Colombia (GRDC, 2017). Además de la VMM, que suministra información meteorológica de última hora a través de los sistemas de observación y enlaces de telecomunicación a cargo de diferentes miembros que hacen parte de centros meteorológicos mundiales, regionales y nacionales. Consta de tres componentes: el Sistema Mundial de Observación (SMO), el Sistema Mundial de Telecomunicaciones (SMT) y el Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción (SMPDP), que proporcionan cotidianamente análisis, pronósticos y predicciones, particularmente advierten a los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales de todo el mundo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación de Argentina, 2017).



Río Patía, Loma Alta Leiva, Nariño
Luis Armando Mejía

5. Antecedentes

La implementación, creación y fortalecimiento de las redes de monitoreo de agua superficial, subterránea y marino-costera en Colombia, han evolucionado a través de los años, permitiendo robustecer la evaluación del recurso hídrico y generando mayor y mejor información. Desde el año 2002, el IDEAM, ha venido elaborando guías y protocolos de monitoreo para el seguimiento del agua, con el fin de fortalecer y unificar las metodologías y procedimientos para mejorar la obtención del dato, y de esta forma reforzar y consolidar el SIRH.

5.1 Redes de monitoreo

Las redes de monitoreo aportan datos que permiten valorar el estado y la dinámica del recurso hídrico en sus diferentes niveles de análisis, tanto para aguas continentales (superficiales y subterráneas) como marino-costeras. Las redes entregan datos de referencia para estimar variaciones en las dimensiones espacio-temporales que afectan y condicionan la gestión integral del recurso hídrico. A continuación, se presentan los tipos de redes existentes en el territorio nacional, se toman como referencia aquellas

a cargo del IDEAM y el INVEMAR en sus ámbitos de intervención.

5.1.1 Red Nacional de Monitoreo Hidrometeorológico

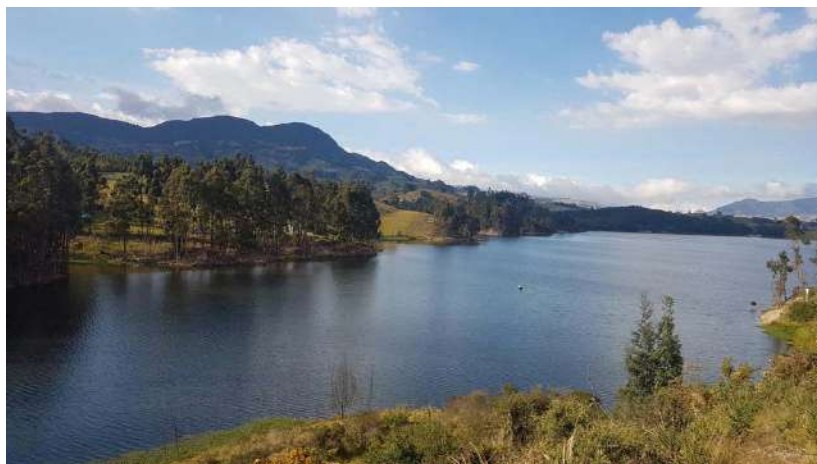
En Colombia, desde la década de los 60, han funcionado redes hidrometeorológicas en algunas regiones del país. Debido a su ubicación, estas redes brindaban información solo con fines específicos; la interpretación y los datos no eran homogéneos y la medición en las estaciones era muy limitada.

En el año 1969, el gobierno decidió crear el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCHM), con el objetivo de organizar y desarrollar actividades de hidrología y meteorología a escala nacional. Para cumplir dicho objetivo, de acuerdo con las recomendaciones de la OMM y el análisis de varios factores nacionales, se estableció inicialmente que, en Colombia, se requería una red óptima de aproximadamente 1700 estaciones hidrométricas (SCMH, 1974).

Al año 2019, el IDEAM de acuerdo con su misión, cuenta con una red básica nacional de 2591 estacio-

nes hidrometeorológicas activas, compuestas por 727 estaciones hidrológicas de las cuales 439 son estaciones hidrométricas convencionales que permiten monitorear el comportamiento de los niveles diarios observados y 288 son estaciones automáticas con registros horarios de niveles y transmisión en tiempo real; adicional, tiene 1205 estaciones pluviométricas (PG y PM) y 659 climatológicas, distribuidas en todo el territorio nacional, tal y como se presenta en la Figura 5-1. La información de esta red está disponible en el portal institucional del IDEAM, en donde se puede descargar, entre otros, el Catálogo Nacional de Estaciones² actualizado, con sus correspondientes definiciones. En este catálogo se registran todas las estaciones activas y se conserva el histórico de las que han sido suspendidas por diferentes razones, pero que pueden tener una longitud de registro de datos importante para diversos propósitos.

² Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM.
Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>



Embalse El Hato
Jenny Marin



Figura 5-1. Distribución de estaciones de la Red Hidrometeorológica Nacional-IDEAM. Red nacional de estaciones hidrológicas y mareográficas.

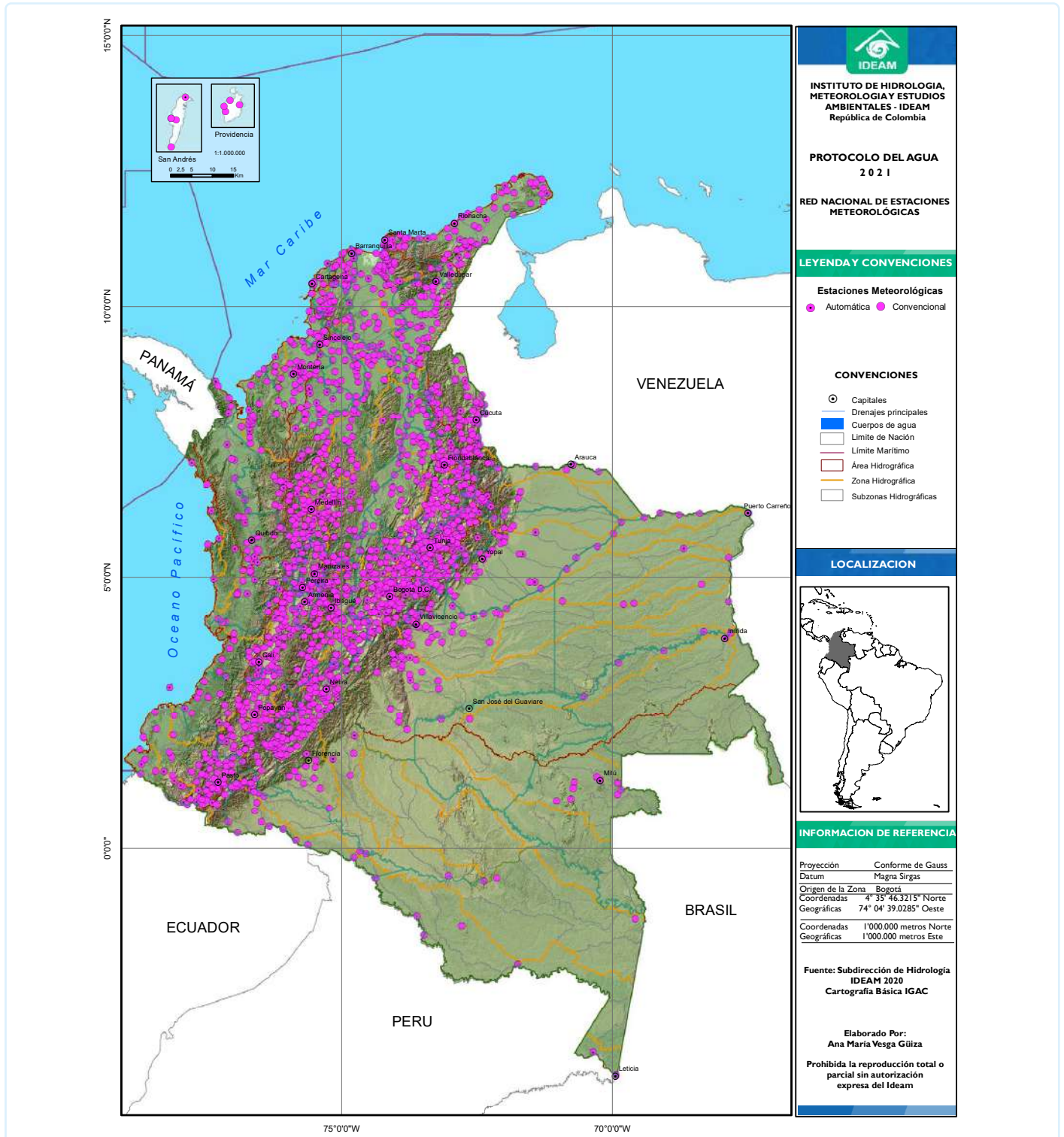


Figura 5-1. Distribución de estaciones de la Red Hidrometeorológica Nacional-IDEAM. Red nacional de estaciones meteorológicas.

Actualmente, cerca del 90 % de estas estaciones cuentan con registros de tipo convencional, sin embargo, en los últimos años, se han ido adquiriendo equipos que permiten obtener datos de mayor calidad y en tiempo real, lo cual ha facilitado un proceso de actualización y fortalecimiento de la red con estaciones de tipo automático.

Así mismo, el IDEAM está implementando una plataforma que permita la integración de software, la recepción, procesamiento y visualización de datos procedente de diferentes fuentes tales como estaciones convencionales o automáticas, imágenes de satélite, radares, etc. La ampliación y modernización de la red

básica nacional está prevista con la instalación de 210 estaciones automáticas nuevas, repotenciación de 247 estaciones y la automatización de 665 a 2022.

5.1.2 Sistema Red Nacional de Radares Meteorológicos

Actualmente, Colombia dispone de una red conformada por nueve radares meteorológicos operados por distintas entidades del país (Aeronáutica Civil, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá–(SIATA), Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático–(IDIGER e IDEAM) tal y como se muestra en la Figura 5-2.



Figura 5-2. Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia.

Específicamente, el IDEAM, desde el año 2017, ha venido acompañando la instalación y puesta en marcha de radares meteorológicos que le permitirán mejorar el monitoreo y seguimiento de los eventos meteorológicos relacionados principalmente con la precipitación. Estos sensores remotos favorecerán la emisión oportuna de alertas tempranas relacionadas con las condiciones hidrometeorológicas en sus áreas

de influencia (alcance máximo en cobertura de 250 km de radio) y de esta forma obtener una base de datos robusta para la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes en materia de gestión del recurso hídrico y prevención y atención de desastres.

En la actualidad, el IDEAM tiene y opera cuatro radares meteorológicos (Figura 5-3), cuya localización y características básicas se describen en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Localización de radares meteorológicos de Colombia instalados por el IDEAM.

Nombre radar meteorológico	Municipio-Departamento	Coordenadas		Banda de operación	Alcance máximo en cobertura	Estado actual
Radar Barrancabermeja	Barrancabermeja-Santander	6.93	-73.76	Banda C	250 km	Operativo
Radar San José del Guaviare	San José del Guaviare-Guaviare	2.53	-72.62	Banda C	250 km	Operativo
Radar Cerro Munchique	El Tambo-Cauca	2.31	-76.57	Banda C	250 km	Operativo
Radar Carimagua	Puerto Gaitán-Meta	4.56	-71.33	Banda C	250 km	Operativo



Laguna Big Pond
 Jenny Marín

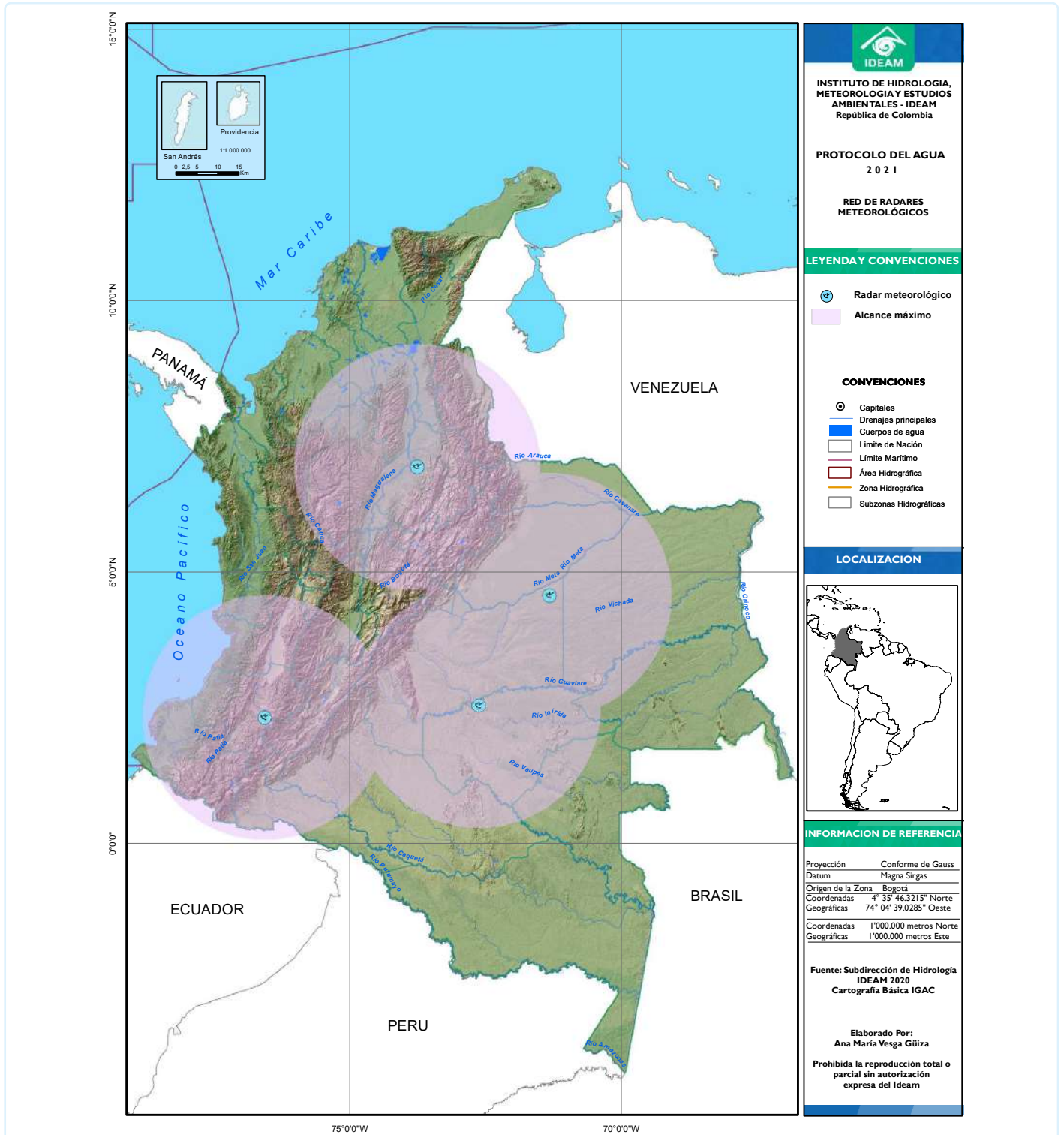


Figura 5-3. Red de radares meteorológicos de IDEAM.

Es importante señalar, la gran potencialidad de los radares meteorológicos como sistema de observación remota, la cual extiende su utilización a una amplia gama de tareas en las distintas áreas de la meteorología, tales como:

Fortalecer la vigilancia meteorológica

Mediante el monitoreo de la cobertura, movimiento, evolución y estructura interna de las nubes generadoras de precipitación a través de productos de observación de calidad controlada que permiten estimar, de forma distribuida en el espacio y el tiempo, las cantidades y tipos de precipitación, viento y turbulencia que afectan el territorio colombiano.

Mejoramiento de la predicción meteorológica

Optimizar la predicción meteorológica a corto y muy corto plazo; combinar los datos de radar con otros recursos del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) (principalmente datos de satélite y modelización numérica en alta resolución) para obtener, entre otras:

- ♦ Predicciones de fenómenos adversos para la aviación, entre 0 y 2 horas.
- ♦ Predicciones de precipitación y convección, entre 0 y 6 horas.
- ♦ Predicciones de precipitación acumulada en diversos intervalos hasta 24 horas.
- ♦ Estimaciones distribuidas de la calidad de dichas predicciones.

Mejoramiento de la predicción hidrológica

Mejorar la calidad de la predicción hidrológica y de avisos de inundaciones para ayudar a proteger la vida y los bienes de la población, así como gestionar mejor el agua disponible para distintos usos, tales como la hidroelectricidad, la agricultura, etc.

Desarrollo de estudios meteorológicos y climatológicos

Generación de estudios relacionados con fenómenos meteorológicos de meso y microescala que se producen en el territorio colombiano, como son los sistemas convectivos y su organización, la formación de granizo, la turbulencia, etc., y establecer sus climatologías.

5.1.3 Red Nacional de Sedimentos

Los registros más antiguos de transporte de sedimentos, almacenados en la base de datos del IDEAM, son del año 1970 y corresponden a la estación hidrológica Puente Santander, en el río Magdalena (departamento del Huila), la cual aún está activa.

En las décadas de los años 70 y 80, se tenían aproximadamente 320 estaciones; en el 2009 se realizaron monitoreos en 225 estaciones, y durante 2017 en 230. Actualmente, se realiza el ajuste al procedimiento para la determinación de concentración de sedimentos en suspensión y el estudio de tecnologías para el procesamiento de la muestra.

Los datos medidos por la Red Nacional de Monitoreo de Sedimentos aportan información valiosa para la elaboración del Estudio Nacional del Agua (ENA) en sus diferentes versiones, y manejan la información de transporte de sedimentos en puntos de interés de diversas cuencas; permiten, además, conocer las características geomorfológicas de las mismas para obtener una cuantificación del potencial de producción de sedimentos en suspensión y el rendimiento de producción a nivel zonal. La Figura 5-4 presenta la distribución geográfica de la red de monitoreo de sedimentos en el territorio nacional.

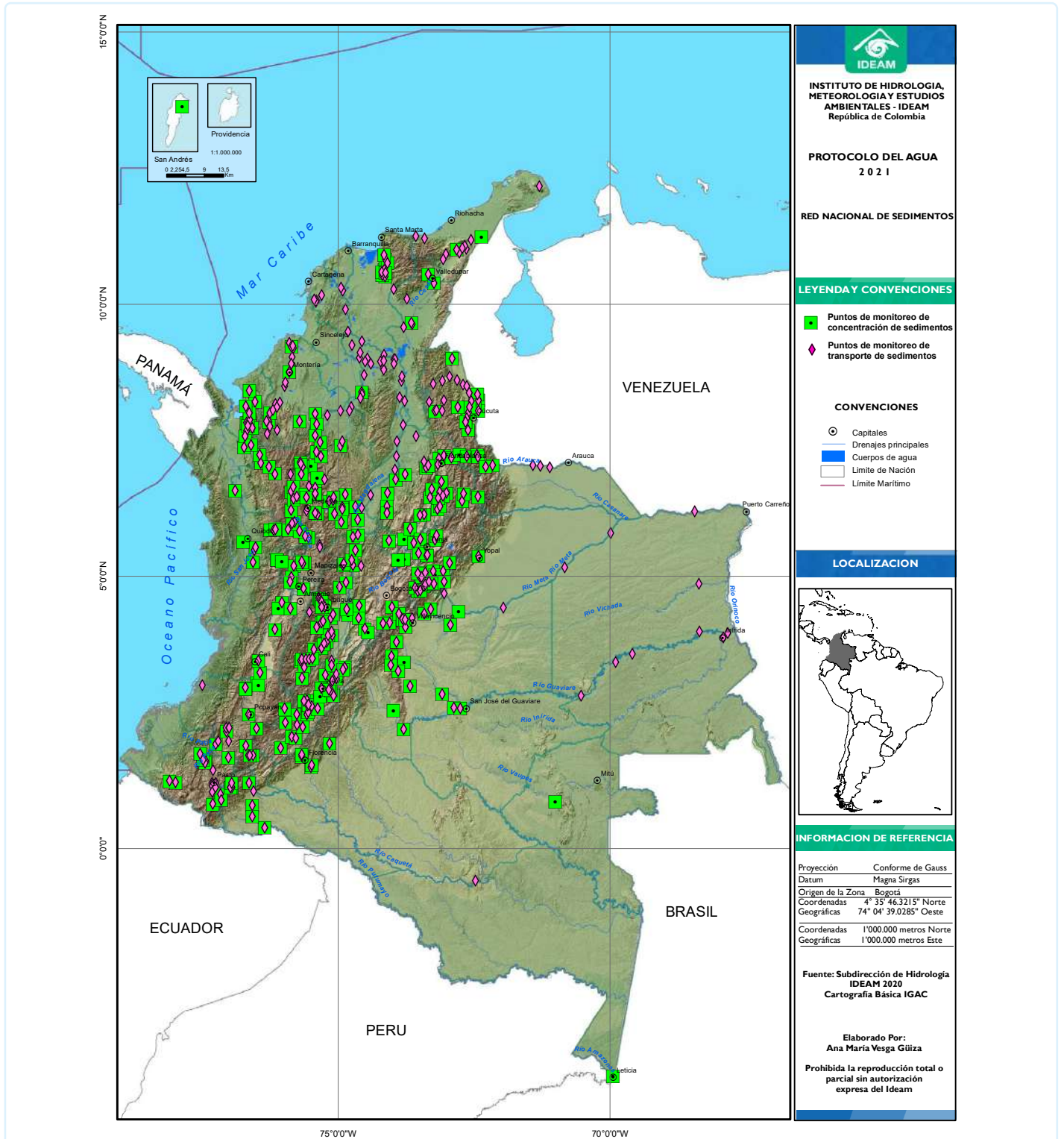


Figura 5-4. Localización de los puntos que integran la Red Nacional de Sedimentos del IDEAM.

5.1.4 Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua

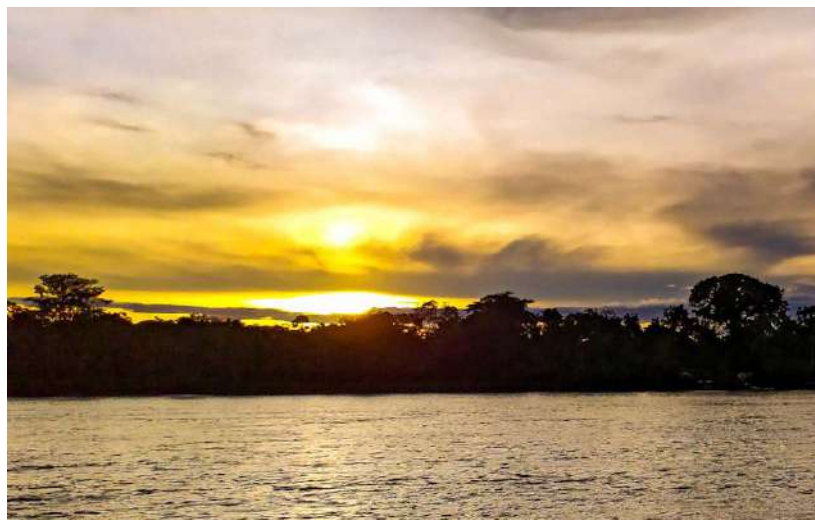
La red de monitoreo de calidad de agua superficial, inició desde 1976 en el marco de la misión del Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) como servicio hidrológico nacional y sus funciones específicas en el campo de la adecuación de tierras; orientada principalmente a evaluar la aptitud para riego en estaciones hidrométricas ubicadas en los distritos de riego, razón por la cual el monitoreo se realizaba en un número considerable de quebradas y arroyos como fuentes de abastecimiento de estos distritos³. Esta red contaba con cerca de 250 puntos con mediciones de calidad e hidrológicas en el 70 % de ellos (IDEAM, 2006).

La red de calidad del agua del IDEAM, es operada por las 11 áreas operativas y el Laboratorio de Calidad Ambiental del instituto. Cuenta con 160 pun-

tos de monitoreo, la mayoría de ellos localizados en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, donde existe mayor presión antrópica (Figura 5-5). Estos puntos se encuentran ubicados principalmente en estaciones hidrológicas, con el propósito de hacer uso y aprovechamiento de la infraestructura instalada.

Las muestras tomadas en los puntos de monitoreo se envían al Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM, ubicado en la ciudad de Bogotá, para su análisis. Actualmente, la red de calidad del agua mide los siguientes parámetros: temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fósforo total, fósforo reactivo disuelto, hidrocarburos, coliformes fecales y totales, mercurio en sedimentos, mercurio en agua, metales disponibles en agua (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Mn, Al, Fe), metales biodisponibles en sedimentos (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Mn, Al, Fe) y macroinvertebrados.

3 IDEAM, Documento interno, Justificación de estaciones de la red de calidad de agua del IDEAM, 2005.



Río Atrato, municipio Vigía del Fuerte
■ Edgar Garzón

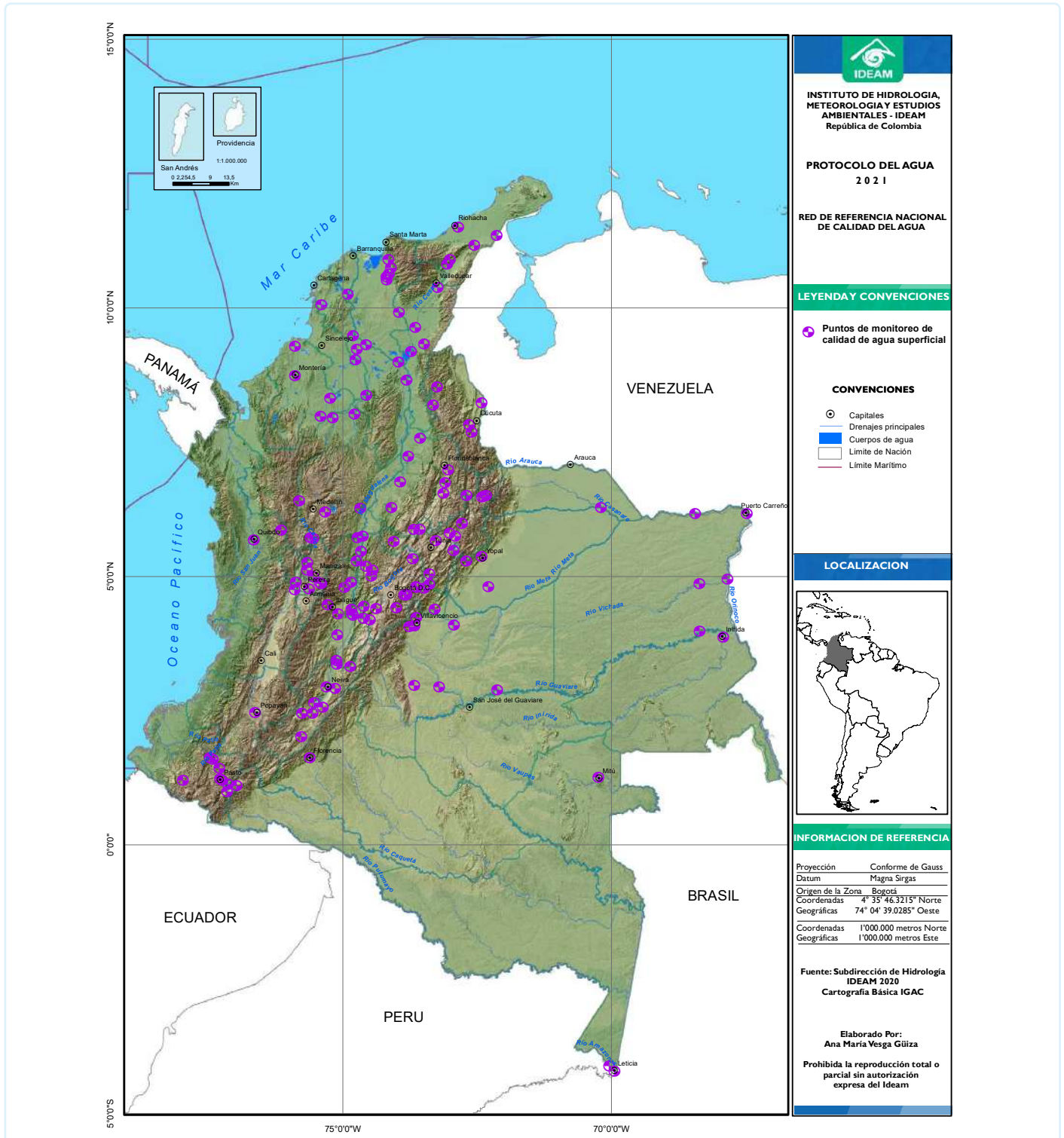


Figura 5-5. Localización de las estaciones que integran la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua.

5.1.5 Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas

La Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RBNASUB) fue concebida como parte del Programa Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas, la cual busca evaluar el estado y la dinámica del recurso hídrico subterráneo para planificar su manejo, reconocer los factores que inciden en su agotamiento y deterioro y, establecer relaciones con otros componentes del ecosistema natural para garantizar su sostenibilidad ambiental.

Esta red inicia como un proyecto convenido desde el año 2013, con el objetivo de articular acciones con los programas de monitoreo de las corporaciones autónomas regionales que permitan la transferencia de información hidrogeológica a la Red Básica Nacional

de Aguas Subterráneas, en áreas priorizadas seleccionadas con base en criterios de uso, aprovechamiento y degradación del recurso subterráneo.

Actualmente, integran la red 114 puntos de agua subterránea (Figura 5-6), los cuales corresponden principalmente a pozos de producción, en reserva, abandonados, o pozos de observación construidos y/o adoptados para labores de seguimiento. En estos puntos, se realizan mediciones piezométricas y de calidad de agua, con una frecuencia de monitoreo mínima de una o dos veces en el año, caracterizando las temporadas de lluvias y estiaje.

En los próximos años, se buscará ampliar estos puntos de monitoreo a otras regiones del país, continuando con el apoyo interinstitucional de las CAR.



Ciénaga Matapalma, Cesar-ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM

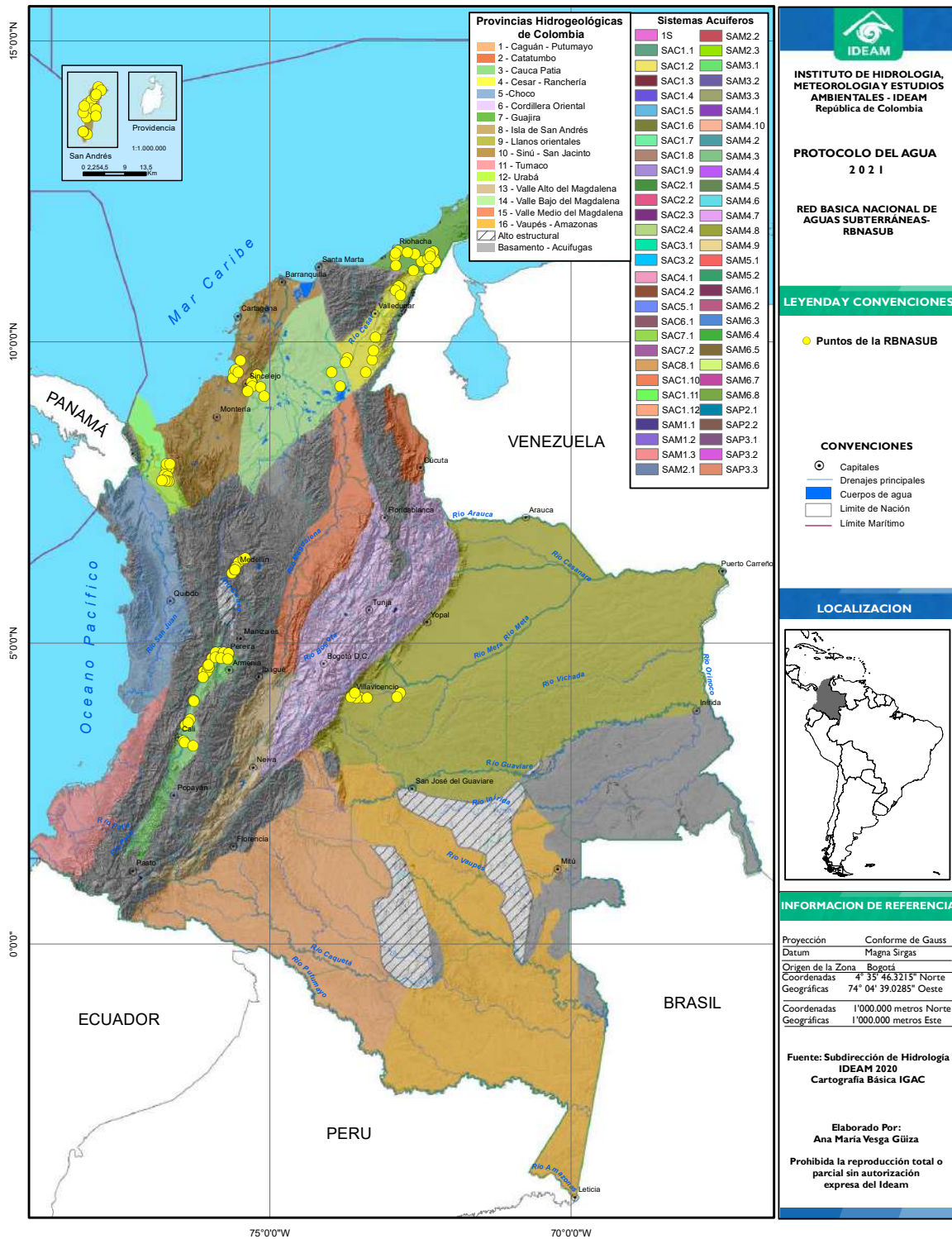


Figura 5-6. Localización de los puntos que integran la Red Básica Nacional de Aguas Subterráneas.

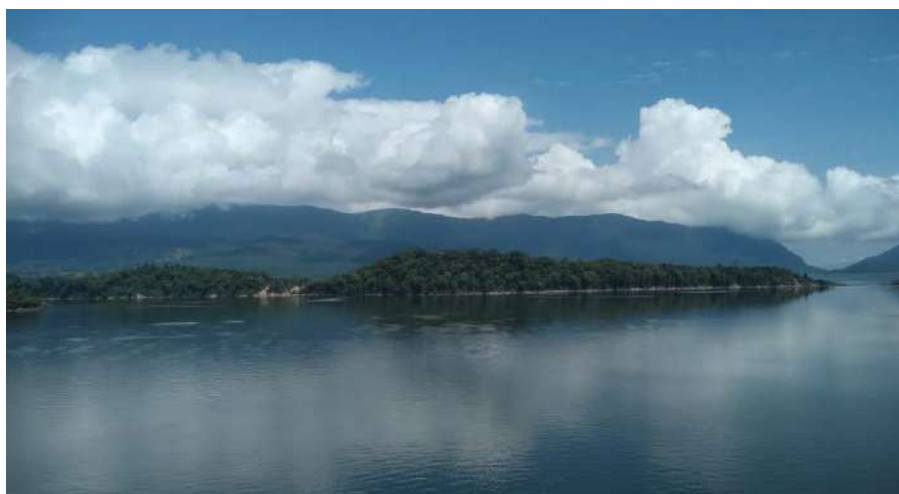
5.1.6 Red Nacional de Isotopía

La Red Básica Nacional de Isotopía, fue diseñada para determinar las variaciones temporales y espaciales de los isótopos estables del agua en la precipitación y en las principales fuentes hídricas superficiales y subterráneas del territorio colombiano. Esta red, como una iniciativa piloto adelantada desde el año 2014 por el IDEAM, busca ser una base para desarrollar en el país investigaciones en hidrología e hidrogeología, con la aplicación de técnicas isotópicas que permitan estudiar la influencia del relieve topográfico, la dirección del viento y la climatología en la composición isotópica de la precipitación y en el ciclo hidrológico, además de la modelación climática, variabilidad y cambio climático a escala nacional. También, estudios que permitan determinar zonas de recarga, conexión de aguas superficiales-aguas subterráneas, contaminación de acuíferos, entre otras.

Con un diseño de 32 estaciones ubicadas en sitios estratégicos del país (Figura 5-7), en donde se consideró la diversidad del relieve topográfico, la dirección mensual de los vientos y las tres fuentes

de evaporación de Colombia como lo son los océanos Atlántico y Pacífico y la selva amazónica, se han instalado a la fecha 16 estaciones de monitoreo de isótopos ambientales en la precipitación (Figura 5-7); se encuentran ubicadas en las estaciones meteorológicas del IDEAM y en sitios con jurisdicción de algunas corporaciones autónomas regionales, que actúan como representantes estratégicas en el cuidado y la toma correcta de las muestras mensuales. Cada estación cuenta con un colector que toma muestras mensuales de agua y la recolección se realiza bajo el protocolo de la *Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP* (OIEA/GNIP, 2014).

Esta red nacional se articula a la Red Global de Isótopos en la Precipitación (*Global Network for Isotopes in Precipitation, GNIP*) a cargo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y complementa la información que se venía recolectando de lluvia mensual en dos estaciones, una ubicada en Bogotá y la otra en la ciudad de Barranquilla, la cual se encuentra suspendida actualmente.



Embalse del Topocoro
■ Ana Karina Campillo

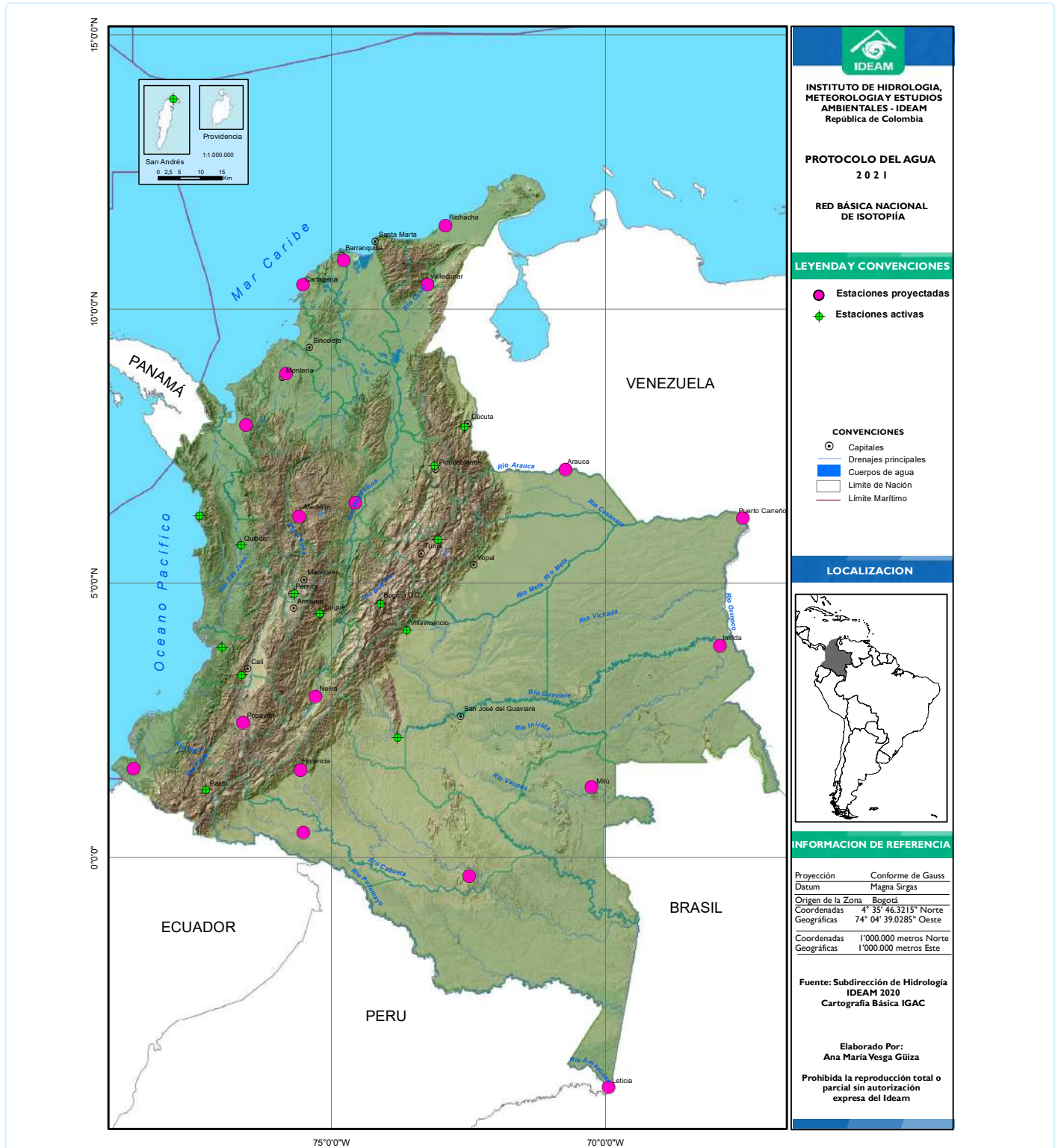


Figura 5-7. Localización de las treinta y dos (32) estaciones de isotopía definidas en la fase de diseño de la Red Nacional de Isotopía.

5.1.7 Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras

El monitoreo de la calidad de las aguas marinas superficiales inició en el año 2000 con el proyecto *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina del Caribe y Pacífico colombiano*, formulado por el INVEMAR y financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el que participaron el Ministerio del Medio Ambiente (actual MADS), las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) de los doce (12) departamentos costeros y algunos institutos de investigación (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas-CIOH e IIAP). Este proyecto tenía como objetivo establecer un sistema para la vigilancia permanente de la calidad ambiental marina de la franja marino-costera colombiana, para contribuir con las bases científicas para la formulación de planes y programas de ordenamiento de los ecosistemas, de manera que posibilitara el manejo integrado y el aprovechamiento sostenible de las aguas y sus recursos naturales asociados.

La ejecución del proyecto culminó con el establecimiento de la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM), que para el 2001 contaba con 289 estaciones distribuidas en sitios de importancia económica y ambiental como golfos, bahías, lagunas costeras, ciénagas, playas, frentes y cuencas bajas de los principales ríos que desembocan al mar Caribe y océano Pacífico. Actualmente, la REDCAM se ha fortalecido técnicamente y funciona de manera articulada por medio de acuerdos interinstitucionales entre el INVEMAR como ente coordinador, y las CAR costeras como lo son CORPOGUAJIRA, CORPOMAG, CRA, CARDIQUE, CARSUCRE, CVS, CORPOURABÁ, CORALINA, CODECHOCÓ, CVC, CRC y CORPONARIÑO con el patrocinio del MADS (INVEMAR, 2019).

También han participado entidades del orden local como los Establecimientos Públicos Ambientales (EPA) de Cartagena y Buenaventura, Departamentos Administrativos del Medio Ambiente (DAMA) de Santa Marta y Barranquilla, entre otras (Figura 5-8), (INVEMAR, 2017).



Figura 5-8. Entidades que participan en la REDCAM. Fuente: (INVEMAR, 2017).

La REDCAM se encarga de monitorear dos veces al año parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos en cerca de 350 estaciones (Figura 5-9), (INVEMAR, 2017). Adicional, a partir del 2014, la REDCAM⁴ inició el monitoreo de contaminantes orgánicos e inorgánicos

en sedimentos (45 estaciones para el monitoreo de sedimentos en el año 2016) y organismos marinos (dos estaciones en Cauca), como complementos para el diagnóstico de la calidad ambiental marina.

Tanto INVEMAR como DIMAR (con el CIOH), generan plataformas de acceso a productos de información. DIMAR principalmente, ofrece servicios de pronóstico para el quehacer marítimo del país (INVEMAR, 2013).

4 Sistema de Información Ambiental Marina-Visor geográfico REDCAM. Disponible en: <https://siam.invemar.org.co/redcam-geovisor/>

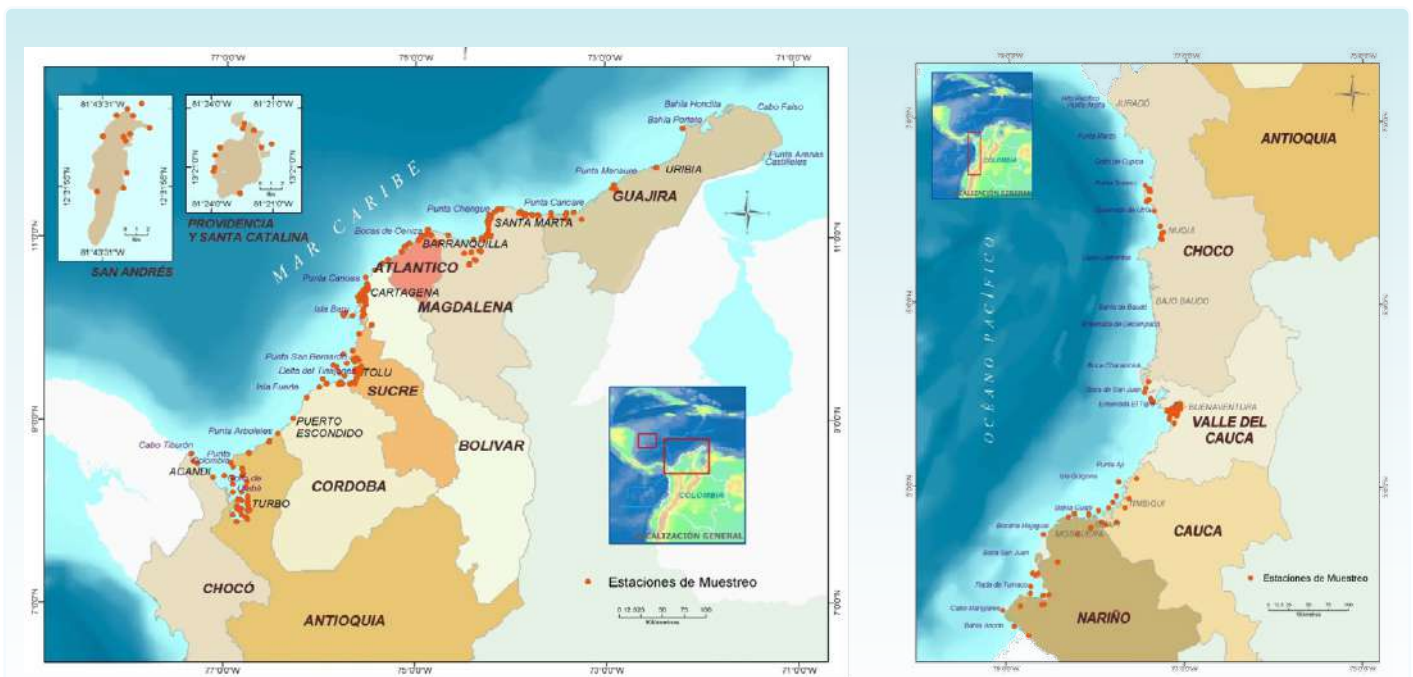


Figura 5-9. Ubicación de las estaciones de muestreo de la REDCAM en las zonas costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Fuente: (INVEMAR, 2017).

5.1.8 Redes regionales de monitoreo

La red básica regional se establece para proveer información hidrológica necesaria para conocer, proteger, administrar, hacer seguimiento y controlar el uso y

aprovechamiento del agua a nivel de zonas y subzonas hidrográficas. La red regional, complementaria de la red de referencia nacional, debe suministrar un nivel de información hidrológica suficiente en cualquier lugar

dentro de su región de aplicabilidad, para evitar errores graves en la toma de decisiones, relativos a la planificación, administración y uso del agua (IDEAM, 2006).

A nivel regional, existen redes hidrometeorológicas en las siguientes Autoridades Ambientales Regionales: CAR, CVC, CORPOCHIVOR, CARDER, CORNARE, CORPOCALDAS, y CORANTIOQUIA.

En trabajo conjunto entre el MADS, el IDEAM, y las CAR, se diseñó la red hidrometeorológica complementaria en jurisdicción de las Corporaciones Autónomas Regionales de Colombia-Fase 2 (IDEAM, 2016), lo cual ha permitido desde el año 2012, cumplir con objetivos como:

- Describir las características básicas de la red hidrometeorológica emplazada en el área de la correspondiente jurisdicción.
- Realizar el levantamiento de los requerimientos de información de monitoreo hidrometeorológico.
- Identificar objetivos de monitoreo complementarios en el contexto de la operación de la red básica nacional.
- Elaborar una propuesta concertada con cada corporación para el diseño de una red hidrometeorológica complementaria.

5.2 Protocolos y guías de monitoreo

El IDEAM ha construido protocolos y guías de monitoreo que proporcionan metodologías de obtención de información hidrológica en virtud de los decretos 1277 de 1994, 291 de 2004 y 1076 de 2015, teniendo en cuenta que al instituto le corresponde el seguimiento del estado y la dinámica de los recursos hídricos en cantidad y calidad. Lo anterior ha llevado a la utilización de una serie de herramientas e instrumentos como los protocolos de monitoreo, para facilitar a las autoridades ambientales y demás entidades del orden nacional, regional y local, el muestreo y la recopilación de información en el marco de la observación, monitoreo, medición y vigilancia de variables hidrológicas de cantidad y calidad. La Figura 5-10 muestra la línea de tiempo de los protocolos o guías de monitoreo elaborados por el IDEAM en los últimos años (IDEAM, 2002), (IDEAM, 2004), (IDEAM, 2007).

Es importante resaltar que estos instrumentos no han tenido un uso extendido, dado que su difusión ha sido deficiente y el talento humano de las autoridades ambientales no ha sido debidamente capacitado y entrenado para realizar adecuadamente las prácticas de monitoreo del recurso hídrico.



Salento, Quindío
Jenny Marín



Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua **2021**.



2007
Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua.



2002
Guía para el monitoreo de vertimiento, aguas superficiales y subterráneas.



Guía para el monitoreo y seguimiento del agua **2004**.

Figura 5-10. Línea de tiempo de los protocolos o guías de monitoreo elaborados por el IDEAM.



6. Procedimiento general para el monitoreo del agua

El protocolo de monitoreo y seguimiento del agua es un documento guía que orienta a las autoridades ambientales, entidades sectoriales y a cualquier usuario, sobre cómo realizar un monitoreo de acuerdo con sus necesidades específicas de información, teniendo en cuenta un programa de monitoreo, el cual debe dar respuesta a preguntas tales como dónde, para qué, cuándo y quién lo llevará a cabo, sin dejar de lado los posibles riesgos que se puedan presentar. Por esto es vital que la planificación sea preparada con los directos involucrados, técnicos de campo y el equipo de laboratorio (Livni et al., 2015).

El protocolo presenta el procedimiento general que debe seguir cualquier campaña de monitoreo e

indica cuáles deben ser las etapas generales desde su planificación hasta la entrega de la información como producto de la misma. Las metodologías de muestreo para cada uno de los monitoreos deben tener en cuenta los objetivos de cada campaña y serán descritas más adelante.

El procedimiento tiene una estructura conformada por cuatro partes: 1) Sistema de monitoreo, 2) Recolección de datos, 3) Administración de datos, y 4) Uso de la información, las cuales siguen las fases del procedimiento general y son esquematizadas a través de un flujograma (Figura 6-1) que muestra de forma detallada el proceso.

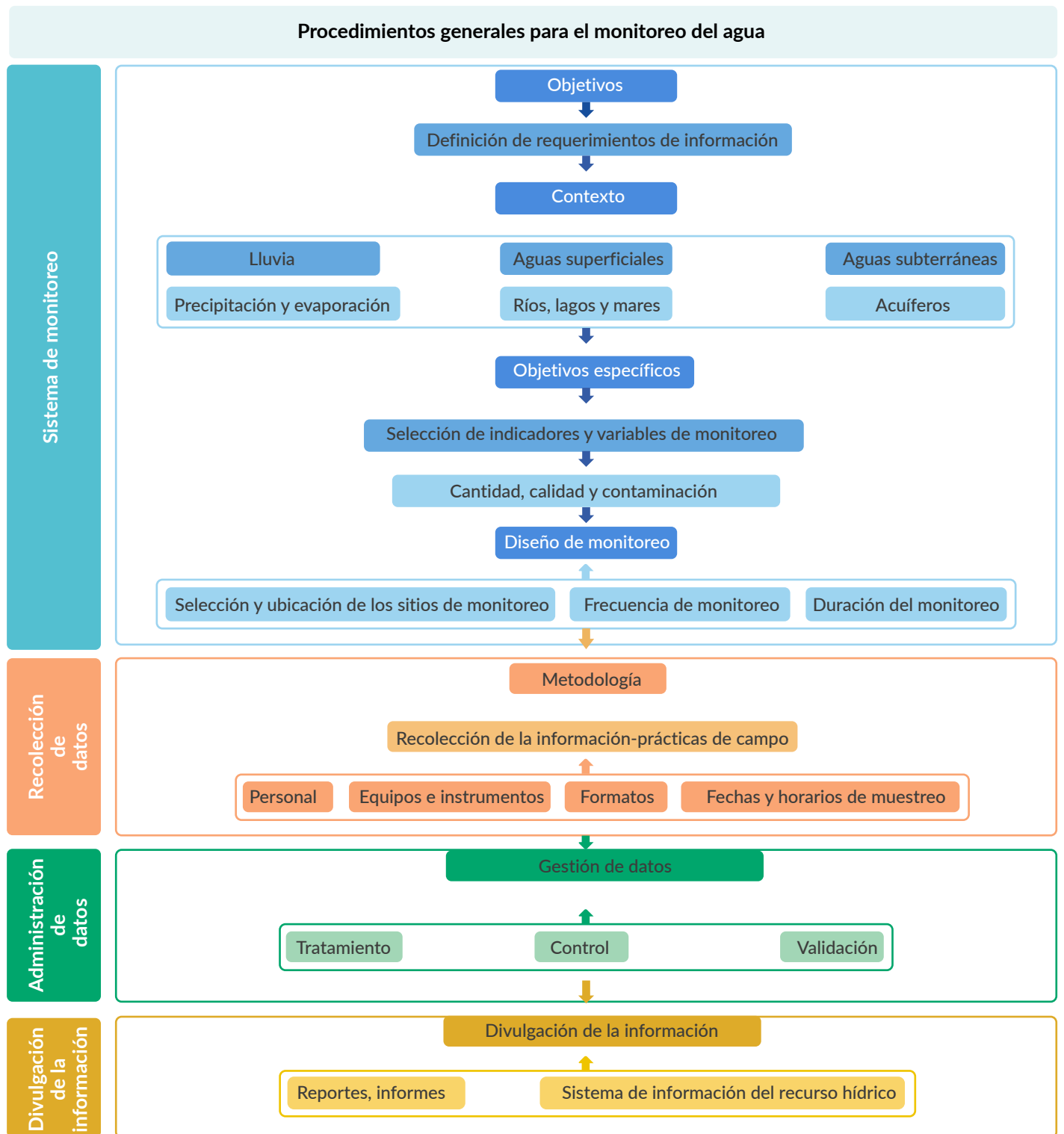


Figura 6-1. Flujograma del procedimiento para el monitoreo del recurso hídrico.

6.1 Sistema de monitoreo

En el programa de monitoreo se establece el objetivo general de la campaña de monitoreo, el cual debe considerar las prioridades, intereses y las necesidades de los usuarios en cualquier contexto de seguimiento del agua que se adelante, ya sea en cantidad (niveles, caudales, sedimentos) y/o calidad (variables fisicoquímicas, hidrobiológicas, sedimentos) de aguas superficiales, subterráneas y marino-costeras.

Una vez definido el objetivo, es necesario identificar los resultados esperados en la campaña, lo cual permite conocer las deficiencias y las necesidades de información para el programa de monitoreo; lo anterior facilita la determinación de los parámetros que necesitan ser analizados (indicadores y variables), métodos y localización de los sitios de muestreo, frecuencias, involucrados, administración y registro de datos, recursos financieros, entre otros.

Establecer los objetivos es uno de los factores principales para determinar los sitios de monitoreo, frecuencia, duración, procedimientos, tratamiento de las muestras (en caso de hacer muestreo de calidad o isotópico) y los requerimientos analíticos. De la misma manera, el grado de detalle, precisión de recolección de información y la presentación de los resultados.

La definición de los objetivos específicos determina los indicadores por considerar derivados del monitoreo, los cuales pueden estar conformados por una o más variables. Para su selección, se debe tener en cuenta la relación existente entre la cantidad y la calidad del agua, empleando metodologías entre las cuales se incluyen: comparación de variables con la normatividad vigente, indicadores de calidad del agua a partir de un grupo de variables medidas que permiten

generar un valor que califica la fuente y metodologías más elaboradas como modelación (Samboní, 2009), (Valdés et al., 2011).

Al momento de realizar la planificación de una campaña de monitoreo, es importante conocer las redes que se encuentran disponibles, tanto a nivel nacional como regional ya que son de gran utilidad como fuentes de información existente y complementaria para cualquier campaña de monitoreo. En caso de no existir una red asociada a la zona donde se espera realizar el monitoreo, se debe explorar la alternativa de realizar el montaje en función de los objetivos propuestos en el programa de monitoreo y, adicionalmente, pensar en incluir los puntos monitoreados en una red regional a partir de acuerdos y convenios con la entidad respectiva.

El diseño de una red debe estar basado en el aprovechamiento máximo de los recursos tanto técnicos como económicos al momento de seleccionar, ubicar y determinar la densidad de puntos por monitorear, la frecuencia y la duración del programa de monitoreo y la exactitud con la que deben ser recogidas las observaciones. Para el caso de la densidad de la red, la cantidad de puntos depende del objetivo, del nivel que se está tratando (nacional, regional o local) y la localización topográfica.

La selección de sitios de monitoreo se debe hacer de tal modo que proporcionen datos representativos; para el caso de calidad, de preferencia en donde haya probabilidad de que ocurran cambios marcados o existan importantes usos de ríos, zonas de mezcla o regiones que no estén afectadas por descargas significativas, confluencias o separaciones. En lo posible, se deben seleccionar sitios en los cuales se disponga de datos relacionados con la corriente.

La frecuencia de observación, depende de las necesidades técnicas y de aprovechamiento, sin embargo, se pueden aplicar cálculos estadísticos para la definición de una frecuencia de monitoreo. Por ejemplo, si una red tiene como finalidad el control de vertimientos al interior de una cuenca o a lo largo de un cauce en una zona industrial, la frecuencia de muestreo tiene que ser más alta que si se trata de una red que busca determinar el comportamiento estacional de un parámetro de contaminación. Se puede consultar la norma NTC-ISO 5667-1 CALIDAD

DELAGUA. MUESTREO. DIRECTRICES PARA EL DISEÑO DE PROGRAMAS DE MUESTREO, para detalles de la aplicación de técnicas estadísticas en la definición de frecuencia de monitoreo.

El conocimiento de la zona es indispensable para la programación de la campaña de monitoreo; se recomienda obtener información preliminar del área de influencia a partir de una etapa previa al monitoreo. La Figura 6-2 esquematiza los aspectos por tener en cuenta para la planificación de una adecuada recolección de datos en campo.

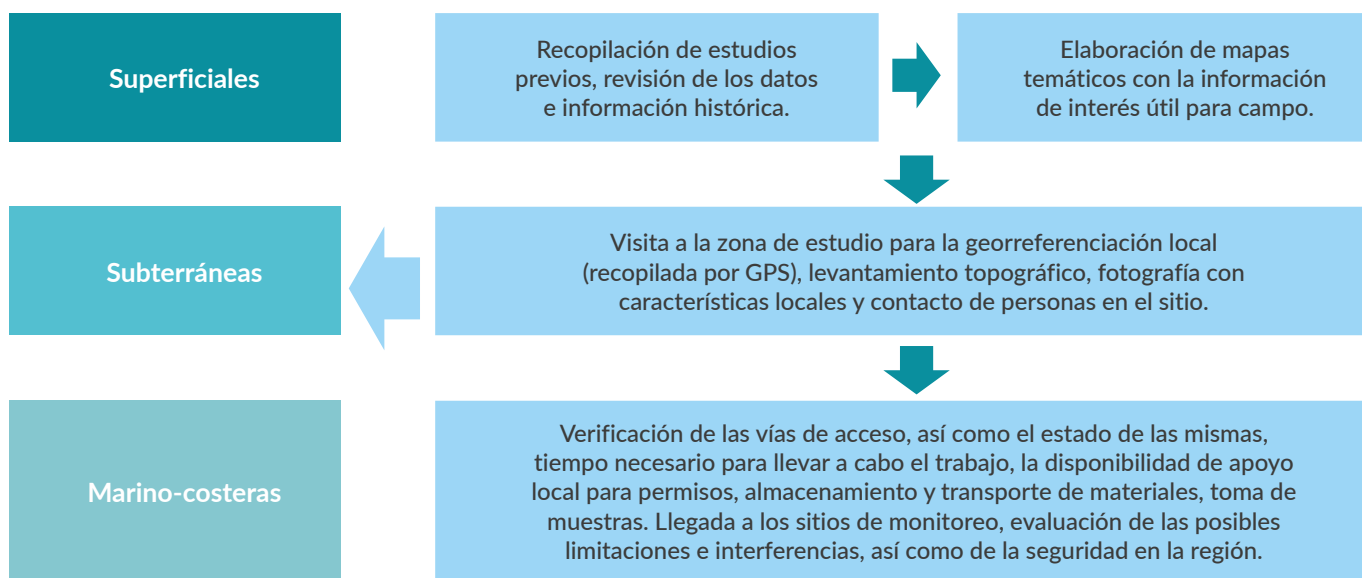


Figura 6-2. Aspectos para tener en cuenta en la planificación de una adecuada recolección de datos en la etapa de campo.

6.2 Recolección de datos

La recolección de los datos inicia con la planificación, la ejecución de la campaña de monitoreo, el uso de las técnicas estandarizadas o normalizadas, procedimientos apropiados y la utilización correcta de materiales y equipos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe contar con los equipos e instrumentos adecuados, formatos de captura de información, personal capacitado y competente. Además, es necesario considerar los tiempos y horarios, acceso a los puntos de monitoreo y la duración de cada muestreo.

El personal debe tener una idea clara del objetivo y papel que cada uno desempeña en el monitoreo para así lograr un trabajo efectivo. De igual manera, debe encontrarse familiarizado con el manejo de los equipos, por lo que es necesario realizar capacitaciones y formación continua. En campo, el personal encargado del monitoreo debe disponer de todos los elementos de seguridad necesarios para este tipo de campañas, por ejemplo, línea de vida en la corriente cuando se realiza aforo por vadeo; certificado de alturas cuando se realiza aforo en suspensión y los elementos de seguridad respectivos como cascos, guantes, tapabocas y chaleco salvavidas.

Una vez se lleve a cabo el trabajo de campo, el personal debe realizar una revisión de la información recolectada en los formatos y enviar las muestras al laboratorio cuando sea necesario.

Tener en cuenta que, al momento de realizar cualquier medición, se debe efectuar con el debido cuidado para evitar mínimos errores en com-

paración con la incertidumbre que siempre van a presentar los instrumentos.




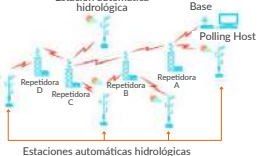
6.3 Transmisión de datos

La información transmitida por los diferentes medios debe estar, en un futuro, centralizada en una nube de información capaz de entender los diferentes lenguajes de transmisión, de modo que exista un repositorio único donde los entes de las diferentes escalas (nacional, regional y local) puedan hacer uso de esos datos y realizar análisis detallados o generalizados de acuerdo con la necesidad de información. Por lo anterior se requiere la definición de protocolos y procedimientos de telecomunicación de datos hidrometeorológicos, con el fin de facilitar la integración de las diferentes redes de alertas a nivel nacional o las labores de interconexión entre entidades regionales o locales que tengan puntos comunes de monitoreo. La Tabla 6-1 muestra diferentes medios de transmisión de datos, especificando los componentes básicos para transmisión, ventajas y desventajas.



Campaña monitoreo Cesar, afluente río Tucuy - ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM

Tabla 6-1. Medios de transmisión de datos.

GOES	VSAT	Móvil (GPRS)	Radio-Local
			
Componentes básicos para transmisión			
<ul style="list-style-type: none"> • Estación de monitoreo. • Satélite GOES. • Sistema de recepción de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estación de monitoreo. • Satélite VSAT. • Sistema de recepción de datos del proveedor. • Sistema de recepción de datos del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo móvil para el envío de datos. • Antenas para la red móvil. • Gateway para salida a internet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estación de monitoreo. • Antenas repetidoras. • Sistema de recepción de datos del usuario.
Ventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • El servicio es brindado por NOAA. • NOAA no tiene un costo. • Cobertura total en el territorio nacional. • Satélite geoestacionario exclusivo para fines hidrometeorológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los equipos de transmisión son arrendados y operados por el proveedor. • Cobertura en el territorio nacional. • Las estructuras civiles para la instalación de los equipos de transmisión son realizadas por el proveedor. • La comunicación es en doble sentido. 	<ul style="list-style-type: none"> • La comunicación es en doble sentido. • La tarificación de la telefonía móvil es por la cantidad de datos transmitidos. • A futuro se transmitirá video a través de este medio. • Está diseñado para visualizar los datos a través de la red de Internet. • Se pueden visualizar los datos en dispositivos móviles tales como celulares, tablets o iPad. • Múltiples medios de recepción del dato. • Transmisión de datos con una frecuencia menor a la horaria. 	<ul style="list-style-type: none"> • La transferencia de datos no tiene costo. • La comunicación es en doble sentido. • No depende de terceros en ninguna de sus etapas.
Desventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • La asignación de códigos para la autorización de las transmisiones depende directamente de NOAA. • Se deben solicitar los códigos a NOAA antes de adquirir el sistema. • Los tiempos de transmisión son horarios. • Se desconoce si la NOAA en algún momento comenzará a facturar el servicio de transmisión de datos. • Se debe contar con un sistema receptor de datos. • La comunicación es en un solo sentido. • Único medio receptor de dato. 	<ul style="list-style-type: none"> • Antenas parabólicas grandes y vistosas, sensibles a hurtos y vandalismo. • El receptor de datos es propiedad del proveedor. • Se debe instalar un nuevo sistema de telecomunicaciones entre el proveedor y el usuario. • Único medio receptor del dato. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los enlaces de comunicación se hacen a través de los operadores de telefonía móvil locales. • La cobertura no está garantizada en todo el territorio nacional. • La red puede colapsar ante un fenómeno natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • La cobertura es local. • Limitada en la cantidad de estaciones. • Red susceptible a interferencia. • La red puede colapsar ante un fenómeno natural. • Se debe pagar el uso del espectro electromagnético anualmente. • Es una red obsoleta debido al avance de la telefonía móvil.

6.4 Administración de los datos

De manera general, para permitir el paso de la información y su utilización efectiva, se consideran las etapas de tratamiento, control, validación, difusión y publicación de los datos. Este procesamiento incluye el paso de datos manuales a archivos digitales y comprobaciones de coherencia con exclusión de todo el procesamiento estadístico. Antes de que los datos puedan ser usados y pese a que se encuentren en un formato adecuado, es importante comprobar su fiabilidad y exactitud. El control permite validar los datos antes de su organización en una base para que estén disponibles con fines operacionales.

Los datos en bruto, tanto en forma de formularios de campo como de gráficas o informes, deben estar disponibles después del tratamiento. Algunos errores de transcripción y procedimiento pueden no ser evidentes hasta que los examinen los usuarios. También puede ser necesario comprobar las transcripciones de datos originales o reevaluar la interpretación de una procedencia dudosa efectuada por el operario (OMM, 2011).

La incertidumbre vinculada a la exposición de cualquier instrumento genera los llamados *errores*

sistemáticos. Estos errores se pueden corregir dependiendo de las aplicaciones de la información. Antes de hacer cualquier corrección es conveniente archivar los datos originales y hacerles mención como *medidos* o *corregidos*. Según el contexto, las correcciones que se realicen dependen, por lo general, de las relaciones entre los componentes de error y los factores externos.

6.5 Uso de la información

La compilación de datos hidrológicos, bien sean mediciones de precipitación, registros de nivel de agua, mediciones de caudal, datos de observación de aguas subterráneas o de muestreo de la calidad del agua, culmina en una serie de datos que proporcionan información útil para la toma de decisiones, las cuales se pueden adoptar directamente a partir de mediciones de datos en bruto, estadísticas derivadas o resultados de distintas etapas de modelización de datos elaborados; los datos obtenidos serán el fundamento de todas las decisiones (OMM, 2011).

Finalmente, la publicación, ya sea en sistemas de información hidrológica, boletines (diarios, mensuales, anuales), estudios, informes, investigaciones, entre otros, es la forma de transmitir y divulgar la información requerida para la toma de decisiones.



Caño Platanal - Cesar, ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM



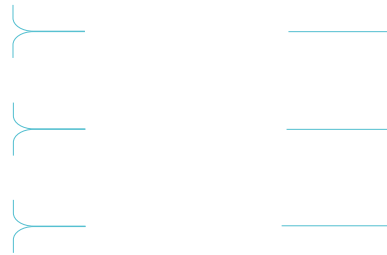
Jardín Botánico Los Balsos-Jericó
📍 Jenny Marín

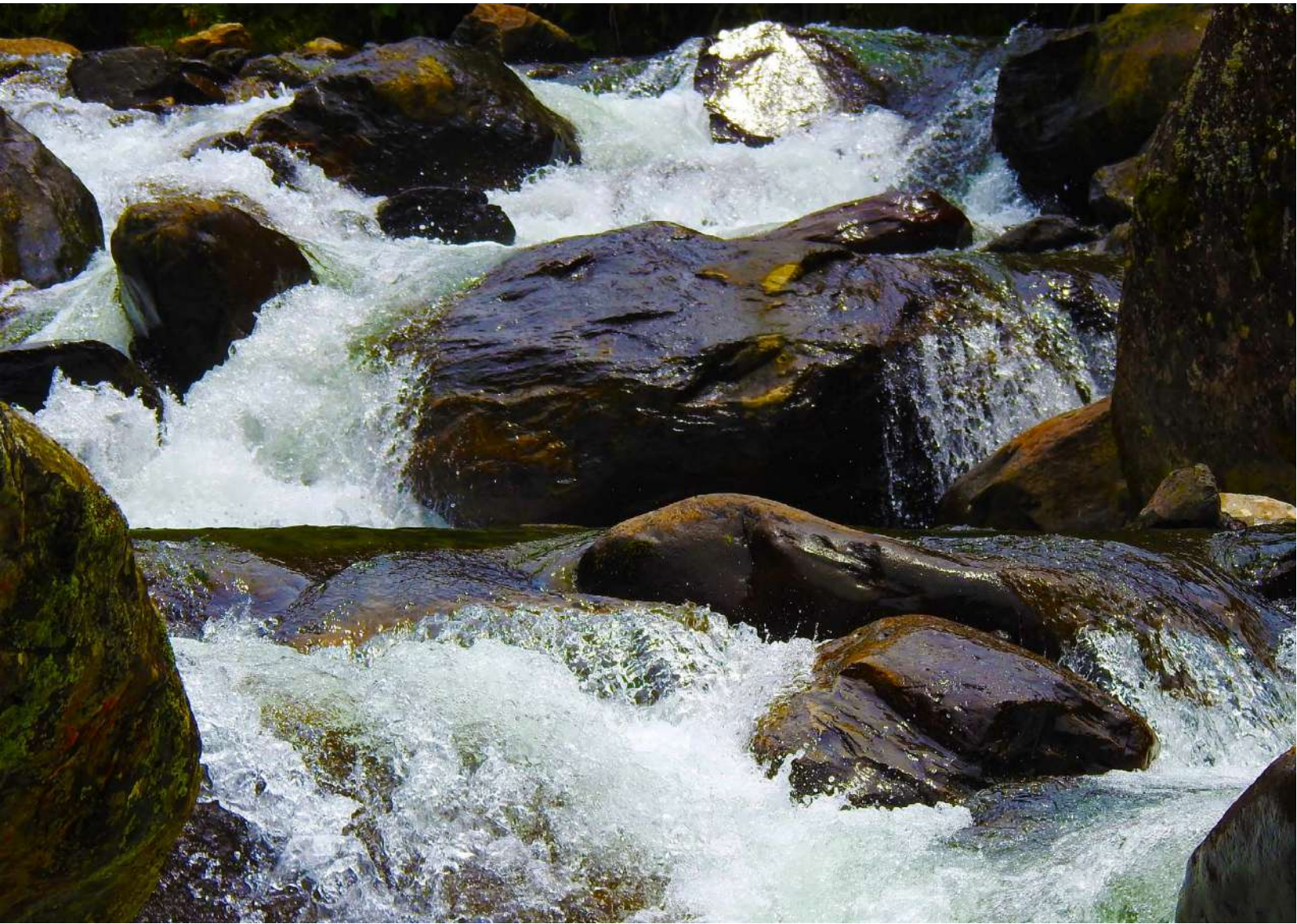


Ciénaga Matapalma, Cesar-ANLA
■ Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM



Técnicas y procedimientos





Río Pensilvania
■ Edgar Garzón

En esta sección se describen las técnicas por utilizar en el plan de monitoreo y se orienta sobre aspectos tales como: selección de puntos, parámetros básicos, frecuencia, tipos de medición y/o métodos de recolección, materiales y equipos requeridos y los procedimientos recomendados para los diferentes tipos de monitoreo. Estas técnicas

y procedimientos se extienden a las variables correspondientes a las diferentes manifestaciones del ciclo hidrológico que comprenden aguas meteóricas (precipitación, evaporación, evapotranspiración), superficiales (cantidad, calidad, sedimentos), subterráneas (cantidad, calidad), monitoreo isotópico y marino-costero.

7. Monitoreo de agua meteórica

Desde el punto de vista del ciclo del agua, la precipitación y la evapotranspiración constituyen variables atmosféricas que determinan los volúmenes de escorrentía e infiltración en el balance hídrico. Mientras que la precipitación es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta, la evapotranspiración se encarga de devolverla a la atmósfera para que, por medio de la condensación en las nubes, vuelva a la superficie en forma de precipitación líquida o sólida.

No es posible entender plenamente estas variables sin datos veraces observados en el terreno. Es por esto que, realizar mediciones de la precipitación y la evapotranspiración, constituye un proceso de vital importancia para cualquier evaluación hidrológica, ya que suministran datos precisos y en tiempo real que pueden ser trabajados para calibración de modelos numéricos de predicción, evaluación de amenazas y apoyo en alertas, estudios agrícolas (por ejemplo, en lo que respecta al diseño y explotación de embalses,

redes de riego y drenajes) y en corrección de sesgos en la estimación de información dada por radares y satélites.

7.1 Precipitación

Se denomina precipitación a la cantidad de agua líquida o sólida que llega a la superficie terrestre procedente de las nubes, como parte del ciclo hidrológico, a través de procesos termodinámicos del aire y la circulación general de la atmósfera. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la escarcha y la precipitación de la niebla; se mide en profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (masa/área) para la precipitación líquida, mientras que las mediciones de nieve se realizan en unidades de centímetros y decímetros.

El ciclo se inicia con la evaporación del agua en los océanos y la transpiración de las plantas. El vapor de agua contenido en la atmósfera se condensa por procesos de enfriamiento y expansión adiabática del aire caliente ascendente. En el trópico se conocen como procesos 'convectivos' que originan la formación de las nubes. Estos a su vez se trasladan al continente por dinámicas asociadas a la rotación de la tierra; cuando las gotas han adquirido su tamaño y peso adecuado para que por acción de la gravedad caigan a la superficie del suelo, su contenido de agua se precipita. Luego, a través de la escorrentía y la infiltración, llegan nuevamente al océano cerrando el ciclo (IDEAM, 2006).

En Colombia, dada su gran variedad estacional, el comportamiento de la precipitación es dinámico. El régimen de lluvias puede ser bimodal o 'monomodal', el cual está determinado por las variaciones espaciotemporales de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCI o ZCIT), por la influencia de los sistemas de circulación general de la atmósfera de la zona tropical y subtropical y por la interacción de estos

factores con las características fisiográficas del país (IDEAM, 2013a).

Cuando la ZCIT se localiza al sur de Colombia, sobre el trapecio amazónico (diciembre-marzo), se presenta allí la temporada lluviosa; mientras tanto, en el norte o región Caribe, predomina la época seca. Por el contrario, cuando la ZCIT se localiza al norte del país (junio-agosto), la región Caribe presenta la temporada lluviosa y el sur del país condiciones secas. Para el caso de la región central o Andina, sus características predominantes de precipitación durante todo el año permiten evidenciar su comportamiento bimodal con dos marcadas temporadas húmedas y dos temporadas secas al año que coinciden con el desplazamiento anual del ecuador climático.

7.1.1 Selección de puntos

Es importante escoger cuidadosamente el emplazamiento, la forma y la exposición del equipo de medición de la precipitación, ya sea un pluviómetro o un pluviógrafo. Además, deben tomarse medidas para impedir las pérdidas por evaporación, el flujo del aire y las salpicaduras (OMM, 2011).

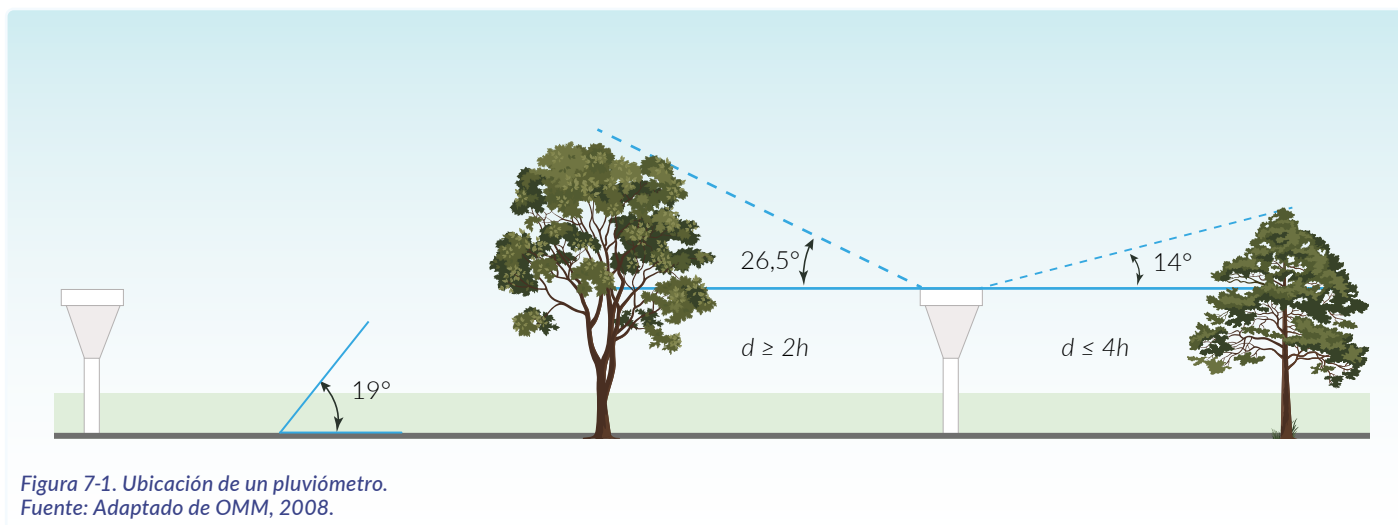
Los efectos del viento son un factor por considerar para la selección del emplazamiento, ya que estos pueden incidir sobre el propio instrumento, ocasionando reducción en la cantidad de agua recogida, o afectando su trayectoria como consecuencia del sitio de instalación, lo cual puede generar valores por exceso o déficit en la precipitación medida.

Para evitar cualquier perturbación creada por la ubicación del equipo de medición, se debe considerar la relación entre sus dimensiones lineales y la velocidad de caída de la precipitación, lo cual se logra seleccionando un punto donde la velocidad del viento al nivel de la embocadura del instrumento sea

lo más pequeña posible, sin que exista un obstáculo que pueda retener la lluvia, y/o modificando los alrededores del pluviómetro de modo que la corriente de aire en el orificio sea horizontal (OMM, 2011). El instrumento debe estar ubicado en un terreno plano, horizontal y rodeado de espacios abiertos con una pendiente inferior a $1/3$ (19°) tal y como se esquematiza en la (Figura 7-1), (OMM, 2008).

En los alrededores del instrumento no debe haber barreras como árboles o arbustos; en caso

de que existan, la altura de estos debe ser de por lo menos la mitad de la distancia entre la barrera y el instrumento y no podrá exceder su distancia total (OMM, 2011). De acuerdo con la *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos* (OMM, 2008), la cima de los obstáculos debe formar un ángulo de 14° y 26.5° con la altura del instrumento y tener una distancia equivalente entre 2 y 4 veces su altura (Figura 7-1).



Otra posibilidad de ubicación, es seleccionar un lugar donde se proteja al instrumento del viento, o también suprimir todos los obstáculos situados a una distancia igual a cuatro veces su respectiva altura (OMM, 2011).

Cuando se defina una protección adecuada contra los efectos del viento, el emplazamiento final de los instrumentos debe considerar que el terreno circundante esté cubierto de césped, grava o ripio para evitar cualquier tipo de salpicaduras, las cuales

pueden ser evidentes al fijar su ubicación en superficies como cemento.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011), el orificio del pluviómetro debe hallarse lo más bajo posible con relación al suelo (dado que la velocidad del viento aumenta con la altura), pero lo suficientemente elevado para evitar que el agua que cae salpique el pluviómetro.

En zonas inundables, se debe considerar un punto de referencia con una suave elevación y a una distan-

cia prudente de las zonas cubiertas por las crecidas de los ríos.

Si el objetivo es medir la acumulación de agua sólida precipitada en forma de nieve o escarcha, el número de puntos de medición en la zona de acumulación está relacionado con la variabilidad observada en el espacio vertical-horizontal y la accesibilidad de la zona (Francou & Pouyaud, 2004). El colector debe ir situado a un nivel superior a la altura máxima de la capa de nieve permisible. Se puede considerar que esté instalado en una torre o montado en un tubo de acero.

Como consideraciones adicionales se tienen las siguientes:

- El punto debe ser accesible, con rutas para que el observador realice las mediciones en los tiempos estipulados.
- El observador debe estar disponible y cercano al punto de medición y debe ser alfabeto.
- Debe existir disponibilidad de potencial de electricidad en el caso de usar equipos automáticos.

7.1.2 Frecuencia

Según la Organización Meteorológica Mundial (2008), los períodos comunes de observación son cada hora, cada tres horas y a diario para fines sinópticos, climatológicos e hidrológicos. Si se requieren mediciones de intensidades de lluvia muy elevadas en períodos cortos, pueden hacerse en lapsos mayores, o si se aplica el uso de pluviómetros totalizadores, las medidas pueden tomarse en intervalos de semanas o hasta meses.

Se recomienda que la lectura del pluviómetro sea diaria, con horas establecidas como las 07:00 Hora Local Colombiana (HLC); el día pluviométrico se cuenta desde las 07:00 a. m. del primer día hasta las 07:00 a. m. del día siguiente (IDEAM, 2006).

Para el caso de pluviógrafos, las gráficas donde se representa el pluviograma deben ser actualizadas diariamente a las 07:00 horas de la mañana. Sin embargo, una gráfica puede usarse para varios días, siempre que se hayan presentado lluvias. También hay pluviógrafos semanales y mensuales con operación similar al diario. Para el caso de muestreos automáticos, se registra la cantidad de lluvia diaria acumulada, tomando como parámetro de corte las 07:00 a. m., con el fin de que coincidan con las mediciones manuales.

7.1.3 Tipos de medición y/o métodos de recolección

Existen métodos de medición directa como lo son los pluviómetros y los pluviógrafos, los cuales son los instrumentos más frecuentemente utilizados para medir la precipitación. Su uso en mediciones de la lluvia en determinado punto solo es representativo en una zona limitada, cuyo tamaño depende de la extensión del período de acumulación, homogeneidad fisiográfica de la región, topografía local y de los procesos que intervienen en la producción de la precipitación, bien sea en forma de lluvia, llovizna, chubasco, tormenta o nieve (OMM, 2008).

En la práctica, es común el uso de pluviómetros o pluviógrafos en donde se requiera de un observador que realice las mediciones o manipule los equipos con cierta frecuencia, sin embargo, actualmente las mediciones automáticas están adquiriendo fuerza, ya que estas son más exactas y rápidas en comparación con las lecturas manuales.

Otros métodos de medición consisten en la utilización de radares y satélites meteorológicos, los cuales funcionan integralmente con los medidores automáticos, proporcionando estimaciones zonales más precisas

de la precipitación a nivel operativo para una amplia gama de usuarios (OMM, 2008).

Los satélites meteorológicos existentes son de tipo polar-orbital o geoestacionario. Los primeros pasan por los polos normalmente dos veces por día a alturas del orden de 1000 km. Los segundos tienen una órbita más alta de alrededor de 36000 km, tal que su traslación es sincrónica con la rotación de la tierra alrededor de su eje (son estacionarios respecto a un punto fijo en la superficie). Esto permite la producción frecuente de imágenes (comúnmente cada media hora, o menos aún, hasta cada cinco minutos), lo que es ideal para observar, por ejemplo, rápidos desarrollos de patrones de tormenta (Diez, 2012). Se encuentran el sistema GOES (*Geostationary and Operational Environmental Satellite*) de EE. UU. (*West, East e Indian Ocean*), GMS (*Geostationary Meteorological Satellites*) de Japón y Meteosat de la ESA (*European Space Agency*), que proveen una visión casi continua del tiempo meteorológico global.

7.1.4 Equipos

Para la medición de la lluvia se utilizan instrumentos como el pluviómetro y el pluviógrafo.

7.1.4.1 Pluviómetro

Un pluviómetro mide la cantidad de precipitaciones, tanto de lluvia como de nieve, que han caído en

un determinado lugar y durante un período específico de tiempo; se expresa por la altura de la lámina de agua en milímetros (mm), los cuales son equivalentes a litros por metro cuadrado.

Existen varios tipos de pluviómetros que emplean variedad de tecnologías, aunque los más comunes son el pluviómetro estándar, pluviómetro totalizador, pluviómetro con tubo de descarga o pluviómetro de báscula y los pluviómetros automatizados. La elección de algún tipo en específico depende de las necesidades del estudio y del presupuesto; sin embargo, es esencial que los métodos de recolección de información permitan obtener datos precisos, confiables y oportunos.

El **pluviómetro estándar**, es el más común y de construcción más simple. Se encuentran varios tipos en el mercado, lo único que los diferencia es la capacidad de recolección, diseño y material de fabricación. Este tipo de instrumentos están conformados por un recipiente cilíndrico de varias capacidades cuyo extremo superior tiene una superficie de diferentes áreas.

Los pluviómetros más sencillos están contruidos en plástico (Figura 7-2), con formato cónico y son de uso doméstico; tienen capacidades entre 40 y 70 mm, normalmente se ubican clavados en el suelo, en una estaca o en un tiesto.



Humedal El Cisne PNN Los Nevados.
Nelsy Verdugo



Figura 7-2. Pluviómetro de plástico.
Fuente: (Raig, 2019).

El **pluviómetro totalizador**, se utiliza para medir la precipitación estacional total en áreas apartadas o escasamente habitadas. Consiste en un colector situado encima de un embudo que desemboca en un recipiente bastante amplio para captar las lluvias estacionales (OMM, 2011).

Los pluviómetros de mayor capacidad son aquellos que tienen una forma cilíndrica y constan de una parte

superior recolectora, un embudo y una parte inferior o depósito con una capacidad de 100 y 220 mm. Están contruidos en metal, bien sea acero inoxidable, aluminio o zinc. En este tipo de instrumentos, el agua ingresa a través de un embudo hacia un colector de agua. Si las precipitaciones superan la capacidad del colector, el agua se derrama y cae en el cilindro que rodea el tubo de medición (Figura 7-3), (Raig, 2019).



Figura 7-3. Elementos de un pluviómetro: A, B: Embudo colector. C: Cilindro interior o depósito. D: Cilindro exterior.

Según la OMM (2011), los pluviómetros deben contar con:

- Un borde en forma de arista para el colector, el cual debe descender verticalmente hacia la parte inferior y debe estar biselado en el exterior.
- Un área de abertura, la cual debe conocerse con una precisión del 0.5 % y debe permanecer fija.
- Un diseño que impida las salpicaduras dentro y fuera. Para ello, la pared vertical debe ser suficientemente

profunda y la inclinación del embudo adecuadamente pronunciada (mínimo 45°), (Figura 7-4).

- Un cuello del recipiente estrecho y protegido contra la radiación solar para minimizar las pérdidas de agua por evaporación. Se puede utilizar una capa fina de aceite (8 mm de espesor) dentro del pluviómetro para evitar la evaporación y siempre tener en cuenta la cantidad colocada en el receptor.

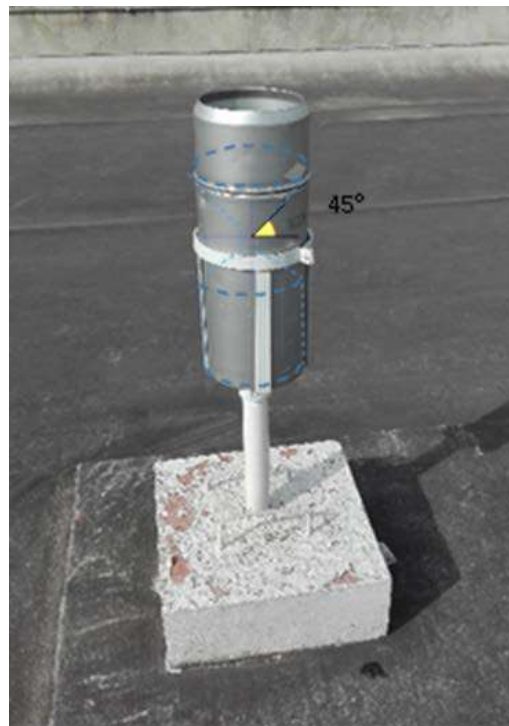


Figura 7-4. Pluviómetro estación sede IDEAM-Bogotá.

Para mediciones de nieve se utiliza un pluviómetro totalizador que acumula la precipitación generalmente en un período de un año. Se recomienda que este tenga una altura compatible con el máximo de precipitación del año hidrológico; sin embargo,

lo más común es que sea un tanque de 1.50 m, con una superficie de captación de 2000 cm^3 (Ceballos, 2015). La Figura 7-5 permite evidenciar un pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy-Ritacuba.



Figura 7-5. Pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy-Ritacuba Blanco.

Se recomienda verter en el recipiente colector, una solución anticongelante-aislante oleaginosa para que derrita la nieve que cae en el instrumento, la cual puede ser una mezcla al 37.5 % de cloruro de calcio

comercial (78 % de pureza) y 62.5 % de agua por unidad de peso, o también una solución de etilenglicol. Su volumen no debe ser superior a un tercio de la capacidad total del colector (Figura 7-6), (OMM, 2011).



Figura 7-6. Vertimiento de la solución anticongelante dentro del pluviómetro totalizador de nieve del IDEAM ubicado en el Nevado del Cocuy.

También se pueden emplear **pluviómetros digitales** que miden al mismo tiempo la precipitación total y su intensidad. Estos instrumentos efectúan, almacenan y transmiten las observaciones, ya sea, de forma alámbrica a una pantalla o un dispositivo externo o de forma inalámbrica a una central receptora.

Entre los pluviómetros digitales se encuentran los *electrónicos* de peso y de balancín. El **pluviómetro de balancín** consta de un embudo con las mismas características y medidas de un pluviómetro convencional, pero cuyo embudo conduce el agua a un pequeño columpio cuyos platos son cubetas triangulares de plástico o metal (Figura 7-7). Al caer la lluvia, los balancines se acti-

van al entrar el agua a través del embudo, lo cual genera un volcamiento de estos; cuando el agua se derrama, se cierra un circuito eléctrico y queda listo el plato opuesto para repetir el mismo proceso. Esta alternancia es registrada mediante un contador que transmite la información como señal y queda almacenado en el sistema central; cada balanceo equivale a un registro de precipitación, normalmente de 0.2 mm, expresada en mm/h. Estos instrumentos se vacían automáticamente por la parte inferior, haciendo que la lluvia no se acumule (Raig, 2019). El pluviómetro está fabricado en plástico de alto impacto con protección UV para proporcionar fiabilidad (Figura 7-8).



Figura 7-7. Pluviómetro de balancín.
Fuente: (López, 2019).

En algunos casos, este tipo de pluviómetro va acompañado de un circuito eléctrico que se dispara cuando la temperatura del aire es inferior a los 4°C; en caso de caer nieve, esta se transforma rápidamente en lluvia y el dispositivo realiza satisfactoriamente su

función. Sin embargo, este modelo no es muy recomendado para precipitaciones torrenciales, ya que cuando la cantidad de lluvia es muy grande, el pluviómetro no opera correctamente y muestra lecturas erróneas (López, 2019).



Figura 7-8. Pluviómetro de balancín utilizado en algunas estaciones del IDEAM.

El **pluviómetro de pesada**, registra de manera continua la precipitación acumulada, mediante un

mecanismo de resorte o un sistema de balanzas que mide el peso del recipiente (Figura 7-9, Figura 7-10).



Figura 7-9. Pluviómetro de peso marca MPS Systems.



Figura 7-10. Pluviómetro de peso ubicado en la Sierra Nevada El Cocuy.

El IDEAM cuenta con estos instrumentos instalados en algunas estaciones meteorológicas, que mediante la conexión a un Datalogger (Figura 7-11)

transmiten información de manera telemática. Pueden medir todos los tipos de precipitación, bien sea líquida, sólida o mixta.



Figura 7-11. Datalogger en estación automática del IDEAM.

Un ejemplo de cómo la información es transmitida vía satélite, es a través del sistema satelital GOES al sistema Hydras (Software de aplicación para hidrometría, meteorología y tecnología de medio ambiente), desde el cual es posible acceder a los

datos de cada sensor en tiempo real en la sede central del IDEAM en Bogotá. La Figura 7-12 muestra algunas Estaciones Meteorológicas Móviles de Altitud (EMMA) del IDEAM, localizadas en zonas de alta montaña en Colombia.



Figura 7-12. Pluviómetro EMMA (Estación Meteorológica Móvil de Altitud). Izquierda: Parque Nacional Natural Los Nevados, Derecha: Sierra Nevada El Cocuy-Ritacuba Blanco.

En caso de que la precipitación caiga en forma de nieve, una gran variedad de estos pluviómetros incorpora calefacción en el sistema, lo cual permite que la nieve se funda al instante y se convierta en agua que luego cae a los balancines.

Es importante que este tipo de equipos reciban mantenimiento con su respectiva calibración para evitar que se deterioren o presenten modificaciones en su ajuste. Se recomienda que un pluviómetro analógico siempre acompañe uno de tipo automático para verificar los datos recolectados (Figura 7-13).



Figura 7-13. Pluviómetro convencional y pluviómetro automático ubicados en la estación meteorológica Las Cintas.

7.1.4.2 Pluviógrafo

El pluviógrafo (Figura 7-14) funciona bajo el mismo principio del pluviómetro, pero a diferencia de este último, permite obtener un registro continuo de las precipitaciones en forma temporal. Del mismo

modo posibilita el conocimiento de la cantidad precipitada, la duración (hora de inicio y fin) y su intensidad (cantidad-tiempo) en determinados períodos, siendo el milímetro (mm) la unidad de medida de la cantidad o profundidad de la lluvia.



Figura 7-14. Pluviógrafo estación climatológica ordinaria Granja San Jorge.

Consiste en un embudo de cuello alto de las mismas dimensiones que el pluviómetro convencional conectado con un mango hasta un sifón. El agua lluvia cae dentro de él, y al tiempo que se llena, asciende un émbolo sostenido por un material flotante muy ligero.

El émbolo está conectado con una plumilla que deja una marca sobre un papel graduado, enrollado sobre un tambor que da una vuelta cada 24 horas o bien, cada semana (Figura 7-15), (López, 2019).

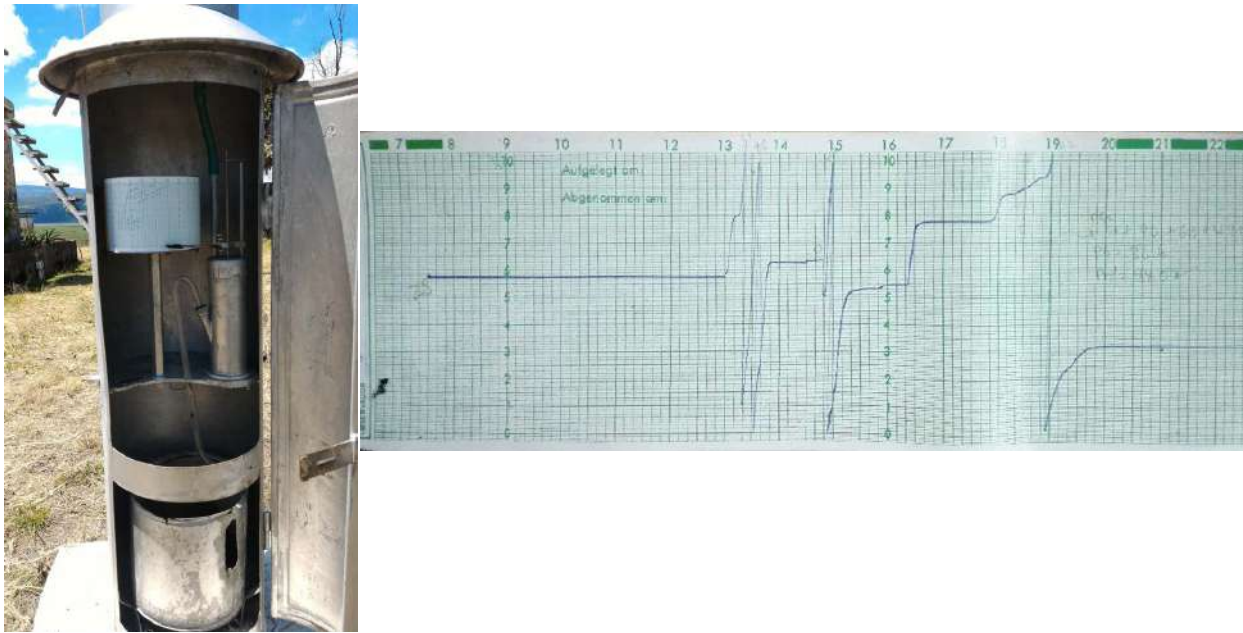


Figura 7-15. Izquierda: Tambor donde se inscribe la altura de la lámina de agua. Derecha: Gráfico de registro continuo de las precipitaciones.

El instrumento dispone de un medio automático (sifón) para desocupar rápidamente el recipiente cada vez que se llene, de tal manera que la pluma pueda invertir su tendencia de ascenso y se coloque en la parte inferior de la gráfica para así repetir el procedimiento cuantas veces sea necesario hasta registrar la lluvia o aguacero (IDEAM, 2006). Para evitar cualquier pérdida por evaporación, es posible utilizar una cantidad suficiente de aceite, que genere una película delgada sobre la superficie del agua.

7.1.5 Procedimientos para la toma de datos-Análisis de datos

Las mediciones de lluvia recogida en un pluviómetro pueden realizarse utilizando ya sea una probeta o

una rejilla para cuantificar la precipitación en milímetros. A continuación, se describen dos instrumentos que permiten la correcta toma de datos (IDEAM, 2006):

7.1.5.1 Probeta

Cilindro de vidrio o plástico transparente, graduado en milímetros y décimas de milímetro, dentro del cual se vierte el contenido de agua recogido en el depósito receptor del pluviómetro. Allí se observa, a la altura del ojo, la cantidad de milímetros que ha alcanzado una determinada precipitación; este valor se anota en el *diario de observaciones meteorológicas* (Anexo 7-1), (Figura 7-16).

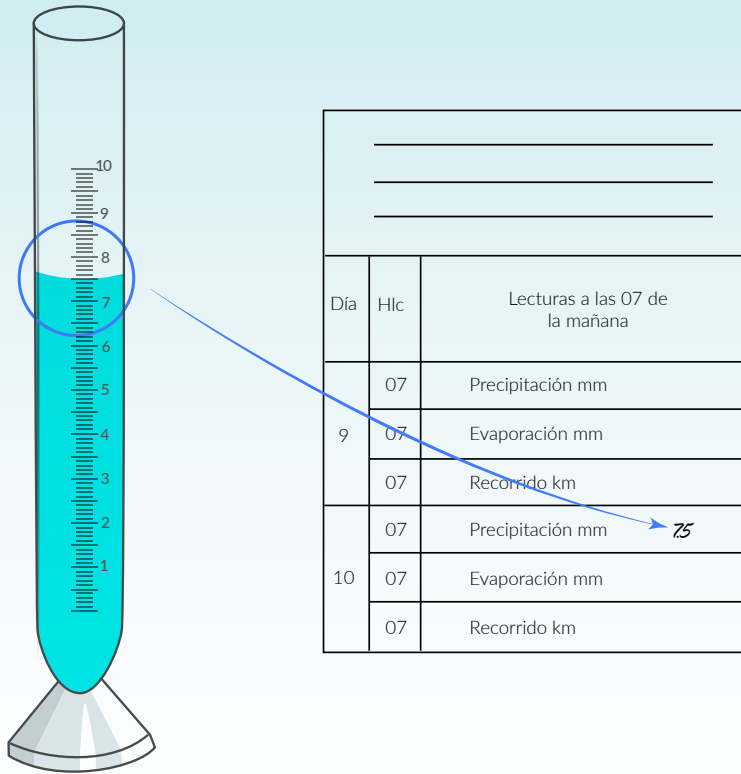


Figura 7-16. Lectura del pluviómetro con la probeta.
Fuente: Adaptado de HIMAT, 1987.

7.1.5.2 Reglilla

Trozo de madera similar a una regla para dibujo, pero con graduaciones en milímetros y décimas de milímetros. La medición se hace directamente en el depósito receptor de acuerdo con las siguientes instrucciones:

1. Se destapa el pluviómetro, quitando el embudo receptor.
2. Se introduce la reglilla verticalmente (sin inclinarla hacia ningún lado) dentro del colector hasta que toque fondo.
3. Se saca la reglilla y se lee hasta donde se note que está mojada. La división más larga corresponde a los milímetros enteros; los decimales se cuentan por

encima de esa división, aproximando a la línea más cercana por debajo y sobre la marca dejada por el agua en la cara graduada de la reglilla. Por ejemplo, si la reglilla estaba mojada, como muestra la Figura 7-17 se leen 12 mm, y este valor se anota en el *diario de observaciones meteorológicas* (Anexo 7-1).

4. Se extrae el colector y se derrama completamente el agua que contenga, con el fin de ponerlo a punto para la siguiente observación.
5. Se coloca el colector nuevamente en su sitio y se tapa el pluviómetro con el embudo receptor.
6. En caso de haber utilizado aceite dentro del colector, deben utilizarse varillas de metal u otro material fácil de limpiar.

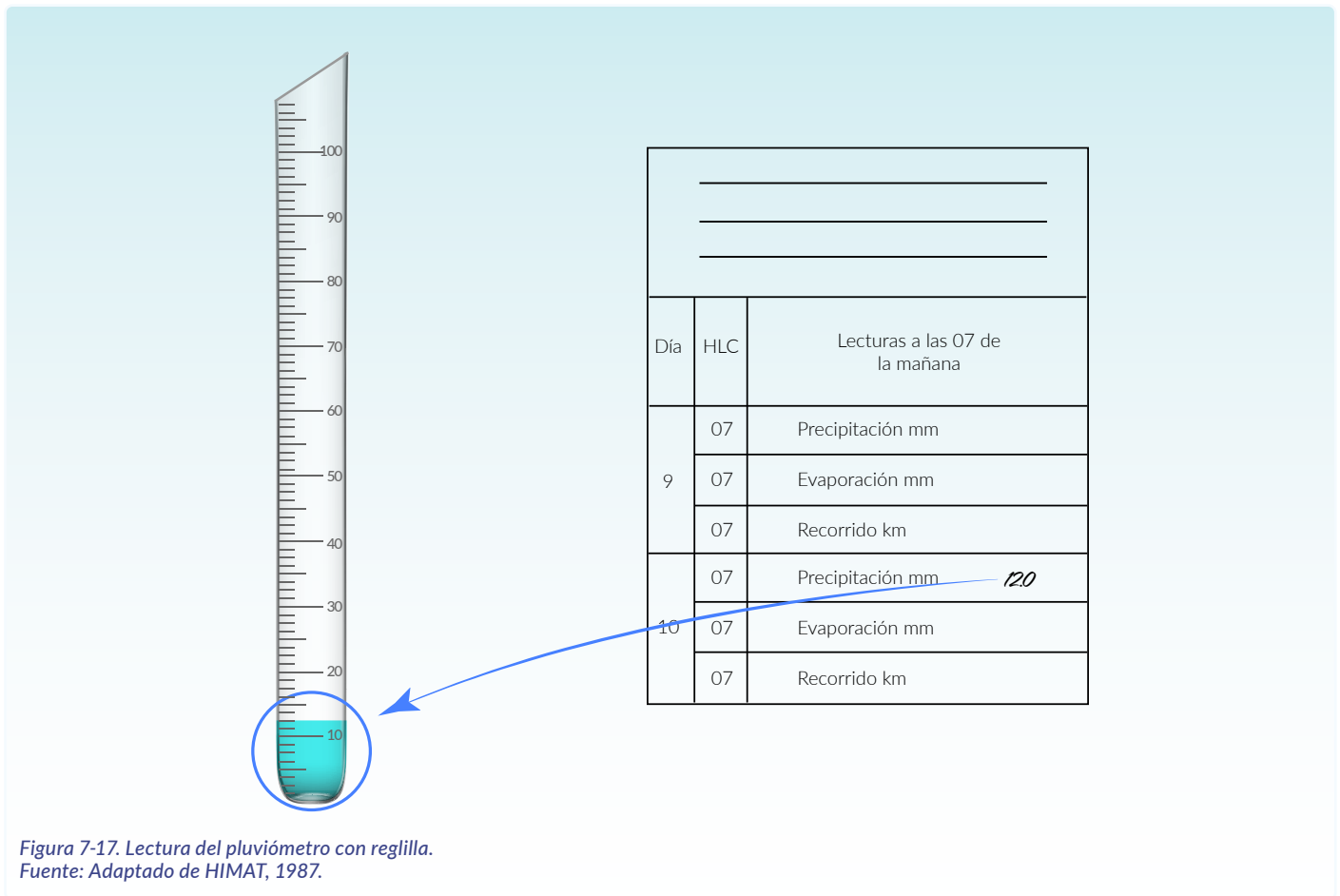


Figura 7-17. Lectura del pluviómetro con reglilla.
Fuente: Adaptado de HIMAT, 1987.

En ocasiones, la lluvia es muy intensa y supera la capacidad del colector, depositándose parte de la lluvia en un recipiente que lo cubre y protege. En este caso, se mide inicialmente el agua del colector, se bota luego su contenido y se procede a verter en la probeta, el agua depositada en el recipiente protector para realizar la medición inmediata. Se suman las dos lecturas para obtener el resultado final, el cual debe ser registrado en un *diario de observaciones meteorológicas* (Anexo 7-1). También es posible medir el volumen captado, pesando el recipiente con su contenido y sustrayendo posteriormente el peso del recipiente vacío (OMM, 2011).

Las observaciones de precipitación se realizan diariamente a las 07:00 de la mañana. La cantidad de lluvia caída en un día (total diario) se cuenta desde las 07:00 de la mañana de ese día hasta las 07:00 de la mañana del día siguiente (HIMAT, 1987).

Para el caso de mediciones con un pluviómetro totalizador, se recomienda utilizar un flexómetro, ya que el uso de este instrumento evita variaciones en el nivel de agua acumulada (Figura 7-18). Si existe una capa de aceite (para evitar la evaporación) o un anticongelante, se debe restar su volumen (Ceballos, 2015).



Figura 7-18. Medición de precipitación con flexómetro en un pluviómetro totalizador ubicado en El Cocuy.

Para minimizar errores y tener una mayor exactitud, las lecturas diarias se deben redondear a los 0.2 mm y, de ser posible, a la décima de milímetro más próxima. Las lecturas semanales o mensuales se aproximan al milímetro más cercano (OMM, 2011). Para las mediciones de nevadas, se debe considerar una resolución de 0.2 cm (OMM, 2008).

Para reducir los errores sistemáticos vinculados a la exposición del instrumento, como lo son el viento, las mojaduras, la evaporación, las ventiscas de nieve y/o las salpicaduras, la OMM (2011) presenta la forma de ajustar los datos, considerando los errores y factores meteorológicos e instrumentales que puedan presentarse.

Es importante anotar que, cuando no ha llovido, es decir, cuando la reglilla se encuentra completamente seca, se debe hacer una raya horizontal en la casilla correspondiente de la libreta. En caso de que

la precipitación no alcance ni un milímetro, se considera muy poca y, por tanto, se reporta que no ha llovido, anotando cero en el espacio respectivo del *diario de observaciones meteorológicas* (Anexo 7-1), (IDEAM, 2006).

Para el caso de pluviógrafos, se aconseja visitar la estación a las 07:00 horas de la mañana y realizar una lectura inicial; posteriormente, con este dato se verifica el funcionamiento del reloj del pluviógrafo. Si se presentan anomalías en tiempo o en registro de nivel, se deben realizar chequeos inmediatos de calibración y poner a punto nuevamente el instrumento. Generalmente esta verificación la deben realizar técnicos especializados en este tipo de equipos.

Es importante que los datos recolectados cuenten con un análisis y manejo estadístico, aplicable a este tipo de datos experimentales.

7.2 Evaporación, transpiración y evapotranspiración

VARIABLES como la evaporación y la transpiración no cuentan con procesos de medición suficientemente representativos que reflejen las condiciones medias de una región determinada. Actualmente, algunos instrumentos pueden medir dichas variables, sin embargo, la mejor forma de evaluarlas es a través de estimaciones con fórmulas empíricas que deben ser validadas para cada región.

En este apartado se presentan algunos métodos de medición directa, además de algunas fórmulas empíricas comúnmente utilizadas para calcular la evapotranspiración; se tratan por separado los conceptos de evaporación y transpiración para así poder englobar el concepto de evapotranspiración.

7.2.1 Evaporación

Es la cantidad de agua que pasa del estado líquido o sólido al estado gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. Se expresa como la altura del agua líquida que vuelve a la atmósfera por unidad de tiempo (OMM, 2011).

Este proceso es controlado por parámetros climatológicos como lo son: temperatura, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad, calidad del agua, profundidad del agua, tipo y naturaleza del suelo y forma de la superficie. También factores como la superficie evaporante del suelo, grado de cobertura y cantidad de agua disponible en la superficie evaporante son considerados en el proceso de la evaporación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2006). Se puede expresar como *evaporación potencial* la máxima cantidad de vapor de agua que puede

ser emitida a la atmósfera desde una superficie de agua (Hurtado, 2000).

7.2.2 Transpiración

Es el proceso físico-biológico por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor. El agua almacenada en el suelo como humedad es captada por las raíces de la planta, recorre su estructura y se evapora a través de unas células foliares denominadas estomas (OMM, 2011). Solo una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (FAO, 2006).

Al igual que la evaporación directa, en la determinación de la transpiración se deben considerar factores como el gradiente de presión de vapor, la temperatura, la radiación solar y el viento (OMM, 2011). El contenido de agua, la capacidad de conducir el agua a las raíces, y la salinidad del suelo junto con el agua de riego, también determinan la tasa de transpiración (FAO, 2006).

Según la FAO (2006), factores como las clases de plantas, características, prácticas y estado de desarrollo del cultivo y el medio donde se produce su manejo, también deben ser considerados al momento de estimar las variables.

7.2.3 Evapotranspiración

Se denomina evapotranspiración a la cantidad de agua evaporada, producto de la combinación de los fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas, cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad (OMM-UNESCO, 1992; OMM, 1992, citado en OMM, 2008).

Se puede definir tanto la *evapotranspiración potencial* como la *evapotranspiración real*. Según (Hurta-

do, 2000), la *evapotranspiración potencial* (ETP) es la cantidad máxima de agua que es capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es limitada la cantidad de agua suministrada por el suelo; la *evapotranspiración real* (ETR) por su parte, se refiere a la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes, incluyendo el tipo de cultivo y su fase de crecimiento y desarrollo.

También se puede considerar el término *evapotranspiración de referencia* (ET_o) que se define como la ETP de un cultivo de referencia (normalmente gramíneas o alfalfa de 8 a 15 cm de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y no se ve sometido a déficit hídrico). Este concepto se ha establecido para reducir las ambigüedades de interpretación a que da lugar el amplio concepto de evapotranspiración y para relacionarla de forma más directa con los requerimientos hídricos de los cultivos (Gómez, 2017).

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo, para hacer referencia a la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, un día, 10 días, un mes o incluso un completo período de cultivo o un año (FAO, 2006).

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evapotranspiración. Según FAO (2006), los parámetros climáticos que afectan el proceso son la radiación (considerando intensidad y duración), la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del

viento. Con respecto a las características del cultivo, es importante considerar el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura, rugosidad y características radiculares del cultivo, el reflejo, y la cobertura del suelo dan lugar a diferentes niveles de evapotranspiración en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

7.2.4 Selección de puntos

A continuación, se presentan las consideraciones generales para el emplazamiento de los equipos para medición de evaporación y evapotranspiración.

7.2.4.1 Evaporación

Para la ubicación de un equipo medidor de la evaporación, se debe considerar un sitio que esté despejado, sin obstáculos (edificios, torres, árboles, etc.) que proyecten sombras sobre el instrumento a una distancia menor de 20 veces su propia altura.

Para evitar afectaciones producidas por el viento, no deben existir obstrucciones. En caso de que haya obstáculos pequeños, tendrán que estar alejados a una distancia que sea al menos igual a cinco veces su altura, y a diez veces su altura si se trata de un grupo de obstáculos (OMM, 2008). El instrumento debe ubicarse en terrenos donde no exista un nivel freático superficial y debe estar nivelado para facilitar la infiltración y la escorrentía natural con una ligera pendiente de hasta 0.5 % para evitar encharcamientos. En zonas inundables, se instala de preferencia en una suave elevación y a una distancia prudente de las zonas cubiertas por las crecidas.

Fuera de los requisitos anteriores, deben tenerse en cuenta los siguientes:

- La instalación no debe hacerse en la proximidad de estanques o pantanos ni en áreas de irrigación o inundación.
- Para la instalación en cercanías de embalses, se escogen aquellos lugares de circulación de vientos predominantes y especialmente fuertes.
- Además, el sitio debe estar a una distancia tal que no permita la caída de agua al tanque de evaporación, procedente de los vertederos o transportada desde lagunas, embalses o cuerpos de agua por acción del viento.

Como consideraciones adicionales:

- El punto debe ser accesible, con rutas para que el observador realice las mediciones en los tiempos estipulados.
- El observador debe estar disponible y cercano al punto de medición y debe ser alfabeto.
- Debe existir un suministro de agua en caso de que se use un tanque de evaporación.

7.2.4.2 Evapotranspiración

Según la OMM (2011), las condiciones generales para seleccionar el emplazamiento de las estaciones evaporimétricas son las siguientes:

a. El sitio seleccionado debe ser representativo de la zona circundante en lo referente al riego, características del suelo (estructura y composición), pendiente y cubierta vegetal.

b. La estación evaporimétrica debe situarse más allá de la zona de influencia de edificios y árboles aislados. No debe ubicarse a menos de 100 m o 150 m de los límites del terreno, ni a más de tres o cuatro kilómetros de la estación meteorológica. El lugar elegido para extraer bloques de tierra para la inclusión de evaporímetros y lisímetros debe encontrarse dentro

de un radio de 50 m de la parcela de evaporación; la tierra y cubierta vegetal del bloque debe corresponder a la tierra y cubierta vegetal de la parcela.

7.2.5 Frecuencia

Cuando se hacen mediciones manuales de la evaporación, estas deben hacerse una vez cada 24 horas y siempre a la misma hora del día. En el caso de muestreo automático, se registra tomando como parámetro de corte las 07:00 a. m., o una hora que coincida con las mediciones manuales.

7.2.6 Equipos y métodos de medida-Métodos de estimación

Existen métodos de medición directa que permiten obtener datos exactos de la evaporación y la evapotranspiración para pequeñas masas de agua y de suelo como son los tanques de evaporación, evaporímetros y lisímetros; el uso de estos dos últimos, permite una medida directa de la evapotranspiración en superficies de terreno diferentes y la evaporación del suelo entre espacios cultivados. Estos instrumentos han demostrado ser suficientemente sencillos y exactos siempre que se satisfagan todos los requisitos concernientes a su instalación y a las técnicas de observación. La transpiración de la vegetación se estima como la diferencia entre los valores de evapotranspiración y evaporación del terreno medidos al mismo tiempo (OMM, 2011).

A pesar de sus ventajas en cuanto a precisión, estos métodos no son realmente exactos debido a las fuentes de error y a las limitaciones propias de cada método, por tanto, también pueden considerarse estimaciones a través de los *métodos indirectos*. Si el propósito son cálculos en grandes extensiones de

territorio, es necesario realizar estimaciones a partir de métodos indirectos que arrojan resultados aceptables.

Estos métodos se tratan, por lo general, de simplificaciones de algunos métodos directos ya señalados, que a través de correlaciones y mediciones de una o más variables climáticas o meteorológicas, permiten derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporante de un ambiente determinado (Sánchez M., 2001). Incluyen el balance hídrico y energético, métodos de tipo aerodinámico o combinaciones de ambos, los cuales incorporan variables meteorológicas como lo son la radiación solar y de onda larga, la

temperatura superficial del aire y del agua, la humedad atmosférica o la presión de vapor y el viento.

Entre los métodos directos se encuentran:

7.2.6.1 Tanque de evaporación

Mide la cantidad de agua convertida en vapor que una masa líquida al aire libre pierde a través de su superficie durante un cierto período de tiempo.

Consiste en un recipiente circular (tamaño estandarizado de diámetro 1.20 m y altura 0.25 m), construido en hierro galvanizado, fibra de vidrio, zinc o cobre, colocado sobre una tarima de madera que tenga aberturas para una buena ventilación (Figura 7-19).



Figura 7-19. Tanque evaporímetro clase "A" con gancho graduado y tanque tranquilizador.
Fuente: (Agromatic S.A., 2019).

Puede estar instalado por encima o insertado en el terreno; también puede ubicarse en plataformas flotantes ancladas, en la superficie de lagos u otras masas de agua. Cuenta con un tornillo micrométrico o gancho graduado y un cilindro de reposo (vaso tranquilizador) para la medición de agua en el tanque (HIMAT, 1987).

Es recomendable que el tanque cuente con un anemómetro o anemógrafo integrado y un pluviómetro

no registrador, los cuales deben ser instalados cerca al mismo (situados a uno o dos metros por encima del tanque), además de termómetros de extremas que proporcionen las temperaturas máxima, mínima y media del agua en el tanque (Figura 7-20), considerando que variables como el viento, la temperatura, la humedad entre otros, influyen en la evaporación (OMM, 2011).



Figura 7-20. Detalle de un tanque de evaporación.
Fuente: (Hong Kong Observatory, 2019).

Si las condiciones climáticas y del terreno no permiten mantener una capa de cobertura vegetal, debe hacerse lo posible para que la superficie del suelo se

asemeje a la natural y a sus alrededores. No debe colocarse el instrumento sobre una losa o pedestal de concreto, ni sobre asfalto ni capas de grava (OMM, 2011).

Si es necesario, debe protegerse de animales con una pantalla de tela metálica colocada encima del recipiente, o con el uso de repelentes químicos que no contaminen el agua del tanque de evaporación. La ubicación de estas pantallas puede influenciar el régimen del viento y las características térmicas del tanque, por lo tanto, se deben comparar las mediciones del tanque protegido con los registros de un tanque descubierto en la estación más próxima (OMM, 2011).

Actualmente, el IDEAM utiliza un tanque de evaporación dotado de un sensor colocado sobre un cilindro tranquilizador para medir la altura de la capa superficial del agua en el tanque y obtener la cantidad de agua evaporada en diferentes lecturas, lo cual facilita la detección de variaciones de altura de décimas de milímetro. La información es enviada a un Datalogger que transmite la información a una base de datos (Figura 7-21).



Figura 7-21. Izquierda: Tanque de evaporación automático. Derecha: Gabinete donde se ubica el Datalogger utilizado por el IDEAM en sus estaciones meteorológicas.

Existen en el mercado otros modelos de tanques evaporímetros automáticos que cuentan con un sensor conformado por un flotador, una polea y un contrapeso adherido a un potenciómetro de precisión, montados a través de un conjunto de engranajes (Figura 7-22).

El Datalogger almacena la información de evaporación (en mm) en su memoria no volátil, al mismo tiempo que puede ser visualizada en la pantalla LCD que posee (Agromatic S.A., 2019).

Debe realizarse mantenimiento al tanque por lo menos una vez al mes para garantizar que no existan condiciones que estén afectando el valor de las mediciones obtenidas. Perforaciones, manchas de óxido, goteras entre otras, deben registrarse en el *diario de observaciones meteorológicas* (Anexo 7-1).

Para el caso de mediciones de *evaporación de nieve*, según la OMM (2011), los tanques de evaporación deben ser de polietileno o plástico incoloro con una superficie de al menos 200 cm², una profundidad de 10 cm y deben ubicarse al mismo nivel de la superficie de nieve.



Figura 7-22. Tanque de evaporación automático.
Fuente: (Agromatic S.A., 2019).

7.2.6.2 Evaporímetro

También llamado atmómetro, el más utilizado es el evaporímetro de papel poroso de tipo *Piché*, el cual consiste en un tubo cilíndrico de vidrio de 25 cm de largo y 1.5 cm de diámetro. El tubo está graduado y cerrado en su parte superior y, en la parte inferior, presenta una abertura que se encuentra taponada por una hoja circular de papel filtro normalizado de 30 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor, fijada por

capilaridad y mantenida por un resorte (Figura 7-23), (Sánchez M., 2001).

Al llenarse el tubo con agua (normalmente agua destilada), esta se evapora a través de la hoja de papel filtro, permitiendo calcular la tasa de evaporación en milímetros en un tiempo determinado. El disco poroso permanece siempre mojado por el agua del tubo. La evaporación se mide leyendo la cantidad de agua perdida en el tubo graduado.

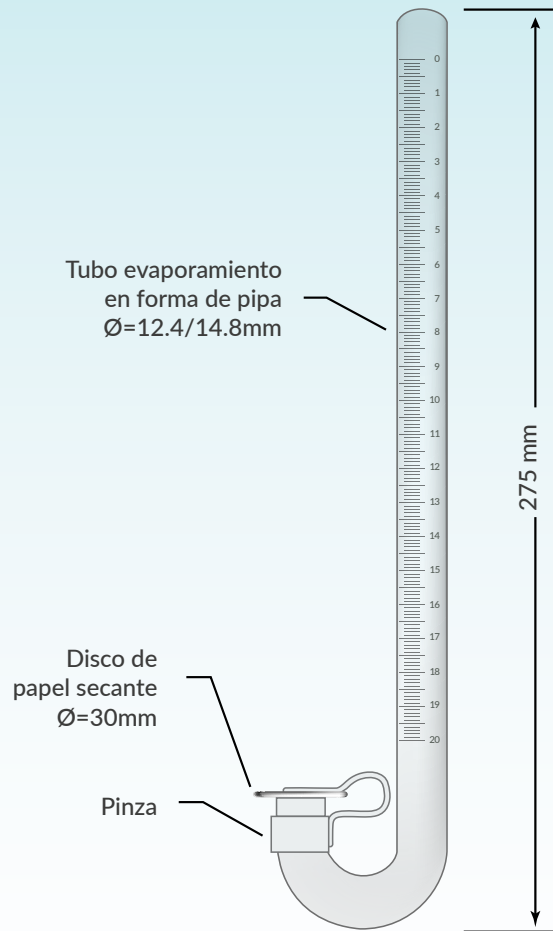


Figura 7-23. Detalle del evaporímetro Piché.
Fuente: Adaptado de Ruiz & Martínez, 2015.

Otros menos usados son los evaporímetros de balanza, como modelo Wild, y los recipientes de porcelana porosa. El **evaporímetro Wild** consiste en un pequeño depósito de 250 cm^2 de sección y 35 mm de profundidad, lleno de agua e instalado sobre una balanza tipo pesa-cartas, en la que se hacen lecturas sucesivas para medir la pérdida de peso al bajar la superficie de agua por la evaporación (Figura 7-24).

Los recipientes de porcelana porosa, consisten en una esfera con un vástago barnizado e impermeable, unidos a un tubo de vidrio que entra a una botella con agua (Figura 7-25). La esfera es alimentada por el vapor de agua que pasa a través del tubo y la evaporación se mide calculando la pérdida de agua del depósito (Ruiz & Martínez, 2015).

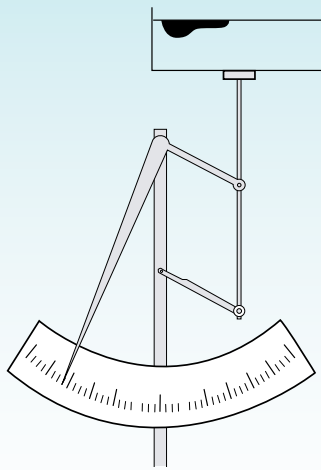


Figura 7-24. Izquierda: esquema de evaporímetro tipo Wild. Derecha: Evaporímetro tipo Wild.
Fuente: (Ruiz & Martínez, 2015), (Martínez, 2012).

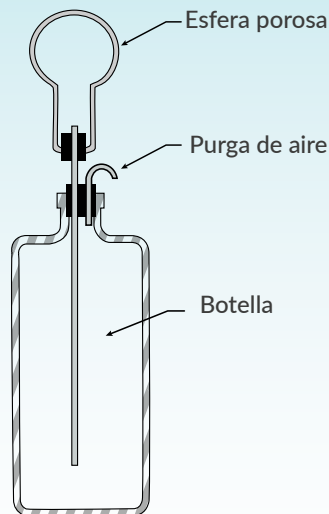


Figura 7-25. Evaporímetro de esfera porosa tipo Livingstone.
Fuente: Adaptado de Ruiz & Martínez, 2015.

7.2.6.3 Lisímetro

Los lisímetros son recipientes en los cuales se coloca el suelo y el cultivo de estudio ubicados en campo para representar sus condiciones naturales, aislados del resto de suelos, con el propósito de medir

exactamente el agua que ingresa (por precipitación o por riego) y el agua que sale (por drenaje) en un determinado tiempo, donde se considera que no hay variación en el almacenamiento del agua dentro del sistema (FAO, 2006), (Figura 7-26).

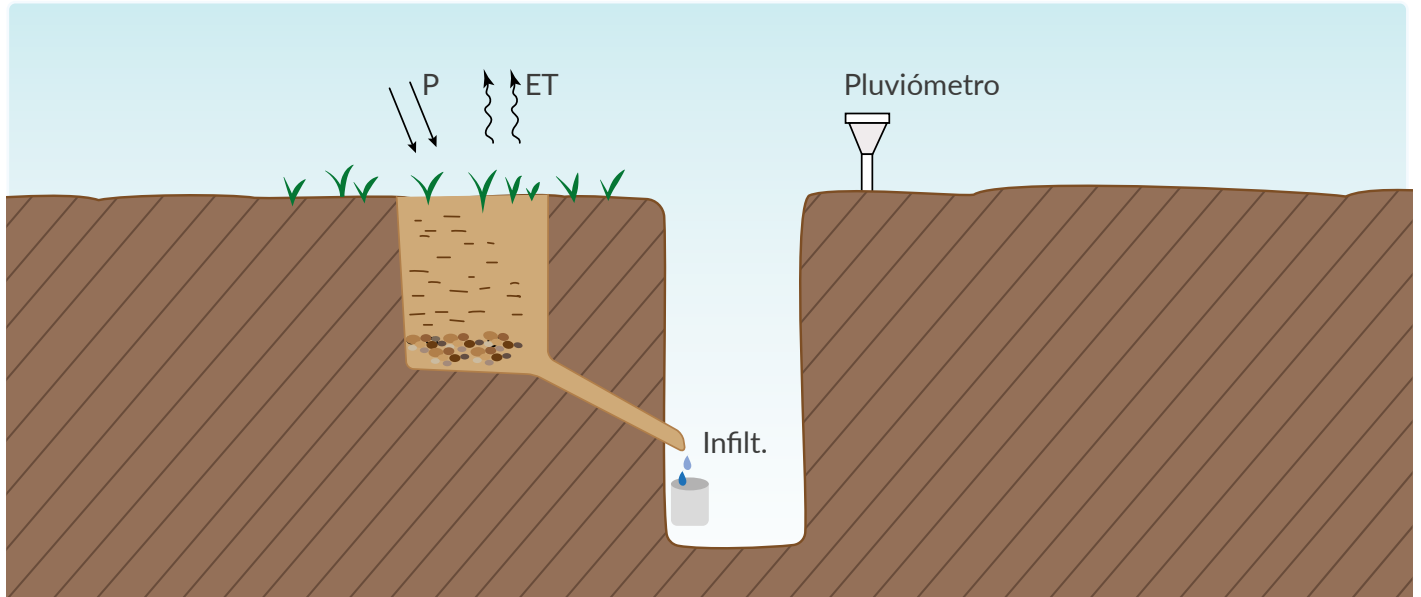


Figura 7-26. Esquema de un lisímetro.
Fuente: (Sánchez F., 2019).

En el caso de los métodos directos, se han propuesto varias ecuaciones empíricas cuyo uso depende de la disponibilidad de datos necesarios para su

aplicación (Gómez, 2017). La Ecuación 7-1, deduce la evapotranspiración a partir de la ecuación de balance hídrico:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta S$$

Ecuación 7-1

Donde,

P: Precipitación.

R: Riego.

ES: Esguerrimiento superficial; puede ser evitado por el diseño del lisímetro.

D: Percolación profunda o agua de drenaje.

C: Capilaridad.

ΔFS : Transferencia horizontal por flujo subsuperficial hacia la zona radicular.

ΔSW : Cambio en el contenido de agua en el suelo.

7.2.7 Procedimientos para medición-Estimación de variables

A continuación, se presentan los procedimientos para la medición de evaporación de acuerdo con los métodos de monitoreo existentes descritos con anterioridad.

7.2.7.1 Tanque de evaporación

Una vez elegida la ubicación del tanque, este debe ser llenado con agua limpia hasta un nivel de 5 cm o 7.5 cm de su borde superior. Se debe colocar en la superficie del agua un termómetro de extremas provisto de un flotador para que no se hunda, pero de tal modo que haya al menos un centímetro de agua entre el termómetro y el nivel de agua.

Al momento de realizar las mediciones, se debe registrar el nivel del agua en el tanque, el valor de la precipitación dada en el pluviómetro, el recorrido del viento y la temperatura máxima y mínima. Se recomienda medir el nivel del tanque antes y después de llenarlo, lo cual debe hacerse siguiendo las recomendaciones de la OMM (2011):

a. Se puede medir el nivel del agua utilizando un aforador de gancho, que consta de una escala móvil

(tornillo micrométrico) y un vernier dotado de un gancho dentro de una cámara de agua montada en el tanque; también es posible usar un flotador. Mediante un recipiente calibrado, se agrega o retira agua en cada observación, de modo que el nivel se mantenga en un valor previamente especificado (Figura 7-27).

b. También se puede determinar el nivel del agua, colocando encima de una señal de referencia hecha en el tanque, por debajo de la superficie del agua, un recipiente de diámetro pequeño dotado de una válvula, la cual se abre hasta que el nivel del agua contenida sea igual al nivel del agua en el tanque; se cierra la válvula y se determina con exactitud el volumen del recipiente usando una probeta de medida. La altura del nivel del agua por encima de la señal de referencia se determina a partir del volumen de agua contenida en el recipiente y de las dimensiones del mismo.

La evaporación diaria se calcula evaluando la diferencia entre los niveles del agua en el tanque en días sucesivos, teniendo en cuenta las precipitaciones en el período considerado (OMM, 2011). El volumen de evaporación entre dos observaciones del nivel del agua en el tanque se determina usando la Ecuación 7-2:

$$E = P \pm \Delta d$$

Ecuación 7-2

Donde,

P : Altura de las precipitaciones producidas durante el periodo comprendido entre las dos mediciones.

Δd : Altura de agua añadida (+) o sustraída (-) del tanque.



Figura 7-27. Tanque de evaporación utilizado en las estaciones meteorológicas del IDEAM.

Las lecturas se hacen una vez cada 24 horas y siempre a la misma hora del día.

Se recomienda a las 07:00 de la mañana, hora local colombiana.

Para mediciones de evaporación en la nieve, se debe cortar una muestra de nieve con la que se llena el evaporímetro, se determina el peso total y se nivela el instrumento con la superficie de la nieve. Hay que tener especial cuidado con que las características de la superficie de la muestra sean las mismas que las de la capa de nieve sobre la que se sitúa el evaporímetro. Al final del período de medición, se quita el equipo de la capa de nieve, se seca su superficie exterior y se mide su peso final. La diferencia entre los pesos iniciales y finales se convierte en valores de evaporación expresados en centímetros (OMM, 2011).

No son válidas las mediciones hechas durante períodos de nevada o de ventisca alta de nieves. Du-

rante el período de fusión de la nieve, se deben pesar los evaporímetros y tomar muestras a intervalos más próximos, debido a que, al disminuir el espesor de la capa de nieve, queda expuesto el borde del evaporímetro lo cual altera el flujo de aire sobre la muestra (OMM, 2011).

7.2.7.2 Evaporímetro de balanza

El depósito debe ser llenado diariamente hasta que el índice marque cero; al cabo de 24 horas, la escala muestra el número de milímetros que ha bajado el nivel del agua por efecto de la evaporación.

7.2.7.3 Lisímetro

Para el cálculo de la evapotranspiración a partir de un lisímetro, se debe partir de las relaciones originadas por el balance hídrico. En el caso de la ETR, la expresión general a partir de la cual se despeja dicha variable se muestra en la Ecuación 7-3:

$$Precipitación = ETR + Infiltración \pm \Delta \text{ almacenamiento}$$

Ecuación 7-3

La única medida compleja de esta ecuación es el delta (Δ) de almacenamiento, el cual debe calcularse midiendo la humedad del suelo y a partir de este valor se convierte dicha humedad en lámina de agua equivalente expresada en mm (Sánchez F., 2019).

En cuanto a la estimación de la ETP, se debe mantener el suelo en condiciones óptimas de humedad mediante riego, lo cual implica que el almacenamiento está siempre completo; el cálculo se realiza a través de la siguiente expresión (Ecuación 7-4):

$$\text{Precipitaciones} + \text{Riego} = \text{ETP} + \text{Infiltración}$$

Ecuación 7-4

Es importante resaltar que un lisímetro no es representativo para el total de una región, por tanto, en algunos casos es necesario realizar el balance hídrico en una parcela experimental (Sánchez F., 2019).

Dado que los lisímetros son instrumentos de alto costo, tanto en la etapa de implementación como de operación y su manejo es dispendioso, requieren especial cuidado; por tanto, en la mayoría de los casos su uso se restringe solamente a trabajos de tipo investigativo (FAO, 2006).

7.2.7.4 Métodos indirectos

Para determinar la evaporación utilizando procedimientos teóricos, se pueden emplear diferentes alternativas como el balance hídrico, energético y el método aerodinámico, las cuales pueden ser subdivididas en formulaciones empíricas y físicamente basadas.

El método de balance hídrico se fundamenta en el principio de conservación de masa aplicado a una parte del ciclo hidrológico. La evaporación en un cuerpo de agua natural o artificial queda determinada por la diferencia entre las variables de entrada (precipitación y caudal de entrada) y las variables de salida (almacenamiento en las orillas, caudal de salida y variación en el volumen de almacenamiento).

Existen numerosos métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración potencial, entre los cuales se encuentran:

- Métodos combinados, caracterizados por la fórmula de *Penman*, llamados así solo por incluir en su formulación los enfoques energéticos y aerodinámicos. Son los más utilizados en las latitudes tropicales.
- Métodos de radiación, como el método de la FAO del mismo nombre.
- Métodos de temperatura empíricos, como los de *Thornthwaite*, *Turc*, *Hargreaves*, *Blaney-Criddle*, entre otros.
- Métodos de evaporación en tanque.
- Modelos físicamente basados, como lo es la ecuación de *Penman-Monteith*, la cual demanda una gran cantidad de mediciones de variables meteorológicas.

Dentro de esta amplia gama de opciones, se debe seleccionar aquella que mejor se ajuste al sitio de estudio y de la cual se tenga disponibilidad de las variables involucradas en su cálculo. Las expresiones matemáticas respectivas pueden ser consultadas en libros de climatología, meteorología e hidrología básica o en publicaciones especiales. Para Colombia, se recomienda la utilización de ciertas fórmulas de acuerdo con análisis regionales (Gómez & Cadena, 2017), (Castro & Guzmán, 1985).



Río Magdalena
Oscar Martínez

8. Monitoreo de agua superficial

El monitoreo de agua superficial permite realizar el seguimiento del comportamiento de los cuerpos de agua con diferentes propósitos: determinar la oferta disponible, comprender y predecir tendencias y eventos extremos, realizar una adecuada gestión del riesgo y soportar la toma de decisiones en el marco de la gestión integrada del recurso hídrico.

Este seguimiento de las aguas superficiales se extiende a cuerpos de agua lénticos y lóticos que presentan diferencias en variables, prácticas de muestreo y equipos utilizados en cada uno de ellos.

La estimación del caudal líquido en fuentes superficiales lóticas debe acompañarse con aforos convencionales que permiten establecer relaciones entre los niveles y los caudales en diferentes épocas del año, para abarcar el comportamiento de las corrientes superficiales en el transcurso del año hidrológico y durante largos periodos de tiempo para contar con curvas de gasto robustas y confiables. Algunas estaciones cuentan con programa de sedimentos donde se realizan mediciones de caudal sólido que son útiles para determinar la carga y dinámica de transporte de

sedimentos. En otras estaciones, que hacen parte de la red de calidad del agua, se realizan mediciones de parámetros fisicoquímicos e hidrobiológicos. En los cuerpos de agua lénticos (lagos, lagunas, ciénagas, humedales, embalses) se deben realizar batimetrías para determinar las relaciones área-volumen o curvas de capacidad y, adicionalmente, pruebas de calidad fisicoquímicas e hidrobiológicas.

En este aparte del documento, se ilustra sobre técnicas de monitoreo de cantidad (niveles, caudales, cuerpos de hielo y nieve), sedimentos y calidad (fisicoquímica, hidrobiológica).

8.1 Monitoreo de cantidad

Monitorear los niveles y caudales en ríos, quebradas, lagos, lagunas o embalses, y los niveles de descenso de los glaciares, constituye un modo de control y seguimiento de la cantidad de agua sobre la superficie de la tierra. Lo que se busca con el monitoreo de cantidad, es poder obtener información veraz, apropiada, confiable y oportuna que permita, entre otros:

- Dar alertas tempranas para el control de inundaciones en los sistemas lénticos y manejo de embalses.
- Proporcionar insumos para formular e implementar Planes de Ordenación de Cuencas (POMCAS) y planes de ordenamiento y desarrollo territorial.
- Realizar balances hídricos, curvas de duración y otras herramientas útiles para la gestión integrada de los recursos hídricos.
- Brindar insumos para el diseño de obras civiles (alcantarillados, presas, carreteras, etc.), sistemas de riego y drenaje, infraestructura de agua potable y obras para generación hidroeléctrica.

- Evaluar los impactos en los recursos hídricos frente a fenómenos de sequías, variabilidad y cambio climático.
- Brindar insumos para el sector académico e institutos de investigación, así como fortalecimiento de programas internacionales de intercambio de datos.
- Aportar insumos para las herramientas de modelación que permitan predecir tendencias y eventos extremos para la gestión del riesgo.

La mayor parte de la información se obtiene de puntos de observación y medición ubicados en los ríos y cuerpos de agua denominadas *estaciones hidrológicas*, las cuales están constituidas por sensores o instrumentos de medición automática (limnógrafos, Registradores Automáticos de Niveles-RAN o sensores tipo radar), o convencionales que requieren lectura directa (mira hidrométrica o limnómetro, limnicontrato y maxímetro). Otras mediciones como velocidades de las corrientes superficiales, utilizan correntómetros o molinetes hidrométricos, equipos y/o accesorios como malacates, varillas de vadeo, contadores de revoluciones, escandallos o tocadores de fondo, muestreadores de sedimentos, equipos automáticos para aforos químicos, líquidos o sólidos, además de los instrumentos específicos de topografía y batimetría. En años recientes se ha extendido el uso de perfiladores acústicos ADCP y FlowTracker2, estos últimos útiles para corrientes con bajos caudales.

En el caso de mediciones de alta montaña, particularmente en glaciares, se requiere información sobre espesores de hielo, retroceso de frente glaciar y balance de masa glaciológico cuya determinación es posible utilizando sensores tipo radar. De igual manera, se presenta la forma de medición de la zona

de ablación, que representa la pérdida de masa de un glaciar, medida por el sistema de balizas.

A continuación, se describen cada uno de estos instrumentos y accesorios utilizados para las mediciones de las variables hidrológicas (nivel, caudal, concentración y transporte de sedimentos), así como las técnicas y equipos utilizados en el monitoreo de glaciares.

La sección de cantidad de agua se construyó con base en documentos previamente elaborados por el IDEAM, como: *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua* (IDEAM, 2007), *Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua*. Informe final Contrato de Servicios de Consultoría C-0427-05 (IDEAM, 2006) y *Protocolos y procedimientos monitoreo del recurso hídrico*. Contrato 214 de 2010. EPAM S. A. (MAVDT & IDEAM, 2011).

- Estimar el caudal o volumen de agua que pasa por un sitio durante un período de tiempo, lo cual es posible a través de la relación nivel-caudal.
- Conocer las amenazas que las crecidas de las corrientes representan para las instalaciones o actividades humanas existentes o previstas en las proximidades del cauce, las cuales pueden manifestarse en forma de inundaciones, destrucción de infraestructuras, viviendas, cultivos, pastos, animales, etc.
- Generar información básica para la definición de niveles históricos y su incidencia en sistemas de abastecimiento de aguas superficiales y operación de acueductos y embalses.
- Aplicación en estudios de navegabilidad y adecuación de cauces mediante el establecimiento de niveles mínimos para garantizar el paso de las embarcaciones de acuerdo con su calado.

- Conocer el nivel de agua alcanzado por los eventos máximos-mínimos anuales con el fin de determinar el componente hidrológico-hidráulico de la ronda hídrica.

Los datos diarios de niveles de estaciones convencionales son registrados por un observador voluntario en la *libreta para observaciones mensuales de niveles, temperatura del agua y muestreo de sedimentos en suspensión* (Anexo 8-1) y luego son transcritos por los técnicos al *formato de lecturas fluviométricas* (Anexo 8-2).

La información de las estaciones que cuentan con Registradores Automáticos de Nivel-RAN (cuando existan) es descargada en formato digital (.csv o .xls).

Las gráficas de los limnigrafos, cuando existan, son retiradas para plotear los datos observados y cuando es pertinente, compararlos con estaciones vecinas.

Los datos registrados en la *libreta para observaciones* (Anexo 8-1) no deben ser alterados. Si se identifica algún error o necesidad de corrección de los valores medidos por el observador durante la visita, estos deben quedar consignados en el *formato de lecturas fluviométricas* (Anexo 8-2).

8.1.1 Niveles

El nivel de agua (o altura) corresponde a la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto a un valor de referencia (OMM, 2011) que puede ser absoluto (ms.n.m.) o relativo (cota cero) y su medición puede utilizarse directamente para:

8.1.1.1 Selección de puntos

La selección del sitio o sitios de medición de niveles depende del objetivo del monitoreo. El diseño de la red hidrológica debe obedecer a un programa

de monitoreo en el cual estén definidos los alcances estratégicos (propósito y objetivos específicos) del monitoreo que permite determinar la densidad de estaciones, el tipo de sensores requeridos y los sistemas de transmisión.

Sin embargo, como generalidad, cuando se va a definir el sitio o sección de medición para la ubicación de la estación hidrométrica, es importante observar condiciones de campo y necesidades de monitoreo de puntos específicos teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones (SCMH, 1974):

- La sección debe estar situada en un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo debe tener un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección.
 - El tramo de río debe ser unitario y sin cauce mayor inundable.
 - La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la medición de niveles máximos.
 - La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme, evitando tramos con quiebres fuertes de pendiente que desequilibren la velocidad de la corriente. Se deben evitar áreas de aguas muertas y contracorrientes o remolinos.
 - El lecho del río debe ser de geometría regular y cauce estable, tanto en perfil longitudinal como transversal y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.). Se deben evitar los lechos fangosos.
 - No deben existir confluencias cercanas a las desembocaduras, las cuales pueden producir remanso.
 - La geología del terreno debe facilitar la construcción de las instalaciones para los equipos de medición de niveles.
- Preferiblemente, la sección transversal seleccionada debe tener forma de “U” o “V”.
 - Se debe ubicar en un sitio que cuente con fácil acceso por vía terrestre o navegable; preferiblemente el sitio del emplazamiento de la estación debe ser en un puente de carretera y cercano a zonas habitadas con buenas condiciones de seguridad.
 - En caso de requerir transmisión en tiempo real, se debe evaluar la disponibilidad de señal de acuerdo con el sistema de transmisión seleccionado (satélite, GPRS, radio, entre otros).

Según la OMM (2011), es importante tener en cuenta las condiciones hidráulicas, que son un factor significativo en la selección del emplazamiento en corrientes fluviales, particularmente cuando se utilizan los niveles de agua para calcular valores de caudal.

Una vez definido el sitio, se procede a levantar la hidrotopografía, la cual tiene por objeto documentar la topografía del cauce (perfil transversal) y georreferenciar la estación, con el fin de determinar la cota cero de la mira. Lo anterior permite reconstruir la estación en el mismo sitio en caso de siniestro y garantiza la continuidad de la serie de tiempo y calidad del dato de nivel, al tomar como base el sistema de referencia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Para este efecto, se desarrollan las siguientes actividades:

- Se ubican dos puntos geodésicos de referencia: un BM (del inglés *Bench Mark*) y el otro punto de nivelación (NP) amarrados al Sistema Geodésico Nacional del IGAC.
- Ubicación de puntos invariables de referencia (PR).
- Se efectúa una nivelación de alta precisión de doble recorrido entre el BM y el NP seleccionado y un punto previamente localizado en un sitio seguro a la orilla del río, considerando: 1) que se encuentre lo más cerca posible a la estación, 2) arriba del nivel

de aguas máximas, 3) en un terreno estable que no sufra alteraciones, para evitar su destrucción durante eventos extremos, y 4) preferiblemente sobre una estructura permanente como un puente, una roca, etc. Este punto debe materializarse mediante un mojón en concreto, con una placa metálica que indique el nombre de la estación y número.

- La nivelación de precisión debe tener un error máximo acumulativo de $\pm 3(n)^{1/2}$ milímetros, donde n es el número de estaciones de la nivelación. Si el error es mayor, no se debe aceptar la nivelación y debe repetirse.
- En distancias horizontales (X, Y), la precisión está dada por la diferencia entre las coordenadas del BM IGAC y las obtenidas del recorrido inverso de la estación-BM. Tal diferencia debe ser inferior a una décima de la distancia representada por un milímetro a la escala del plano de la estación hidrométrica. Por ejemplo, si la escala del plano es 1:1000, un (1) mm a esta escala son 1000 mm, o sea 100 cm, por lo cual el error en distancia horizontal X o Y no debe ser superior a $0.1 \cdot 100 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$.

El levantamiento de la información de perfiles transversales, la verificación de cotas cero (limnómetro y máxímetro) y del BM o el NP, con el cual se referencia el limnómetro o máxímetro, son consignados en el *formato cartera de nivelación* (Anexo 8-3).

Una vez materializado el BM de la estación y conocidas sus coordenadas por la nivelación de precisión, se deben determinar los elementos principales de la estación:

- Nivel del agua del día de la nivelación; se debe registrar la hora de la lectura y marcar este nivel en la cinta de registro del limnógrafo, en caso de que exista.
- Nivel de la superficie de soporte del limnógrafo.

- Nivel de la solera del pozo (en caso de instalaciones de pozo).
- Nivel del cero de mira y de los empalmes de los distintos tramos de la mira y del máxímetro.
- Nivel del punto de referencia de las orillas izquierda (OI) y derecha (OD) de la sección de aforo.
- Elaboración de diagramas esquemáticos de localización de la mira durante la nivelación.

8.1.1.2 Frecuencia

La frecuencia con que se registra el nivel está determinada por el régimen hidrológico del cuerpo de agua (río, quebrada, arroyo, embalse, laguna) y por los fines a que responda la recopilación de datos. El intervalo entre registros en una estación dada, se decide en función de la rapidez con que podría cambiar la altura del agua y de su importancia respecto a la variación del caudal. En el caso de los cursos de agua con crecidas repentinas, se necesita una periodicidad (intervalo de tiempo) menor, mientras que para las grandes corrientes fluviales que discurren por zonas planas la periodicidad puede ser mayor (ISO, 1981, citado en OMM, 2011).

Para medir corrientes fluviales pequeñas o con crecidas repentinas y cuencas de drenaje urbanas, es necesario registrar más frecuentemente la altura del agua, con el fin de obtener un hidrograma suficientemente aproximado (OMM, 2011).

En Colombia, por recomendación y estandarización de la OMM, para medición de niveles en cuerpos de agua en estaciones de medición discreta, de forma directa con un observador local, la información debe ser tomada diariamente, realizando dos lecturas, a las 06:00 a. m. y 06:00 p. m., (06:00 y 18:00 horas) y lecturas extras si ocurren crecientes. Para los casos en que solo se requieran calcular las variaciones del

almacenamiento, basta con medir diariamente la altura del agua en lagos y embalses (OMM, 2011), en la frecuencia necesaria para hacer seguimiento de los cambios en el volumen de agua.

En el caso de uso de instrumentos automáticos, las mediciones deben hacerse con la mayor frecuencia posible, lo cual depende de la capacidad de batería y memoria de almacenamiento de datos con que cuenten dichos elementos (OMM, 2011).

Finalmente, si se utilizan sistemas de telemetría, para predicción o gestión de crecidas, los datos deben ser transmitidos cuando la altura del agua varíe en una magnitud predeterminada (OMM, 2011).

8.1.1.3 Tipos de medición

La medición de niveles, se realiza teniendo en cuenta dos tipos de observación: **observación directa** y **observación de registro continuo**:

Observación directa o discreta

Consiste en la medición directa del nivel del agua a una hora determinada mediante la utilización de instrumentos (mira hidrométrica o limnómetro, máxímetro, limnicontrato) con diferente conformación física. Este tipo de observación es la más sencilla y económica, sin ser la más precisa, ya que requiere que los datos sean obtenidos por un observador en horas fijas establecidas por la OMM, con el propósi-

to de estandarizar estadísticamente el origen de las series históricas y los procedimientos para el manejo de las mismas.

Observación registro continuo

Consiste en el registro permanente del nivel del agua a través de equipos mecánicos, digitales o automáticos. Este tipo de observaciones permite obtener un detalle permanente y preciso de las variaciones de los niveles en las distintas épocas hidrológicas, es decir, en temporadas húmedas, secas y periodos de transición. Sin embargo, los costos de estos equipos limitan su operación, pero por eficacia y exactitud ha sido indispensable su instalación.

8.1.1.4 Equipos

Teniendo en cuenta el tipo de medición, existen diferentes equipos, para el monitoreo de niveles. Entre ellos se encuentran los instrumentos para observación directa y continua:

Instrumentos para observación directa

- **Limnómetro**

La mira hidrométrica o limnómetro es una regla graduada dispuesta en tramos de un (1) metro, que se utiliza para medir las fluctuaciones de los niveles en un punto determinado de un cuerpo de agua, como se observa en la Figura 8-1.

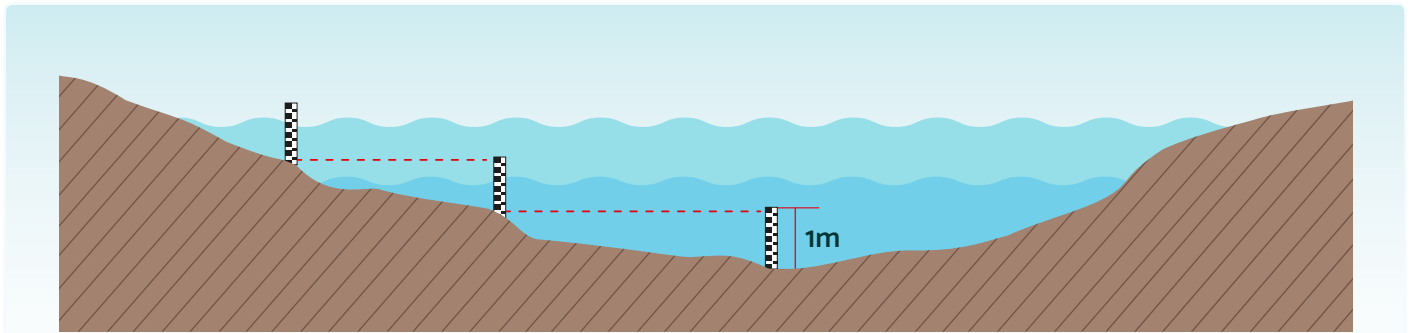


Figura 8-1. Escala limnimétrica.
Fuente: Adaptado de OMM, 2011.

Todas las miras son pintadas en blanco y negro con graduación sugerida de 1 cm y pueden ser construidas en varios materiales (Figura 8-2, Figura 8-3):

Hierro fundido: La numeración va fijada en alto relieve, con lo cual los caracteres no se borran, garantizando la durabilidad de este elemento y la confiabilidad de los datos.

Lámina esmaltada: Están limitadas por la fragilidad del esmalte, por lo cual se recomienda su uso en corrientes que no tengan arrastre de rocas o palizadas que las puedan dañar.

Lámina pintada: Estas miras están fabricadas en chapa de acero de 2 mm de espesor y tienen poca duración, debido a que la pintura se deteriora fácilmente en el tiempo; tienen la ventaja de ser más económicas y de fácil construcción.

Aluminio fundido: Estas miras son en alto relieve de 5 mm de espesor, capaces de soportar esfuerzos mecánicos para garantizar la durabilidad de este elemento y la confiabilidad de los datos.

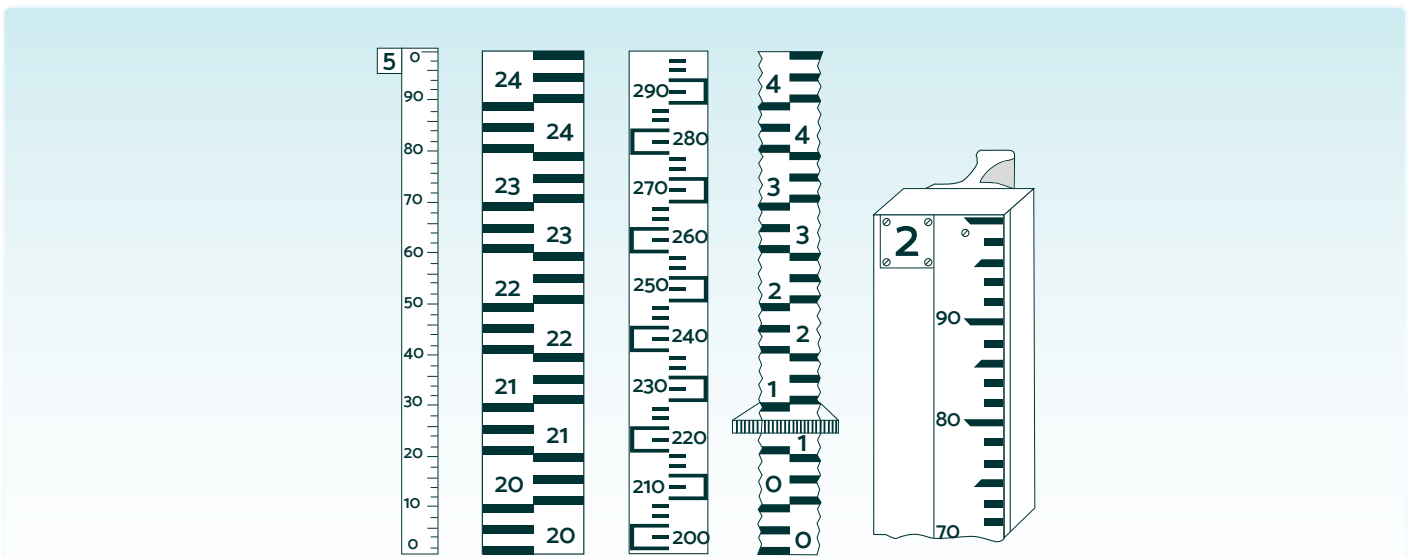


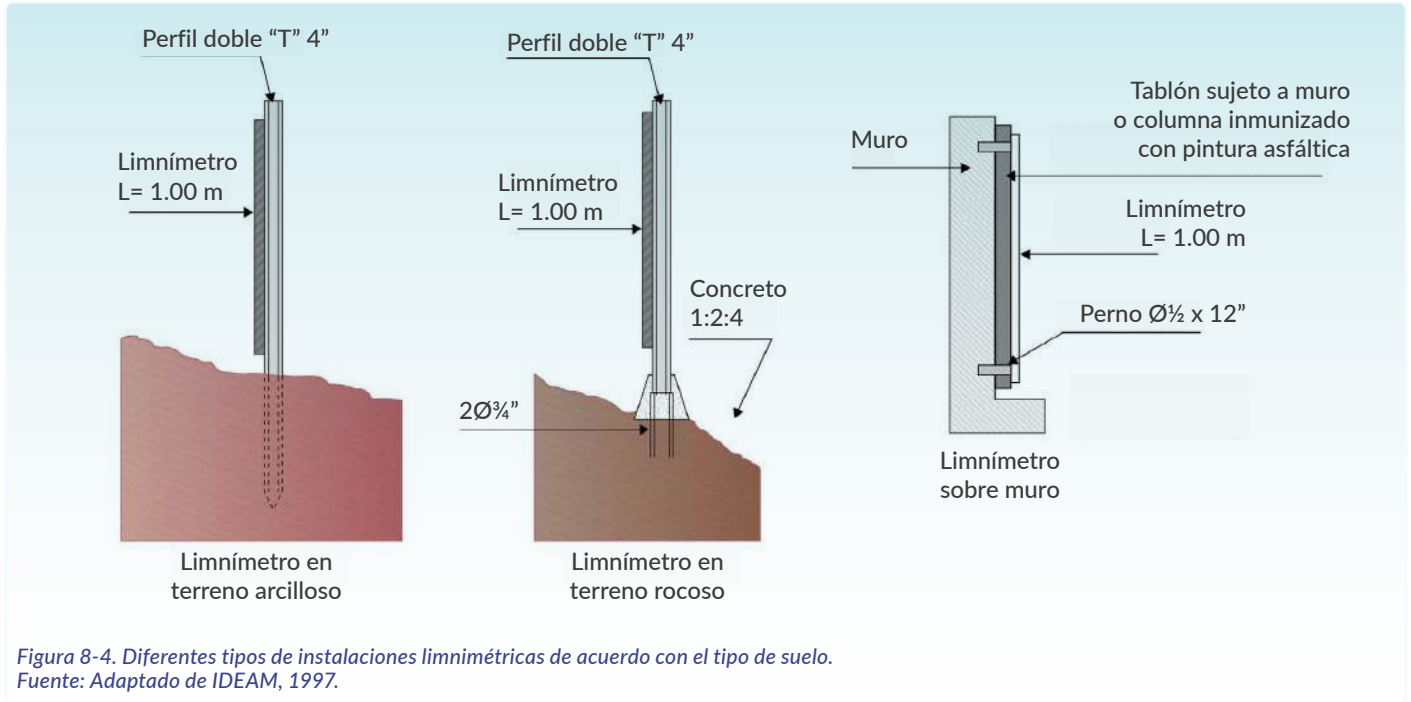
Figura 8-2. Tipos de miras hidrométricas.
Fuente: Adaptado de Marbello, 2005.



Figura 8-3. Mira limnómetro Estación La Laja.

Para su instalación, se deben considerar los siguientes requerimientos:

- Deben ser instaladas sobre la orilla próxima al sector más profundo del cauce, cuidando que la cota quede 0.5 m por debajo del fondo del cauce para ríos pequeños, y 0.5 m por debajo del nivel de aguas mínimas, en ríos grandes. El extremo superior del limnómetro debe sobrepasar, por lo menos en un metro, el nivel máximo de la creciente posible o la registrada históricamente según huellas y/o información de los habitantes de la región.
- Las miras deben tener una buena fijación, que garantice que no se produzcan movimientos verticales que alteren las lecturas. Para ello se recomienda su instalación en sitios estables como rocas, pilas de puentes, muelles, u otras estructuras resistentes (Figura 8-4).
- En el caso que sea imposible encontrar una estructura estable, se recomienda fijar los limnómetros en rieles, listones de madera, perfiles de acero, estructuras en concreto o taludes en roca (Figura 8-4).
- Las miras deben ser colocadas de tal manera que permitan una fácil operación; se deben leer con comodidad, seguridad y precisión, en consecuencia, deben tener facilidades de acceso.
- Su instalación se hace de tal manera que el plano cero de la mira esté referenciado a un BM que en lo posible esté ligado a la red de nivelación del IGAC, a fin de verificar periódicamente la cota cero o para restituir con precisión la posición inicial en caso de ser removidas (robadas) o destruidas por eventos naturales. Este punto o BM debe estar colocado en un sitio seguro, arriba del nivel de aguas máximas y en un terreno estable que no sufra alteraciones.
- Su instalación no debe obstruir los perfiles transversales de la corriente.



• **Maxímetro**

Es un dispositivo asociado a una mira limnimétrica, que permite con posterioridad determinar el nivel alcanzado por el agua (Figura 8-5). Se caracteriza por

ser un instrumento medidor de crecientes en los ríos; en ellos queda registrado el nivel máximo alcanzado durante el período transcurrido entre las visitas realizadas por el técnico.



Figura 8-5. Máxímetro. Estación Puente Venado, río Venado.

Existen varios tipos de máxímetros (Figura 8-6), entre los que se encuentran:

- **Máxímetro de tubo**

En este instrumento, el agua se deposita en un conjunto de recipientes que se encuentran colocados dentro de un tubo con perforaciones laterales que permiten la entrada del agua y borran una señal previamente pintada o dejan una huella en un corcho adherido a las paredes interiores de un tubo.

Estos recipientes tienen 5 cm de altura y se construyen en vidrio, latón, tubo galvanizado o PVC; van colocados dentro de un soporte cilíndrico introducido dentro de un tubo galvanizado, que a su vez es fijado

mediante patinas en los extremos a una estructura estable, metálica o de concreto.

- **Máxímetros de placa graduada**

Son aquellos que se pintan con tiza o cal, la cual va dentro de un tubo perforado u otra estructura que admite el acceso del agua. Al subir el agua, la tiza es lavada hasta el nivel máximo alcanzado por la corriente, quedando de esta forma el registro de dicho nivel.

Otros tipos diseñados y construidos en fibra de vidrio: entre estos pueden considerarse los que corresponden a un tubo de 1 m de longitud, graduado en centímetros y decímetros, con cinta adhesiva que al contacto con el agua cambia de color, indicando así la altura alcanzada.

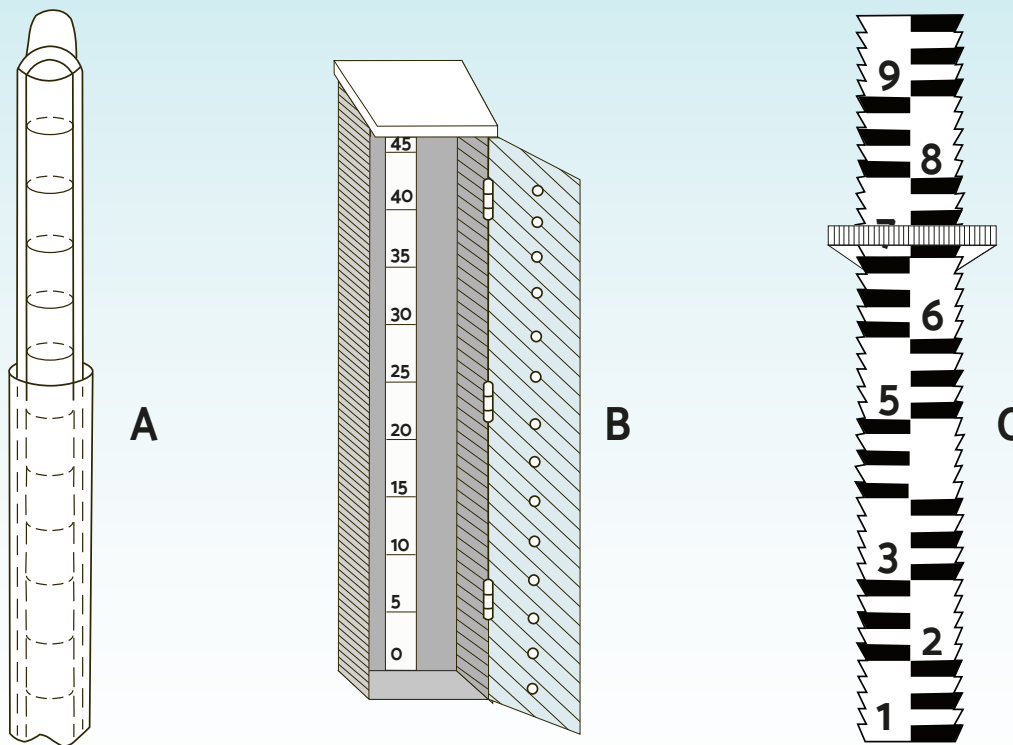


Figura 8-6. Diferentes tipos de máxímetro.
Fuente: Adaptado de SCMH, 1974.

Las dimensiones más usuales que conforman el maxímetro son las siguientes:

- Diámetro del tubo de 2.5 pulgadas (6.35 cm), puede ser de hierro galvanizado o PVC.
- Longitud de 1 o 1.50 m.

El maxímetro se instala generalmente a continuación del penúltimo metro de mira. Al igual que en el caso de los limnímetros, para su instalación se deben seguir los mismos patrones y requerimientos técnicos que garantizan una buena fijación y comodidad para realizar las lecturas con exactitud. Igualmente, debe ligarse topográficamente al mismo punto de referencia de las miras y el cero (0) del maxímetro debe coincidir con un valor del limnómetro que sea múltiplo de 0.1, es decir, 3.50 - 4.00 - 4.30 - 4.70 - 5.20, etc.

Mantener los recipientes en buen estado, el lavado del tubo y los vasos, hace parte del mantenimiento del maxímetro.

• **Limnicontrato**

El limnicontrato o sonda indicadora de nivel, es un dispositivo simple constituido esencialmente por una polea, un contrapeso y un flotador unidos por un cordel o cable abscisado para facilitar la medición. Según el nivel de agua, el cable se desplaza con relación a un nivel de referencia-NR (normalmente, corresponde al nivel de aguas mínimas), (Figura 8-7). El sitio seleccionado para el contacto del flotador con el agua, debe estar alejado de la línea de corrientes máximas para evitar la inclinación del cordel (IDEAM, 2007).

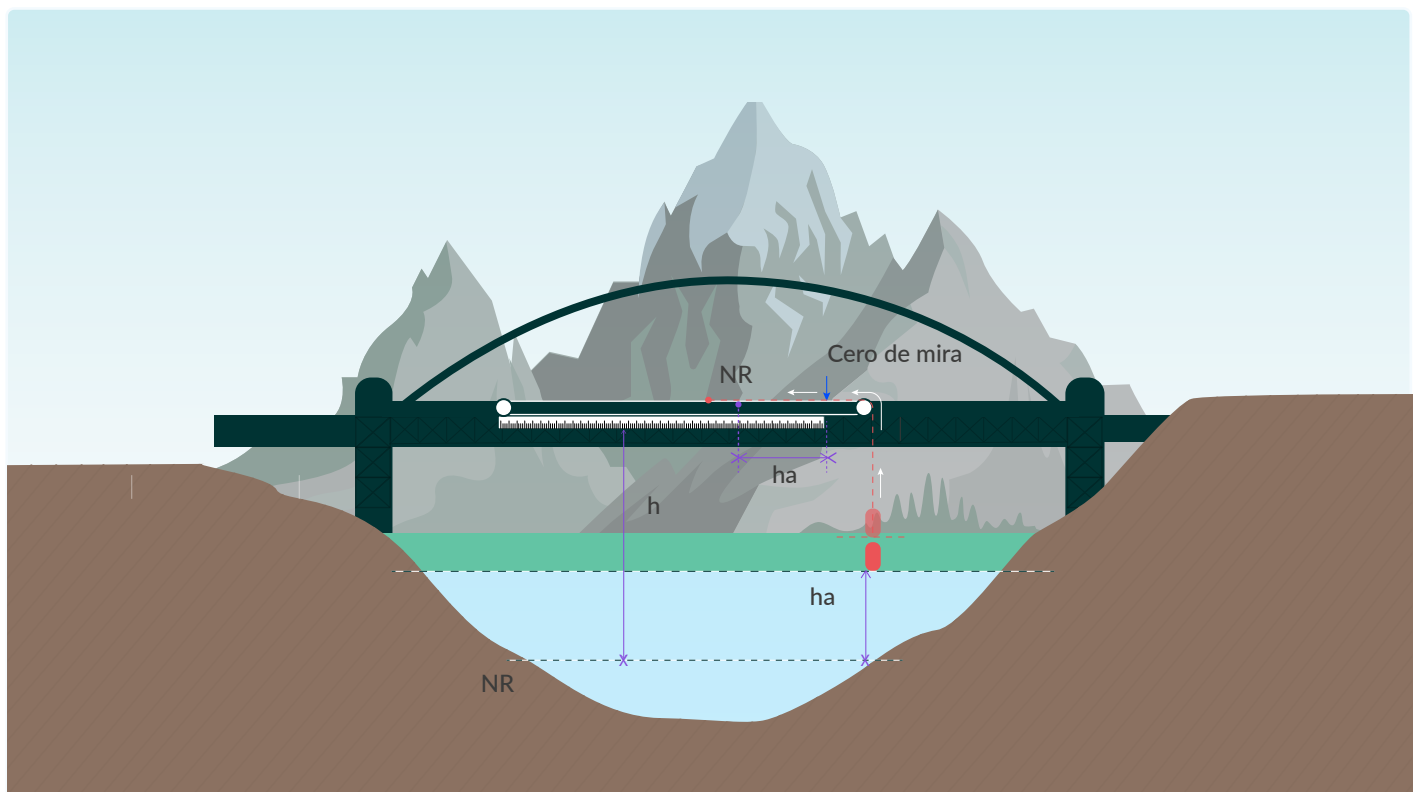


Figura 8-7. Esquema de un limnicontrato.

Su instalación se hace generalmente sobre barandas de puentes, en lugares que permitan medir toda la gama de variación de niveles. La parte fija de esta instalación es el punto de referencia y los demás elementos son instalados por el observador al momento de la medición. Para hacerlo operativo, se requiere la instalación de miras horizontales sobre la estructura de soporte del instrumento, las cuales facilitan determinar el nivel del agua (Figura 8-7).

Existen varias clases de limnicontrato o sonda indicadora, las más usadas son la sonda luminosa o eléctrica y la sonda de presión. Normalmente, estas

sondas se colocan en la parte superior de un punto de medición y con una sencilla manipulación se desciende el cable por medio de una manivela. Su uso está más orientado al monitoreo de aguas subterráneas, por lo que la información más detallada está disponible en el capítulo 9 *Monitoreo de aguas subterráneas*.

- **Limnicontrato tipo sonda luminosa**

Consiste en una cinta graduada que tiene un dispositivo al final, que al hacer contacto con el agua emite un impulso eléctrico que enciende una lámpara de señal o envía señales acústicas (Figura 8-8).



Figura 8-8. Izquierda: Sonda luminosa cuya operación es de manivela. Derecha: Sonda con sensor de presión. Fuente: (OTT Hydromet, 2019a).

- **Sonda de presión manométrica con terminal de datos o sin ella**

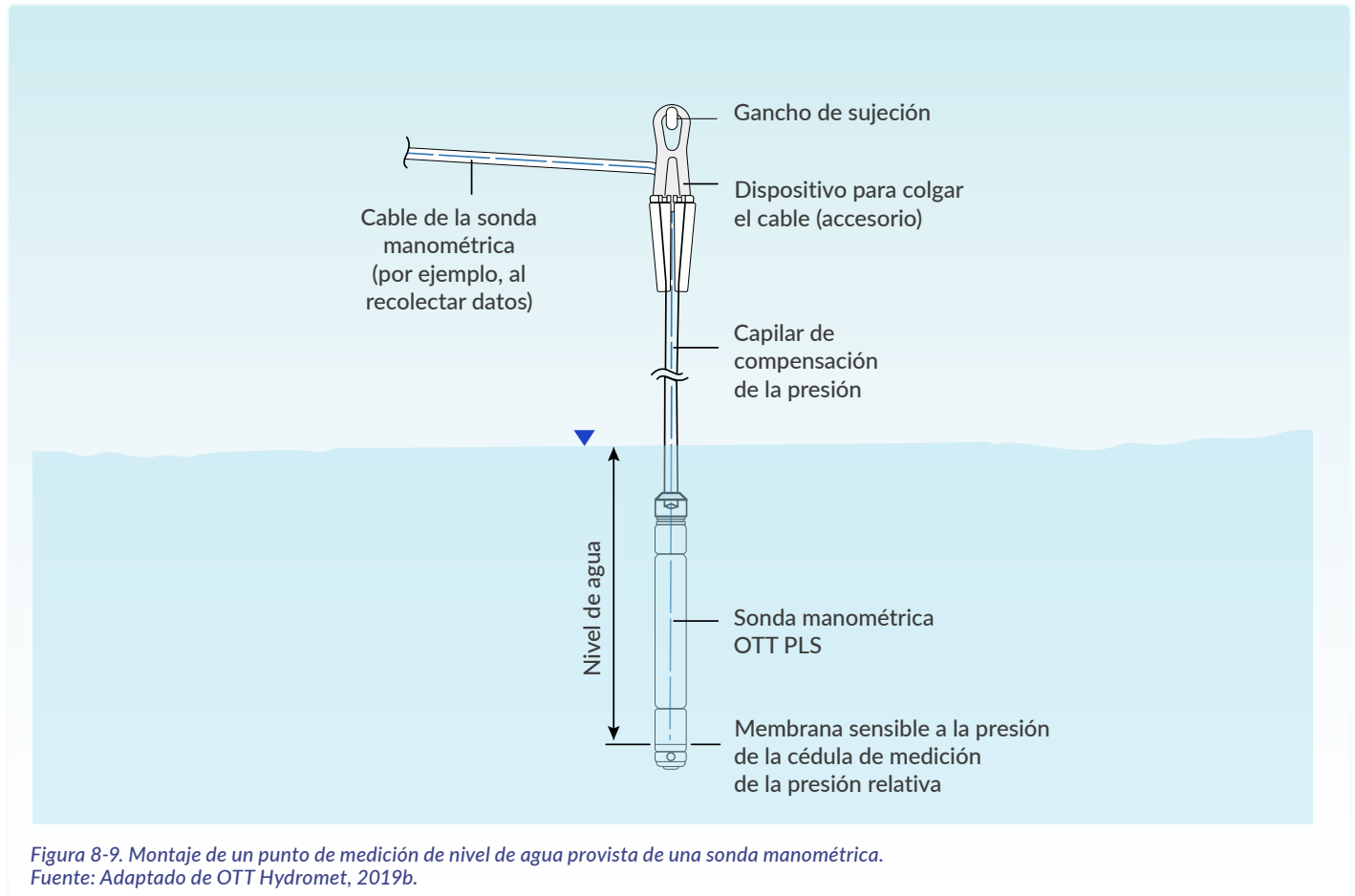
Consiste en una célula capacitiva de cerámica, que mide la presión hidrostática de la columna de agua a través de una membrana de presión que la transforma

en señal eléctrica. También puede hacer mediciones de temperatura y conductividad (Figura 8-9).

Tiene una carcasa y un cable de longitud estable que garantizan que pueda utilizarse para las tareas más diversas de medición del nivel de agua y que se

pueda conectar sin problemas a distintos tipos de registradores de datos o de sistemas de control de proceso. Los valores medidos pueden ser leídos en

una pantalla (*display*) o almacenados en un colector de datos incorporado en el cuerpo de la sonda.



Instrumentos para observación continua

• Limnógrafo

Es un equipo automático con el cual se obtiene un registro continuo de los niveles del río en el transcurso del tiempo. Su instalación es esencial en las corrientes cuyo nivel esté sujeto a fluctuaciones. Se pueden encontrar limnógrafos mecánicos o digitales.

• Limnógrafo mecánico

Está conformado fundamentalmente por tres dispositivos: el primero corresponde al elemento sen-

sible, que puede ser un flotador y contrapeso o un manómetro; el segundo, es el sistema que traduce a escala y registra los niveles del agua (eje helicoidal, poleas de escala y mecanismo de registro), y el tercero proporciona una escala de tiempo, basado en un mecanismo de relojería y alimentado mecánicamente o por medio de baterías.

La instalación del limnógrafo se hace en una caja hermética (Figura 8-10), la cual protege los equipos de los factores del clima, animales y comunidad.



Figura 8-10. Limnógrafo.
Fuente: (Ochoa, 2013).

En el limnógrafo mecánico, el contacto con la superficie del agua se establece por medio del flotador,

ligado a través de un cable provisto de contrapeso que acciona una polea. Cuando la instalación es directa a la corriente del agua o cuando hay pozo quietador, el flotador se encuentra dentro del tubo cono o dentro de la estructura del pozo, conectado, en este último caso, hidráulicamente a la corriente por el principio de los vasos comunicantes, a través de tuberías de aguas máximas, medias y mínimas.

La Figura 8-11 muestra el emplazamiento común de una estación limnográfica.

En el equipo manométrico, la presión del agua se transmite a través de una tubería que contiene gas, el cual a su vez se acopla a un mecanismo de inscripción. Existe el *limnógrafo manométrico estático*, en el cual el gas permanece encerrado en la tubería, y el *limnógrafo manométrico de burbujas*, donde la tubería es alimentada con un leve flujo de gas que burbujea lentamente por su extremo abierto.

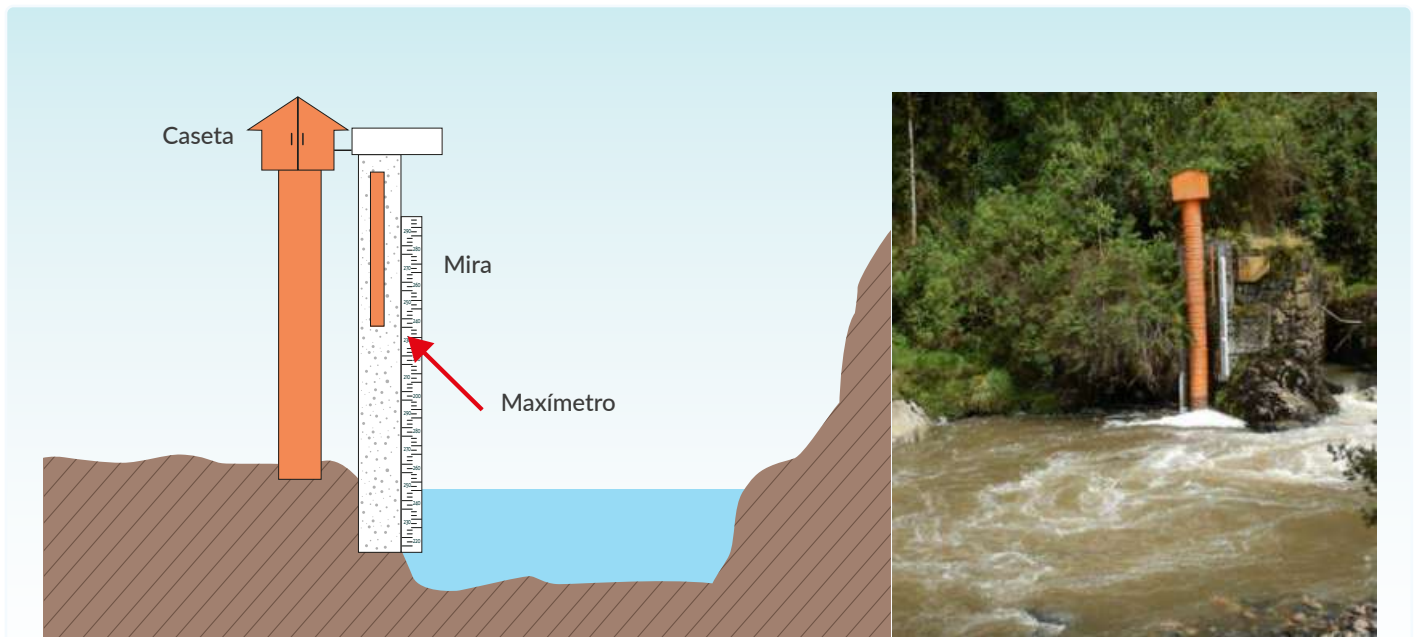


Figura 8-11. Estación limnográfica. Izquierda: Esquema de una estación limnográfica, Derecha: Estación las ánimas, río Chochal.

Limnógrafo manométrico estático: funciona con base en aire y dispone de una bomba manual que sirve para reponer el aire que se pierde por fugas en la tubería. Al ser inyectado el aire a la tubería pasa por un medio disecante, como ácido sulfúrico. La parte terminal de la tubería que se encuentra en contacto con la corriente, se halla abierta hacia abajo en forma de campana o bien cerrado con una colchoneta o vejiga compresible.

Limnógrafo manométrico de burbuja: es alimentado a presión con un gas, generalmente nitrógeno, que burbujea a través de la tubería, asegurándose así que permanezca libre de obstrucciones. Para asegurar el funcionamiento de este tipo de limnógrafo, se necesita un cilindro del gas especificado por el fabricante de los equipos.

Entre los mecanismos de registro gráfico utilizados para limnógrafos de flotador o de manómetro se encuentran los de **tambor** y los de **banda**. Los primeros tienen una duración de registro limitada por el tamaño del tambor y se fabrican habitualmente para una duración de 1 a 30 días. Los limnógrafos de banda tienen una cuerda o batería de larga duración mayor a 90 días y no exigen, dentro de este plazo, una fecha fija de inspección y cambio de papel. En cada inspección, se recorta la parte registrada de la banda que transita de una bobina de alimentación a otra de recepción.

Limnógrafo de banda

El avance del papel es generalmente del orden de 2 mm por hora, y la altura útil de registro de 250 mm, pero muchos modelos de estos instrumentos contemplan la posibilidad de cambiar la velocidad de avance y la escala de medición por intercambio de engranajes y poleas. Los dos tipos de limnógrafo cuentan con un dispositivo que amplía indefinidamente el

rango de registro de niveles, conocido con el nombre de *inversor de escala*, mediante el cual el registro no se detiene cuando llega al tope de la escala, sino que continúa registrando en sentido inverso.

La inscripción se realiza con lápiz o tinta sobre el papel corriente o por medio de un estilete sobre papel encerado; los lápices o minas de grafito proporcionan un registro seguro, pero poco nítido, por lo que generalmente se prefiere la inscripción con tinta. En los limnógrafos de tambor, de duración limitada, se usa frecuentemente una plumilla en forma de tetraedro que se recarga en cada inspección; en cambio, los limnógrafos de larga duración vienen provistos de una plumilla de tipo capilar, unida a un depósito de tinta.

En ocasiones, el sistema de inscripción basado en tinta se convierte en fuente de perturbaciones por fallas de la plumilla; en estos casos se opta por un sistema de inscripción basado en un estilete que registra por presión sobre papel encerado de mayor costo, exigiendo además manipulación cuidadosa, ya que por su sensibilidad se originan registros ante cualquier presión que se haga sobre el mismo.

Alternativas como la satelital, transmisión de datos en tiempo real (momento de ocurrencia del evento), vía radio, teléfono o celular, han venido siendo acogidas por las corporaciones autónomas regionales o las autoridades ambientales urbanas para el control hidrológico y la gestión ambiental e incluyen la prevención de desastres.

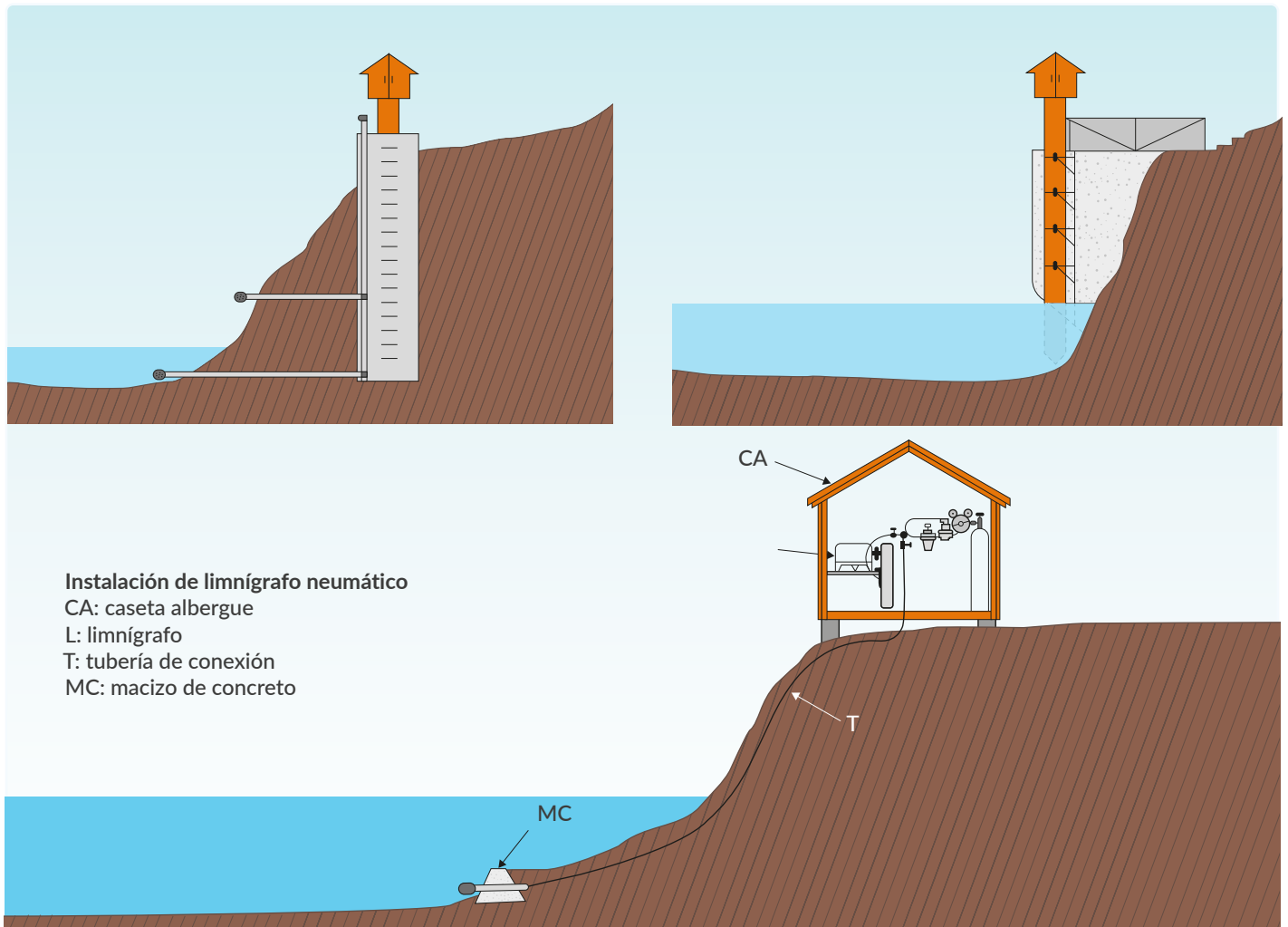
Para el funcionamiento permanente del equipo, con producción de datos de buena calidad, se requiere de la disposición de operarios con buen conocimiento sobre la estructura y conformación de las partes del equipo, sobre el funcionamiento y relación entre esas partes. Además, deben tener noción del

diseño y ejecución precisa de rutinas de operación y mantenimiento preventivo, que incluyen el cambio de la gráfica, dotación de tinta, revisión de plumilla, limpieza y lubricación general, revisión y relevo del soporte de energía, funcionamiento y calibración de las escalas de nivel y tiempo.

Estas estructuras deben ser instaladas en la orilla más cercana a la profundidad máxima del cauce, para

evitar que el elemento sensible (flotador o sensor automático) quede en seco durante los periodos de estiaje. La Instalación limnigráfica debe estar siempre acompañada de un sistema de miras para su control y calibración.

Existen tres categorías o tipos principales de instalaciones limnigráficas: de tubo, de pozo y neumáticas (Figura 8-12):



Instalación de limnigráfico neumático
 CA: caseta albergue
 L: limnigráfico
 T: tubería de conexión
 MC: macizo de concreto

Figura 8-12. Estación limnigráfica. Arriba: Instalación de limnigráfico de pozo e instalación de limnigráfico de tubo con aleta de protección. Abajo: Instalación de limnigráfico neumático. Fuente: Adaptado de SCMH, 1974.

- **Instalaciones de tubo**

Este sistema es instalado directamente en el cauce del río sobre paredes verticales de roca, concreto o ladrillo, protegidos contra la fuerza de la corriente mediante aleta construida en concreto dentro del cauce.

- **Instalaciones de pozo**

Se instalan cuando las orillas son bajas e inclinadas, constituidas por materiales fácilmente excavables. El extremo superior del pozo debe quedar no menos de 1 m por encima del nivel máximo posible de las crecidas.

- **Neumáticos**

Las instalaciones para limnógrafos neumáticos se construyen para gamas de variación de niveles muy grandes en condiciones que hacen muy difícil o costosa cualquier otra instalación. Consta de una caseta para albergar los instrumentos y un tubo de conexión entre el registrador y la corriente fluvial. En el extremo,

que hace contacto con el río, se empotra el tubo en un bloque de concreto que descansa directamente en el lecho, posicionado acorde con el nivel de aguas mínimas para no perder registros.

- **Limnógrafo digital**

Debido al desarrollo tecnológico, se han diseñado instrumentos que permiten el registro continuo de datos a diferentes pasos de tiempo. En casos especiales, cuando se requiere que ese dato sea transmitido en tiempo real con fines de alertas tempranas por eventos hidrometeorológicos o para la operación de estructuras hidráulicas, se recurre a los instrumentos registradores con un sistema automático y un medio de transmisión, que constan de un decodificador, un panel de sensores y una antena con alimentación de una batería, que es recargada a través de un panel solar (Figura 8-13, Figura 8-14).

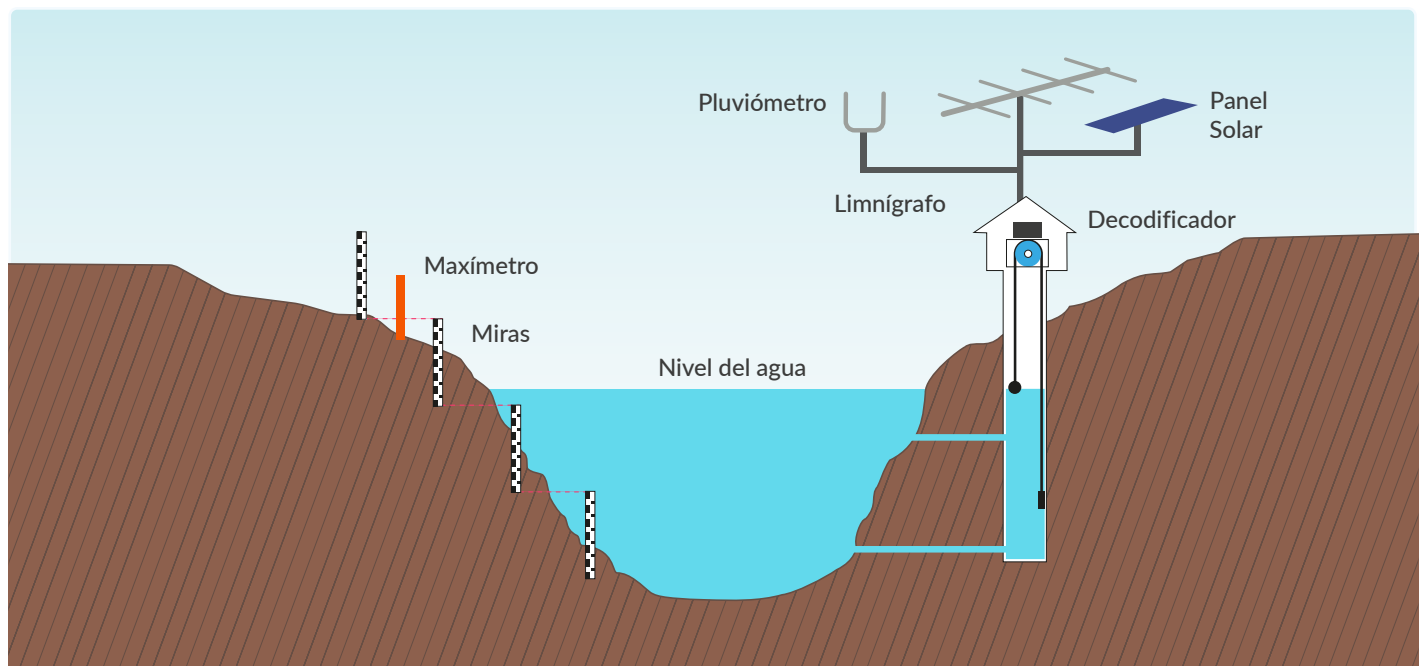


Figura 8-13. Esquema limnógrafo digital.



Figura 8-14. Estación limnigráfica digital. Izquierda: Estación satelital Pilispi. Derecha: Estación automática El Banco Magdalena.

El dato colectado es transmitido a intervalos de tiempo de acuerdo con el sistema de transmisión seleccionado, y este lo envía a una plataforma central de recepción. Los datos recibidos quedan disponibles instantáneamente para su consulta, representación

gráfica y tratamiento estadístico y posterior aplicación en diferentes tareas.

La Tabla 8-1 muestra de manera consolidada, las principales características, ventajas y desventajas de los cuatro tipos de sensores existentes.



Río Chicamocha - PANACHI (Parque Nacional del Chicamocha)
 Juan Carlos Moreno

Tabla 8-1. Características de los sensores de nivel.

Sensores de Nivel			
Encoder	Radar	Burbujeo	Presión
			
Características			
Se ha diseñado para medición en pozos con flotador y tubos de nivel. Cuenta con un mecanismo flotador y un codificador angular (encoder) que se activa con el menor cambio de nivel del agua proporcionando una medición precisa.	Un sensor tipo radar permite medir sin contacto físico directo, el nivel de las aguas superficiales con la ayuda de la tecnología de radar por impulsos. Este tipo de sensor se monta en una estructura auxiliar (brazo) por encima de la superficie del agua. El margen de medición varía desde 10 a 35 metros.	Un sensor de burbujeo neumático compacto para medir el nivel de agua consiste en una bomba de émbolo integrada que comprime el aire y lo expulsa mediante un conducto de presión que está empalmado a través del cabezal de burbujeo. Con este sensor se obtiene el nivel del agua, depende la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua en el conducto. El cabezal de burbujeo debe estar sumergido en el agua.	Este tipo de sensores mide la presión hidrostática por medio de un cabezal o célula de medición y determina a partir de estos datos el nivel de agua compensado con la presión atmosférica.
Ventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • Medición fiable y sin variación de punto cero. • Diseño compacto. • Bajo consumo de energía. • Registrador de datos integrado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia energética. • Diseño compacto. • Medición sin contacto físico directo. • Medición mediante salidas estándar compatibles con la mayoría de plataformas en el mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición indirecta sin variación del punto cero. • Medición mediante salidas estándar compatibles con la mayoría de plataformas en el mercado. • Diseño robusto. • Función de auto limpieza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cabezal de medición de cerámica resistente. • Medición mediante salidas estándar compatibles con la mayoría de plataformas en el mercado. • Diseño robusto.
Desventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento mecánico continuo. • Mediciones erróneas en pozos sedimentados y niveles bajos. • Mantenimiento continuo del pozo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones erróneas por obstáculos que puedan estar fijos entre el sensor y la superficie del agua. • Mediciones erróneas por disminución y desplazamiento del caudal del río, por lo que es recomendable que la estructura del brazo sea ubicada en la mitad del río. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere instalación de obra civil para el cabezal de burbujeo y conducto de presión. • Por su diseño, la medida en caudales con corrientes y sedimentos abundantes no es óptimo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere instalación de obra civil para el cabezal. • Su funcionamiento no es óptimo en caudales con corrientes y sedimentos abundantes.
Marcas más usadas			
<ul style="list-style-type: none"> • OTT Thalimendes. • Siap+Micros T039 TIDROM. • Sutron SDR. 	<ul style="list-style-type: none"> • OTT Kalesto. • Rittmeyer MPUL. • OTT RLS. • SEBA Puls. • Sutron RLR. • Siap+Micros T030. 	<ul style="list-style-type: none"> • OTT CBS. • Siap+Micros T024 TLPD05. 	<ul style="list-style-type: none"> • Keller 46X.

8.1.1.5 Procedimientos para la toma de niveles

A continuación, se describe el procedimiento para la toma de niveles, que depende del tipo de equipo utilizado, bien sea de observación directa o continua.

Si se utiliza un limnómetro

Para el registro de las lecturas de la mira, el observador debe proceder de la siguiente manera:

- ♦ Cuando se tenga acceso a la mira, se debe hacer una limpieza sobre la lámina y a su alrededor, para quitar objetos que puedan interferir con la lectura.
 - ♦ Pararse de frente a la mira para verificar que tenga una posición vertical nivelada (sin ningún tipo de inclinación causada por el cabeceo o balanceo).
 - ♦ Para la lectura de la mira (en lo posible), es necesario que los ojos estén al frente, lo más cerca posible a la lámina graduada del instrumento y al nivel actual del agua. En caso que el acceso a la estación sea restringido, se pueden utilizar binoculares o cualquier elemento que permita tener mayor precisión en la lectura.
 - ♦ El observador debe realizar la lectura en sentido ascendente, registrando el numerador (que representa el tramo de mira en metros) y la escala menor en centímetros. El numerador de la lectura actual (oculto por el agua) corresponde a 1 metro por debajo del numerador visible, lo cual se debe tener en cuenta al registrar el dato.
 - ♦ La lectura se debe registrar en la *libreta para observaciones* (Anexo 8-1), para el caso del observador y en el *formato de lecturas fluviométricas* (Anexo 8-2) por el técnico que hace la inspección de la estación. El valor debe escribirse en cm junto con la fecha y hora de registro.
- ♦ Cuando se presenta oleaje en el río, se deben hacer varias lecturas y promediarlas para obtener un único valor.
 - ♦ En caso de que la mira quede en seco o sedimentada, se debe despejar, limpiar y hacer un canal para que el agua llegue hasta la mira y se pueda registrar el dato de nivel.
 - ♦ Cuando se presentan crecidas que superan el nivel máximo de las miras instaladas, el observador debe realizar una marca (en un árbol, muro, talud, entre otros) o definir puntos de referencia para establecer hasta dónde llegó la creciente, de tal manera que cuando el técnico haga la visita se pueda determinar el valor de la lectura extraordinaria. De igual forma, debe quedar registrada la fecha y hora de la creciente (en caso de conocerse).

Se recomienda que, durante la visita, el técnico evalúe si el observador está siguiendo el procedimiento para medición y registro de las lecturas de la mira de acuerdo con los estándares establecidos. Esto con el fin de identificar posibles fuentes de error y hacer las correcciones en los casos que aplique, al transcribir la información al *formato de lecturas fluviométricas* (Anexo 8-2).

Si se utiliza un máxímetro

Su operación se basa en hacer una inspección después de una creciente; en el caso de los máxímetros de tubo se debe:

- ♦ Retirar la tapa superior del máxímetro y sacar el soporte cilíndrico con los recipientes.
- ♦ Identificar el frasco superior que contenga agua.
- ♦ Determinar el nivel máximo alcanzado por la corriente, en concordancia con la cota del plano cero del máxímetro.
- ♦ Anotar el valor leído.
- ♦ Lavar los recipientes, para la próxima lectura.

Si se utiliza un limnógrafo

En la estación *limnográfica* (LG) se debe retirar la gráfica y hacer una primera evaluación para determinar adelantos o atrasos en la escala de tiempo; posteriormente, se debe verificar si hay coincidencia entre el nivel registrado y el observado en la mira en el momento del retiro de la gráfica. Realizada esta actividad se procede, en presencia del observador, a plotear (colocar) las lecturas de mira y de máxímetro sobre la gráfica, para poder determinar la calidad de las lecturas de mira.

En caso de encontrar inconsistencias en los datos registrados por el observador, se hace la revisión del procedimiento seguido para identificar las posibles fuentes de error y tomar las medidas necesarias para mejorar la lectura. En caso de que persista la situación, es conveniente considerar un cambio del observador.

Si se utilizan instrumentos de medición automática o radares

Con respecto al *Registro Automático de Niveles-RAN* y de *estaciones de radar*, considerando que los datos digitales del RAN se almacenan en una Plataforma Colectora de Datos (por sus siglas en inglés, DCP), estos pueden ser bajados a un computador portátil y almacenados o transmitidos a la base de datos central. También pueden ser transmitidos vía telefónica, celular, radio o satélite a la estación central de recepción, donde son procesados y almacenados.

Recomendaciones adicionales en los procedimientos para la lectura de nivel según la OMM

A fin de evitar lecturas con valores negativos, el medidor debe estar instalado de modo que la lectura del valor cero sea inferior a la altura del agua más baja

prevista. Es importante mantener la misma cota del cero de la mira durante todo el período de registro.

Los diferentes limnógrafos se ajustan tomando como referencia un medidor auxiliar flotante de cinta graduada o un limnómetro situado en el interior del pozo de amortiguación. Se necesita una estaca, rampa graduada o medidor de cable lastrado, referidos a la misma cota del cero de la mira con el fin de comparar la elevación de la superficie del agua en el pozo de amortiguación con la del río.

Suelen haber pequeñas diferencias de niveles debidas a la velocidad con que ingresa el agua desde los tubos conductores al pozo. Diferencias de gran magnitud indican que las conducciones de toma pueden estar obstruidas.

Recomendaciones adicionales para el mantenimiento de instrumentos de medición

Para mantener en funcionamiento una instalación limnimétrica (LM) se deben tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- ♦ Visitar la estación periódicamente para realizar el mantenimiento (limpieza de escombros y vegetación que interfieran alrededor de la estación), revisar su estado, en cuanto a la parte física, operación por parte del observador y en específico lo correspondiente a continuidad y calidad de los datos.
- ♦ Verificar la posición de los diferentes tramos de limnómetro instalados en la estación. No deben existir desplazamientos laterales del tope de la mira y los tramos deben estar empalmados, es decir, que el final de cada tramo corresponda con el inicio de la mira siguiente.

- ♦ Verificar las cotas cero (limnómetro y maxímetro), con el fin de identificar posibles problemas de hundimiento o levantamiento del instrumento.
- ♦ Cambiar los tramos de la reglilla que se encuentren averiados, especialmente cuando la pintura o esmalte se encuentre borrosa o ilegible.
- ♦ Revisar los numeradores que identifican los diferentes tramos de la estación.

8.1.2 Caudales

El caudal es el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo y se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o en litros por segundo (l/s) cuando se manejan pequeñas magnitudes. Las mediciones de caudales (aforo líquido) no conducen al conocimiento de la variación continua de estos, sino solamente a la determinación de una magnitud en ciertos instantes.

El aforo líquido es un procedimiento que consiste en realizar en campo, una serie de mediciones, las cuales se pueden agrupar en tres categorías: 1) medición de la velocidad y sección de la corriente, 2) medición del volumen de agua y el tiempo de acumulación, y 3) medición de la dilución de una solución o de un trazador (SCMH, 1974).

Para determinar la variación continua de los caudales, es necesario encontrar relaciones con mediciones permanentes de otros parámetros hidrológicos como el nivel, la profundidad, el volumen de agua acumulada en un periodo, etc. En el caso de la relación nivel-caudal, se obtienen parejas ordenadas que facilitan la calibración de la sección de aforos, la cual se plasma en la curva de gastos o de calibración. Esta curva se puede representar a través de una ecuación o mediante una tabla de datos con pares ordenados.

La obtención de esta curva se describe de manera detallada en la guía para la construcción de una curva de calibración.

La medición del caudal (aforo líquido) la realizan los técnicos en campo y se registra en el *formato cartera de aforos* (Anexo 8-4). También se utiliza el *formato aforo y cálculo del caudal* (Anexo 8-5), para los aforos por vadeo.

La exactitud de la medición del caudal depende del período de tiempo necesario para efectuarla y de la variación de la altura del agua y del caudal durante la observación. Las variaciones significativas en las condiciones durante la medición aguas arriba o aguas abajo pueden influir en el resultado, por lo que conviene evitarlas (OMM, 2011).

La necesidad de medir el caudal de una corriente de agua se puede dar de acuerdo con los siguientes propósitos, entre otros:

- Protección de la navegación marítima y terrestre.
- Diseño de obras civiles (alcantarillados, presas, carreteras, etc.).
- Diseño y operación de centrales hidroeléctricas.
- Planificación y control de riego y drenaje en actividades como la agricultura, ganadería y silvicultura.
- Pronóstico de inundaciones y estiajes, prevención y atención de desastres naturales y estudios de riesgo.
- Gestión de aprovechamientos hídricos.
- Planeación municipal, departamental y nacional.
- Sector académico, investigación, programas internacionales de intercambio de datos y programas internacionales de investigación.

8.1.2.1 Selección de puntos

Para el monitoreo de caudales, no es necesario que las mediciones se efectúen exactamente en el

mismo lugar que las de nivel, ya que el caudal suele ser el mismo a lo largo de un tramo de la corriente en las proximidades del instrumento de medida (OMM, 2011), siempre y cuando en ese tramo no existan aportes-extracciones significativos que alteren la medición del caudal.

Los criterios para la selección del sitio de monitoreo son los mismos que para el monitoreo de niveles (8.1.1.1 *Selección de puntos*). Adicionalmente, es importante que la corriente muestre líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente y deben ser normales a la sección transversal de aforos, de tal manera que la medición de la velocidad sea precisa para la obtención del caudal. Cualquier desviación en las líneas de flujo produce alteración en la magnitud, por cuanto vectorialmente no corresponde al 100 % de la velocidad, sino a una componente de la misma.

Un aspecto por tener en cuenta es que, si se necesita conocer en un sitio la variabilidad de los caudales de manera sistemática (lo cual se logra a través de la relación nivel-caudal), en el sitio en donde se realicen las mediciones de caudales puntuales se deben tener instalados equipos de medición de niveles, siguiendo los criterios descritos en la sección anterior.

8.1.2.2 Frecuencia

La medición de caudal se debe realizar periódicamente, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Buscar cubrir el rango de variación del régimen natural de la corriente (aguas altas, aguas bajas y períodos de transición).
- En caso de existir eventos extremos (mínimos o máximos), es deseable adelantar jornadas de vigilancia de aforos, con el fin de registrar el dato extremo, lo

cual facilita la construcción de las curvas de gasto y/o validar los cálculos de extrapolación en estos rangos de valor.

- Considerar la dinámica del lecho y taludes de la sección de aforos, de tal forma que, a mayor estabilidad, menor frecuencia de medición en un año hidrológico. En caso contrario, se debe aumentar la frecuencia de medición con el propósito de tener el mayor número de aforos necesarios para representar la sección transversal promedio.
- El paso de tiempo de la serie que se desea construir, define el nivel de incertidumbre permisible que está dado por la cantidad de aforos medidos para la construcción de una curva. Es decir que, para una serie diaria, se requiere una mayor periodicidad que para una serie mensual.

8.1.2.3 Tipos de medición y procedimiento de aforo

Para la medición del caudal en una corriente en un instante dado, se han desarrollado diversos métodos de aforo cuya elección depende de las condiciones halladas en un emplazamiento en particular, como el tamaño del cauce, la magnitud del caudal, las características hidráulicas del flujo, la necesidad de contar con datos inmediatos o a corto plazo y, en general, de la logística disponible para realizar el aforo, entre otros.

Existen diferentes métodos de medir el caudal, entre los cuales se encuentran: *método área-velocidad*, *método volumétrico*, *método con trazadores (dilución)* y *estructuras aforadas*.

La Tabla 8-2, muestra un resumen de las recomendaciones de uso de cada método de aforo, de acuerdo con el caudal y sección de aforo.

Tabla 8-2. Recomendaciones de uso de los métodos de aforo.

Método de aforo		Sección	Caudal o velocidad	
Método área - velocidad	Molinete hidrométrico	Por vadeo	Profundidad < 1m	V<1 – 3 m/s
		Por suspensión	Profundidad > 1m	V>1 – 3 m/s
		Angular	Grandes ríos donde se requiere apoyo topográfico para medir posición del bote en su recorrido.	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
		Bote cautivo	Ríos o canales medianos que permitan extender y alinearse con manila.	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
		Lancha en movimiento	Ríos muy anchos y caudalosos.	Velocidad en general entre 1 y 3 m/s
	Flotadores		Muy baja profundidad, presencia de grandes cantidades de material en suspensión, o en situaciones que comprometan la integridad de los aforadores.	No especificado. Baja precisión.
	ADCP		ADCP: hasta 220 m de profundidad. Pequeños a grandes ríos.	Velocidades hasta 9 m/s
	FlowTracker 2		Flujo laminar. Cuerpos de agua de flujo bajo y no tan profundos, con un mínimo de 0.02 m.	V<4 m/s
Volumétrico		Pequeña (< 1 m ²).	Q<100 l/s	
Dilución con trazadores		Presencia de cantos rodados de gran tamaño, poca profundidad, lechos inestables y flujo turbulento.	Turbulencia, velocidades muy altas. Baja precisión.	
Estructuras aforadoras	Vertederos	Pequeñas (< 1 m ²).	V<0.15 m/s	
	Canaletas	Pequeñas (preferible <2.5 m ancho).	Q<4 m ³ /s	

Fuente: (MAVDT & IDEAM, 2011).

Método área-velocidad

Dado que el caudal es función del área de la sección ocupada por el agua y la velocidad media del flujo, el procedimiento se basa en la determinación de dichas variables. Este sistema de aforo es el de mayor uso y requiere que las líneas de flujo sean normales a la sección transversal de aforo.

El caudal en una corriente de agua es función del área de la sección de aforos y de la velocidad media del flujo, se obtiene mediante el producto de estas dos variables (Ecuación 8-1):

$$Q=V*A$$

Ecuación 8-1

La medición de caudales por este método, se establece a través de la selección de número de vértices, determinación del ancho, profundidad,

cálculo del área, caudal y medición de la velocidad en ciertos puntos representativos de la sección (Figura 8-15).

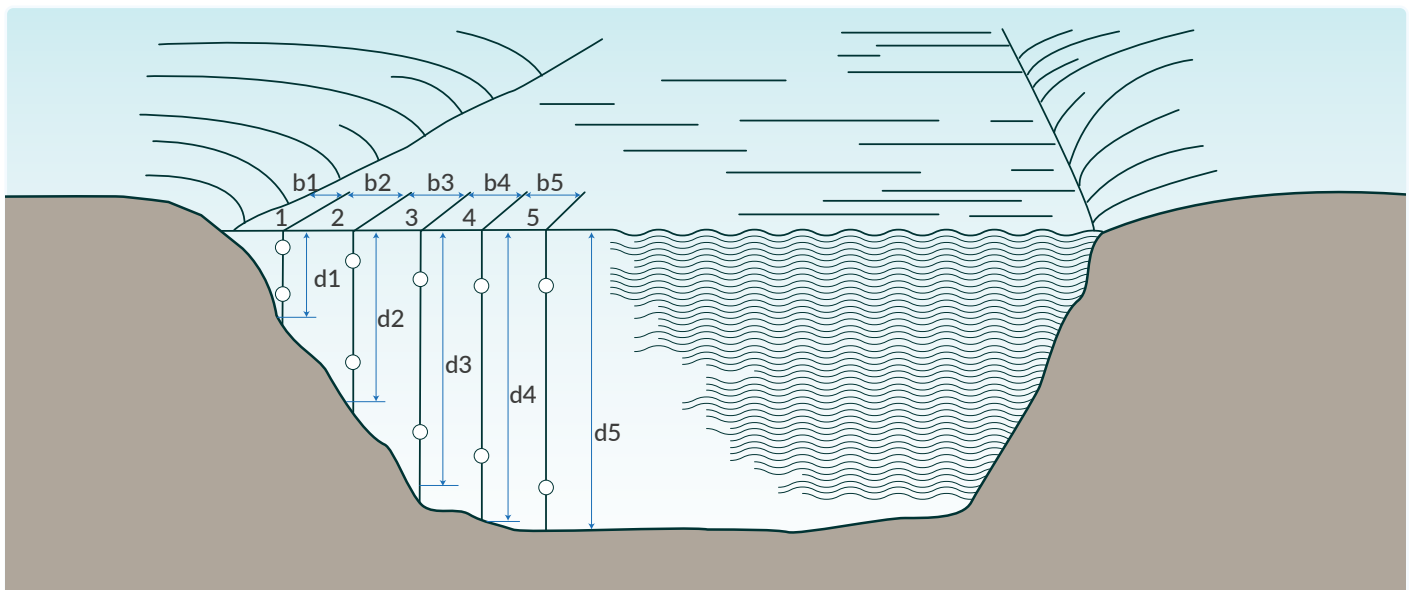


Figura 8-15. Posición de puntos de observación en la sección trasversal de una corriente.
Fuente: (OMM, 2011).

El primer paso para el aforo es la medición del ancho de la corriente, a partir de un punto de referencia fijo-PR (por lo general, un punto inicial en la orilla), que debe estar situado en el mismo plano que la sección transversal. Luego se establece el número

total de verticales de aforo y la distancia entre estas, determinadas mediante una cinta métrica que se tiende provisionalmente a través del río, o también de marcas semipermanentes pintadas en la baranda de un puente o en un cable de suspensión (tarabita). En

grandes ríos pueden utilizarse sistemas de telemetría o prácticas de triangulación para medir las anchuras. Se recomienda que el abscisado sea cada metro en corrientes pequeñas, mientras que, en ríos grandes, se pueden llegar a mediciones distanciadas cada 5 m.

El área de la sección es determinada mediante sondeos de profundidad y ancho de la corriente.

La profundidad del flujo en la sección transversal se mide en las verticales por medio de una varilla o hilo de sondeo (cable coaxial).

La profundidad media de la sección es el promedio de las dos profundidades sucesivas, para cada una de las secciones parciales (Ecuación 8-2):

$$P_{media} = \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$$

Ecuación 8-2

Donde,

P_{media} : Profundidad media entre verticales.

P_1 y P_2 : Profundidades en verticales sucesivas.

El área de una sección parcial corresponde a la superficie de cada tramo en que se ha dividido el cauce,

la cual se encuentra multiplicando la profundidad media por el ancho parcial (Ecuación 8-3):

$$A_p = P_{media} * a_p$$

Ecuación 8-3

El área total de la sección de aforos se obtiene sumando las áreas de las secciones parciales.

Al tiempo que se mide la profundidad, se efectúan observaciones de la velocidad mediante un (Direct

Industry, 2020), (Figura 8-16) en uno o más puntos de la vertical. Las anchuras, profundidades y velocidades medidas permiten calcular el caudal para cada segmento de la sección transversal.

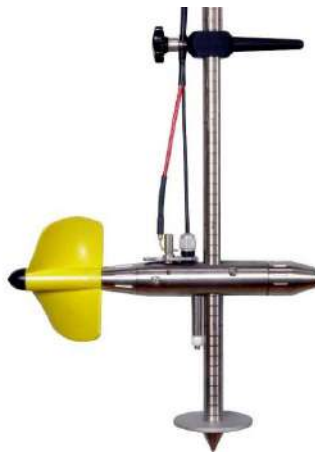


Figura 8-16. Molinete hidrométrico. Fuente: (Direct Industry, 2020).

El producto del área parcial multiplicada por la velocidad media de la sección parcial define el caudal

parcial, que corresponde al caudal que pasa por cada tramo del cauce (Ecuación 8-4):

$$Q_p = A_p * V_{p.media}$$

Ecuación 8-4

Donde,

Q_p : Caudal parcial.
 A_p : Área parcial.
 $V_{p.media}$: Velocidad media de la sección parcial.

La suma de estos caudales parciales corresponde al caudal total (Ecuación 8-5):

$$Q_T = A_T * V_m$$

Ecuación 8-5

Donde,

Q_T : Caudal total.
 A_T : Área total.
 V_m : Velocidad media del aforo.

Las verticales de aforo pueden coincidir con las verticales de medición de profundidad. Sin embargo, en secciones con geometría irregular, se puede requerir de un mayor número de mediciones de la profundidad a fin de representarla en mayor detalle. El número de verticales de aforo se establece de acuerdo con la regla que indica que es necesario disponer mínimo de 10 verticales (recomendable que sean entre 15 a 25) de medición de la velocidad y, adicionalmente, entre dos verticales sucesivas no debe pasar más del 10 % del caudal total (SCMH, 1974), con el fin de evitar errores por sobreestimación o subestimación. En caso de sobrepasar este porcentaje, se recomienda volver a ejecutar el aforo con un abscisado más denso.

La medición de la velocidad en la vertical de aforo se realiza con el objetivo de obtener la velocidad media, para lo cual es necesario seleccionar puntos representativos teniendo en cuenta la distribución normal de las velocidades de flujo desde la superficie del agua hasta el lecho de la corriente (Figura 8-17). Existen varios métodos que se establecen según los porcentajes de profundidad, en los cuales se posiciona la hélice del molinete para la toma de velocidades puntuales en función del número de revoluciones y el tiempo de muestreo. Entre estos se destacan (SCMH, 1974): 1) medición completa, 2) medición en cinco puntos, 3) método 0.2 – 0.8, 4) método 0.6, 5) método 0.2 – 0.6 – 0.8, 6) medición subsuperficial, 7) medición superficial, y 8) integración en profundidad.

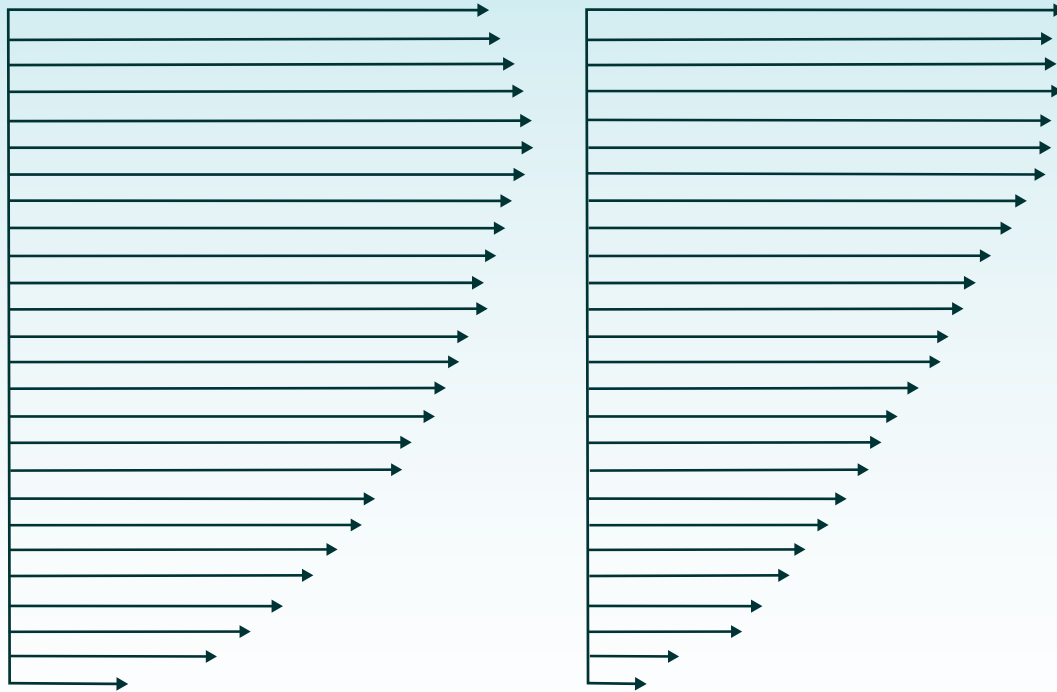


Figura 8-17. Distribuciones normales de velocidades de flujo en la vertical. Fuente: Adaptado de SCMH, 1974.

La medición completa, denominada también procedimiento de la curva de distribución de velocidades, consiste en medir las velocidades en por lo menos 10 puntos de la vertical, distribuidos a distancias generalmente iguales entre la superficie y el fondo.

La medición en cinco puntos de la vertical, requiere mediciones de velocidad en la superficie a 0.2 - 0.6 y 0.8 de la profundidad total y en un punto cercano al fondo. La velocidad media se obtiene por la siguiente relación (Ecuación 8-6):

$$V_m = \frac{V_s + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_f}{10}$$

Ecuación 8-6

Ambos procedimientos permiten obtener, generalmente, resultados bastante exactos, sin embargo, debido a que exigen cantidad de trabajo, no se em-

plean frecuentemente, salvo en secciones con características de flujo irregular que no permiten aplicar otros métodos más simplificados (SCMH, 1974).

En el método de dos puntos (0.2-0.8) Las observaciones de velocidad se hacen en cada vertical

colocando el molinete al 20 % y 80 % de la profundidad total por debajo de la superficie (Figura 8-18).

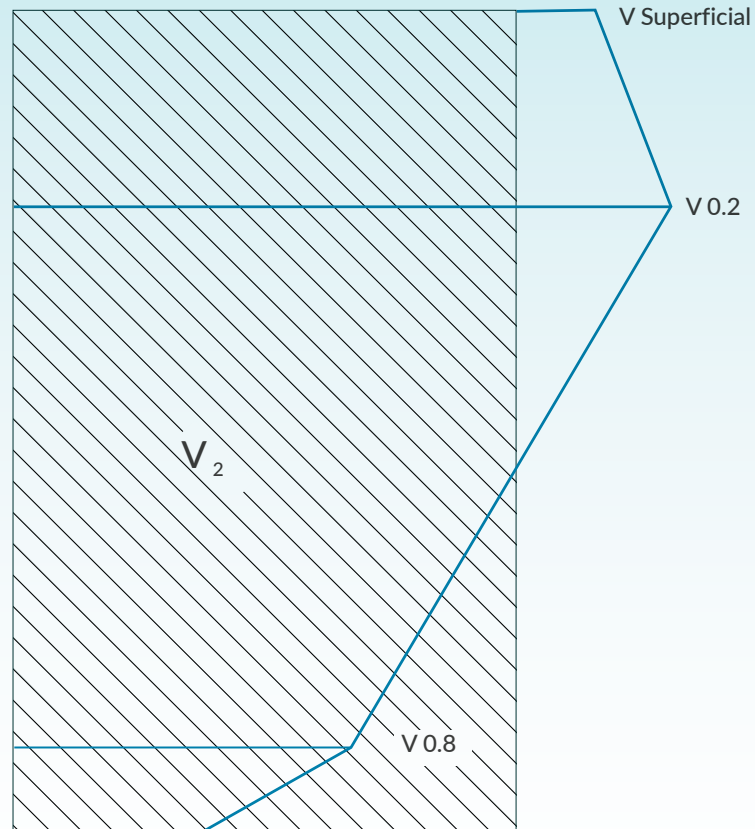


Figura 8-18. Método de dos puntos (0.2-0.8) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical. Fuente: (IDEAM, 2006).

El promedio aritmético de los dos valores puede considerarse como velocidad media en la vertical (Ecuación 8-7). Este método es el más empleado y

se usa cuando ya se conoce el comportamiento de la velocidad en la sección, obtenido mediante mediciones detalladas en los primeros aforos.

$$V_m = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2}$$

Ecuación 8-7

El método 0.6, consiste en medir la velocidad en cada vertical, colocando el molinete al 60 % de la profundidad total por debajo de la superficie, (Figura

8-19). El valor obtenido se considera como la velocidad media de la vertical. Este método se emplea en secciones de poca profundidad, pero no menores a

40 cm, para evitar que la hélice del molinete roce con el fondo del cauce o con cualquier elemento que se encuentre en él. Para profundidades menores, la

velocidad obtenida al 50 % es representativa para utilizarla en el cálculo del aforo.

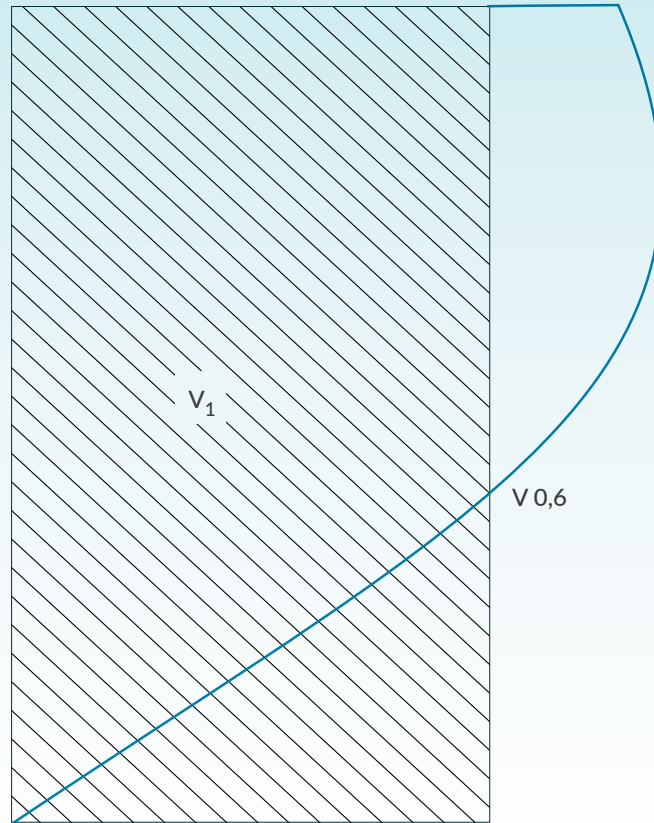


Figura 8-19. Método de un punto (0.6) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical.
Fuente: (IDEAM, 2006).

El método de 0.2 - 0.6 - 0.8, combina los dos métodos anteriormente indicados (Figura 8-20). Se aplica cuando hay ciertos criterios de duda sobre las velocidades medidas a 2/10 u 8/10 de la vertical, en el caso que, por ejemplo, la velocidad puntual a 0.8 resulte insegura a raíz de la turbulencia producida

por las irregularidades del lecho de la corriente. La velocidad media se calcula por promedio ponderado, que da un coeficiente doble a la velocidad medida a 0.6 por la mayor representatividad que tiene en la distribución vertical (Ecuación 8-8).

$$V_{media} = 0.25 (V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})$$

Ecuación 8-8



Figura 8-20. Método de tres puntos (20%-60%-80 %) para la medición de la velocidad del flujo en la vertical.
Fuente: (IDEAM, 2006).

La medición subsuperficial, supone medir la velocidad en un solo punto, por debajo de la superficie del agua, situado generalmente a 0.2 de la profundidad total desde la superficie, con el fin de deducir el valor de la velocidad media en la vertical, a través de la correlación entre las velocidades 0.2 y promedio, determinadas por aforos anteriores más completos. Este procedimiento puede conducir a resultados satisfactorios y se aplica con el fin de simplificar los aforos en secciones ya estudiadas hidrométricamente, o cuando, durante avenidas, no se pueden efectuar aforos más detallados (SCMH, 1974).

En el método superficial, similar al subsuperficial, se realizan mediciones de velocidad 20 cm por debajo

de la superficie del agua. Este método se utiliza para medir la velocidad en crecientes, las cuales no permiten, por efecto de las palizadas, efectuar aforos convencionales, el objetivo es proteger el equipo hidrométrico por su alto costo.

Cuando se utiliza este tipo de aforo, se emplea el factor K para convertir la velocidad superficial a velocidad media en la vertical (Ecuación 8-9). Cuando no se tienen aforos anteriores y por consiguiente no se ha calculado el factor de conversión para cada uno de los aforos, se emplea 0.85, cifra promedio obtenida en experimentación en canales (IDEAM, 2006).

$$V_{media} = K * V_{superficial}$$

Ecuación 8-9

La integración en profundidad, es la medición continua de las velocidades del flujo en la vertical de aforo, obtenida por desplazamiento uniforme del molinete entre la superficie y el fondo de la corriente. La velocidad de descenso o ascenso del molinete no debe ser superior al 5 % de la velocidad media del flujo y en todo caso debe estar comprendida entre 0.04 y 0.10 m/s. En cada vertical se realizan dos ciclos

completos y si los resultados difieren de más de 10 %, se repite la medición.

Para determinar la velocidad media de la sección de aforos, se toman secciones parciales a las cuales se les van calculando sus velocidades de la siguiente manera: se toma una sección entre verticales con velocidades conocidas, se promedian estas velocidades y el resultado es la velocidad media de la subsección, así (Ecuación 8-10):

$$V_{media} = \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

Ecuación 8-10

El método de área-velocidad se realiza con diferentes técnicas de aforo, entre las cuales se encuentran: molinete hidrométrico (vadeo, suspensión, angular, bote cautivo, lancha en movimiento), aforo con flotadores, aforo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) y aforo FlowTracker2 (FT2).

Molinete hidrométrico

Teniendo en cuenta las diferentes alternativas para medir el caudal, se determina el tipo de aforo con *molinete hidrométrico* (vadeo, suspensión, angular, bote cautivo, lancha en movimiento) que mejor se ajuste a las condiciones existentes al momento de la campaña de monitoreo; específicamente, es importante tener en cuenta la magnitud de la profundidad, el ancho, la velocidad, la disposición de estructuras de apoyo como puentes o tarabitas y el tipo de régi-

men de caudales predominante. Se puede emplear en la mayoría de las estaciones hidrométricas, en canales y cauces naturales, en donde se dispone de condiciones normales de flujo.

Como consideración adicional, es importante verificar que el cuerpo del molinete no cambie de dirección a medida que se avanza en la medición de los diferentes verticales de aforo.

Aforo por vadeo: se utiliza cuando la profundidad es menor de un metro (<1 m) y la velocidad de la corriente inferior a un metro por segundo (<1 m/s); en estos casos, el *micromolinete* se acopla a una varilla metálica que debe ser sostenida firmemente por el operario a cierta distancia de su cuerpo para evitar la alteración de las líneas de flujo (Figura 8-21).



Figura 8-21. Aforo por vadeo.

Estas condiciones permiten que los operarios y los equipos puedan ingresar al cauce con seguridad, y garantiza de esta manera que la medición se realice con comodidad y sin riesgo. En caso de monitoreos en corrientes de alta montaña, se recomienda estar atento a los cambios en el color del agua por aumento de sedimentos o cualquier otra señal que alerte frente al paso de una onda de creciente.

Aforo por suspensión: cuando las condiciones del flujo (profundidad y/o velocidad) presentan amenaza para los operarios y equipos, es neces-

rio realizar las mediciones desde un puente o una tarabita (Figura 8-22). Aquí los equipos van suspendidos desde un malacate o torno a través de un cable coaxial, que adicionalmente es utilizado para medir la profundidad en las diferentes abscisas de medición. Con el fin de que la corriente arrastre lo menos posible el molinete fuera de la vertical de aforo, en la parte inferior de este se agrega un escandallo o pesa de forma hidrodinámica que normalmente pesa entre 25 y 75 kg, en función de la velocidad del flujo.



Figura 8-22. Aforo por suspensión.

El molinete debe ser sumergido, y colocado en el punto deseado de la corriente. Allí se deja cierto tiempo a fin de que pueda vencer la inercia y alcanzar el movimiento acorde con la velocidad del flujo. Es necesario que se mantenga en un tiempo de por lo menos 50 segundos para realizar la medición, en caso de disponer de un contador automático de revoluciones, o más de 100 segundos cuando se hace con instrumentos comunes como un cronómetro. Cuando se obtenga la medición y se desee trasladar el molinete al punto de aforo siguiente, se debe sacar y colocar en la nueva posición.

Cuando se realiza el aforo por suspensión y el ángulo (φ) que forma el cable del malacate presenta una inclinación respecto a la vertical que supere 8° , debido a la presión de la masa de agua en movi-

miento, se debe aplicar una corrección especial para obtener la altura real. Los factores de corrección que se emplean normalmente en estos casos tienen en cuenta, tanto los ángulos de inclinación del cable en relación con la vertical, como la curvatura de la parte sumergida de este.

El procedimiento consiste en medir, con un transportador, el ángulo de arrastre, redondeando el resultado al grado más próximo y teniendo en cuenta que de ninguna manera este ángulo debe ser superior a 30° . La relación entre la profundidad exacta (d) y la profundidad registrada (d_{ob}), basada en el ángulo (φ) medido y en la distancia entre la superficie del agua y el punto de suspensión de la línea de sondeo (x) (Figura 8-23) es la siguiente (Ecuación 8-11), (IDEAM, 2007):

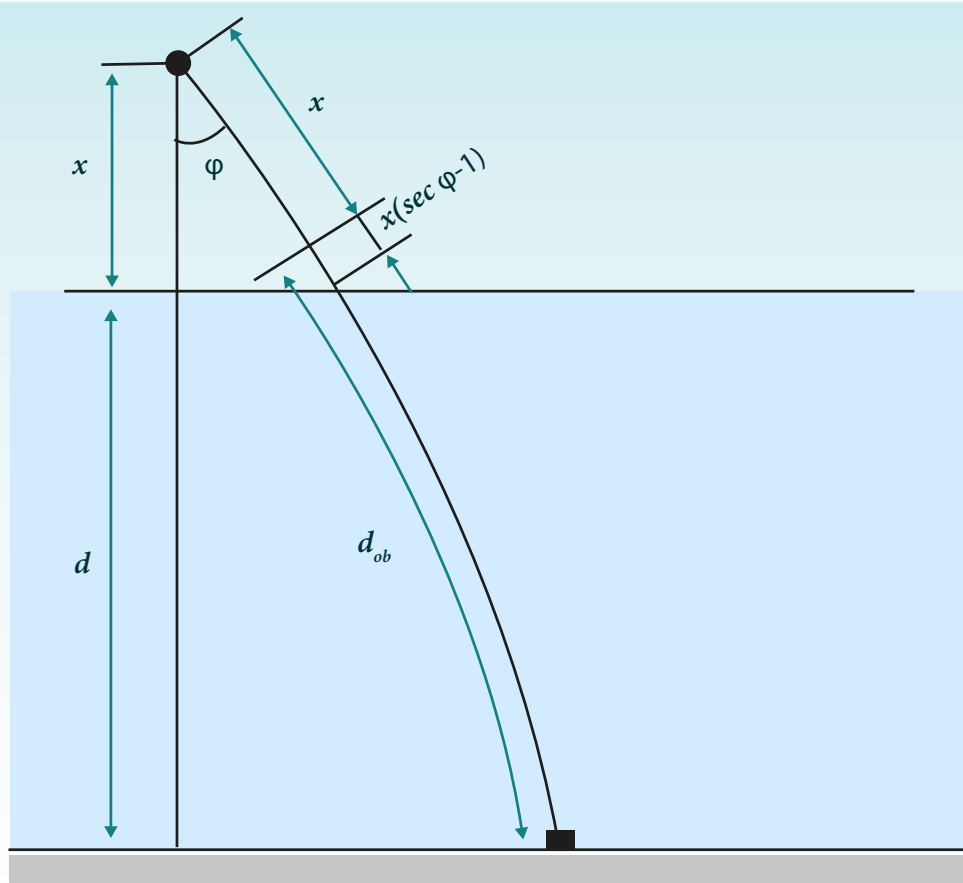


Figura 8-23. Relación entre la profundidad correcta (d) y la profundidad observada (d_{ob}).
Fuente: Adaptado de OMM, 2011.

$$d = [d_{ob} - x (\sec \phi - 1)] [1 - k]$$

Ecuación 8-11

Los valores de k , que se presentan en la Tabla 8-3, se basan en el supuesto que la presión de arrastre ejercida sobre el escandallo, en la capa de agua relativamente tranquila, próxima al fondo, pueda despreciarse y que la línea de suspensión y el escandallo estén diseñados de modo que ofrezcan poca resistencia a la corriente (IDEAM, 2006).

Tabla 8-3. Factor de corrección K para valores dados de ϕ .

ϕ°	k	ϕ°	k	ϕ°	k
4	0.0006	14	0.0098	24	0.0296
6	0.0016	16	0.0128	26	0.035
8	0.0032	18	0.0164	28	0.0408
10	0.005	20	0.0204	30	0.0472
12	0.0072	22	0.0248	32	0.0544

Fuente: (OMM, 2011).

Aforo angular: aplicado en grandes ríos, cuando la definición del abscisado no se puede realizar por mediciones directas con cinta o con marcaciones indirectas registradas en puentes o tarabitas. Para este tipo de aforos, es necesario el apoyo topográfico para ubicar, a través de la sección del río, la posición que debe tener la lancha en el momento del aforo. Como su nombre lo indica, se basan en el cálculo de ángulos que definen la distancia de una vertical cualquiera respecto a una base de referencia (HIMAT, 1988).

El método angular teodolito (Figura 8-24), consiste en disponer de un bote con motor fuera de la borda sobre el cual se monta el equipo hidrométrico en su totalidad; por medios topográficos, el bote se localiza en diversos puntos a lo largo de la sección de aforos; dichos puntos corresponden a las verticales de medición en las cuales se toman parámetros como profundidad y velocidades puntuales. El procedimiento consiste en:

1. Determinar la sección de aforos, en lo posible normal a la corriente.
2. Definir por medios topográficos el ancho de la sección entre dos puntos ubicados en las dos orillas.
3. Determinar la base de medición paralela al río, longitud mínima (un tercio del ancho de la sección). Esta base debe formar en lo posible, un ángulo de 90° con la recta que define la sección de aforos.
4. Definir el número de verticales de medición y su distancia a un punto de referencia.
5. Calcular por medio de la función tangente, los ángulos (formados por la línea base y la visual de

la embarcación) que determinan la posición del bote para cada una de las verticales.

6. Una vez posicionado el bote con el motor en marcha debe mantenerse en el punto predeterminado mediante la visual del teodolito y un alineamiento establecido en una de las orillas. En la sección de aforos, posteriormente, se procede a la toma de profundidad y velocidad.
7. Las operaciones enunciadas se facilitan utilizando señales de referencia. En caso de grandes ríos es necesario emplear medios de comunicación como equipos de radio portátiles.

El método angular sextante, es una variación simplificada del sistema anterior. La posición del bote para cada una de las verticales de medición se determina desde la embarcación por medio de un sextante, instrumento náutico para medir ángulos horizontales y verticales, ayudado por banderolas situadas en puntos de control en las orillas y base de referencia, cuya posición es previamente determinada. Como en el caso anterior, es necesario definir con anticipación el ancho de la sección, la longitud de la base de referencia, el ángulo formado, número de verticales y la distancia o espaciamiento entre estas. Conocidos estos datos, se entran a calcular los diversos ángulos que identifican cada vertical utilizando la función tangente. Cada ángulo se lleva al sextante de acuerdo con un método de aproximación. Con la coincidencia de los puntos de control y el desplazamiento del bote se determina el punto de medición de profundidades y velocidades, además de la distancia respecto al punto de referencia hasta cubrir la totalidad de la sección de aforos (HIMAT, 1988).

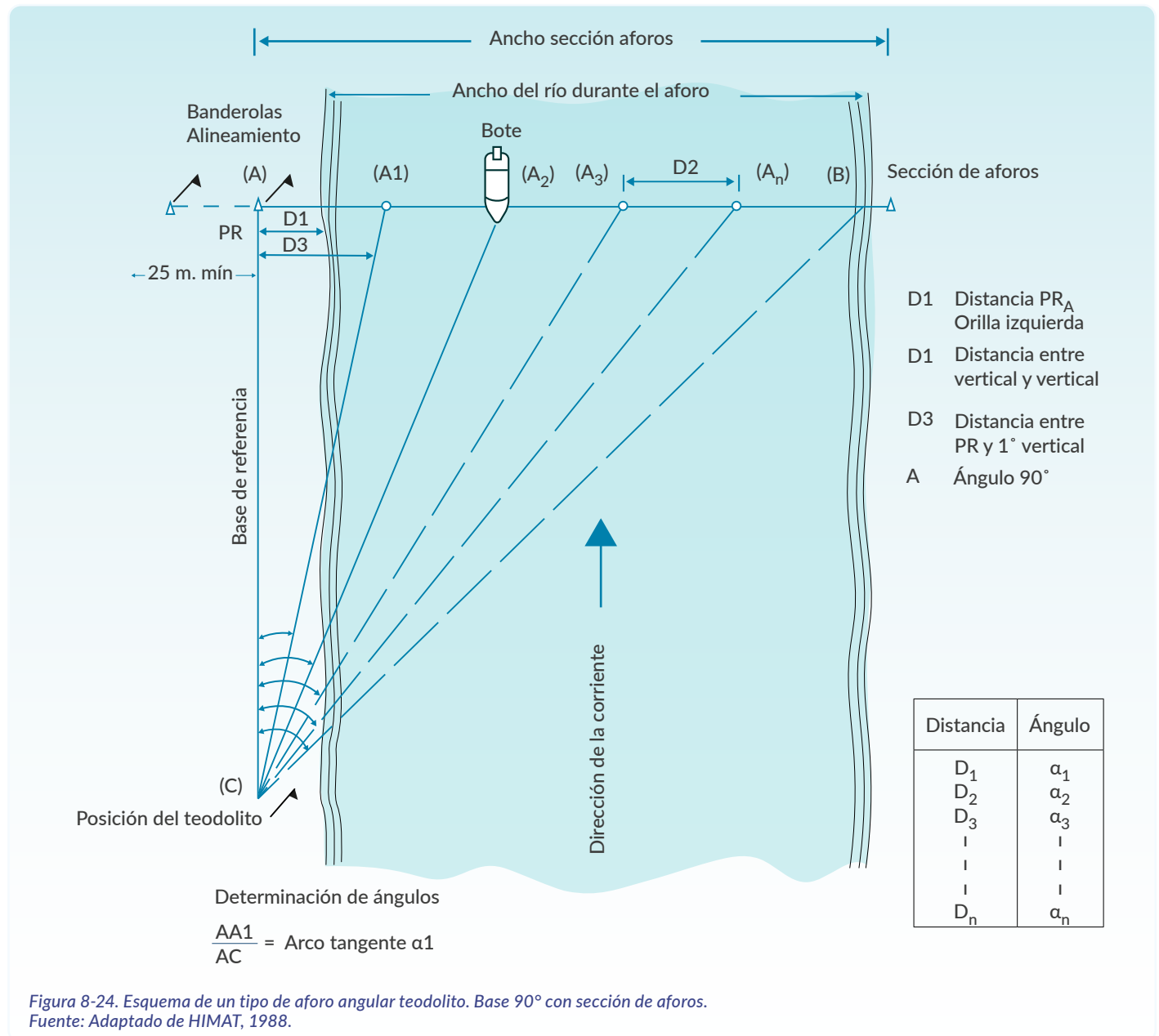


Figura 8-24. Esquema de un tipo de aforo angular teodolito. Base 90° con sección de aforos. Fuente: Adaptado de HIMAT, 1988.

Aforo en bote cautivo: aplicable en ríos o canales medianos, donde es posible tender una manila o cable de orilla a orilla, que sirve de apoyo a la embarcación para contrarrestar el empuje de la corriente.

La instalación de tarabitas y puentes hidrométricos en todas las estaciones resulta costosa y, además,

contribuye a obstaculizar la navegación fluvial, por tanto, se recurre a instalaciones de tipo transitorio que eliminan estos inconvenientes.

El sistema de bote cautivo consiste en tender un cable de una orilla a otra; el diámetro y resistencia del mismo depende de la longitud, velocidad de la corriente

y dimensiones del bote. Este debe ir orientado contra la corriente y sujeto al cable mediante una cuerda de

longitud considerable que permita disminuir las turbulencias durante las mediciones (Figura 8-25).

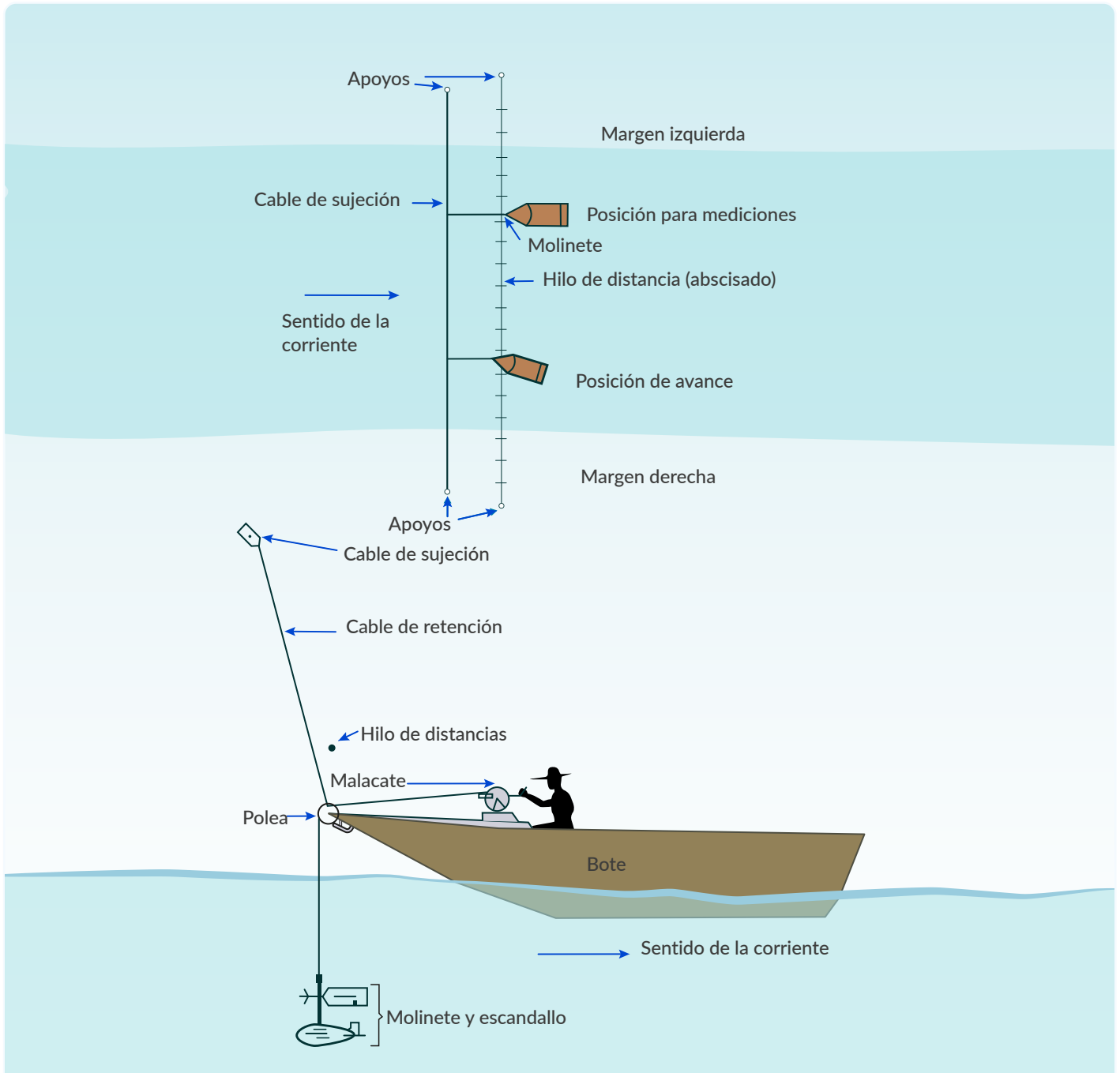


Figura 8-25. Esquema de un aforo con bote cautivo.
Fuente: Adaptado de HIMAT, 1988.

El avance de la embarcación se logra aprovechando el empuje que el agua ejerce sobre los costados al colocarse en forma oblicua a la dirección de la corriente. La distancia entre las verticales se controla mediante una cuerda adicional, dispuesta para tal fin. La toma de velocidades y profundidades se realiza como en los casos antes mencionados.

Aforo con lancha en movimiento: se utiliza en ríos muy anchos y caudalosos. Se instala en un bote un molinete especialmente diseñado, que indica los componentes de la corriente y los valores instantáneos de la velocidad. Las mediciones se realizan atravesando el río a lo largo de un recorrido pre-establecido, perpendicular a la corriente. Durante la travesía, efectuada sin detenerse, una ecosonda

registra la geometría de la sección transversal y el molinete, en funcionamiento continuo, mide las velocidades combinadas de la corriente y del bote. Estos datos, recogidos en 30 a 40 puntos de observación (verticales) a través del recorrido, se convierten en caudales. La velocidad registrada en cada punto de observación de la sección transversal es un vector de cantidad que representa la velocidad relativa de la corriente que pasa por el mecanismo del molinete.

Para la ejecución de aforos por el método de lancha en movimiento, es necesario fijar puntos en las dos orillas, los cuales definen la sección de aforos, los puntos de alineamiento y la base, como se observa en la Figura 8-26.

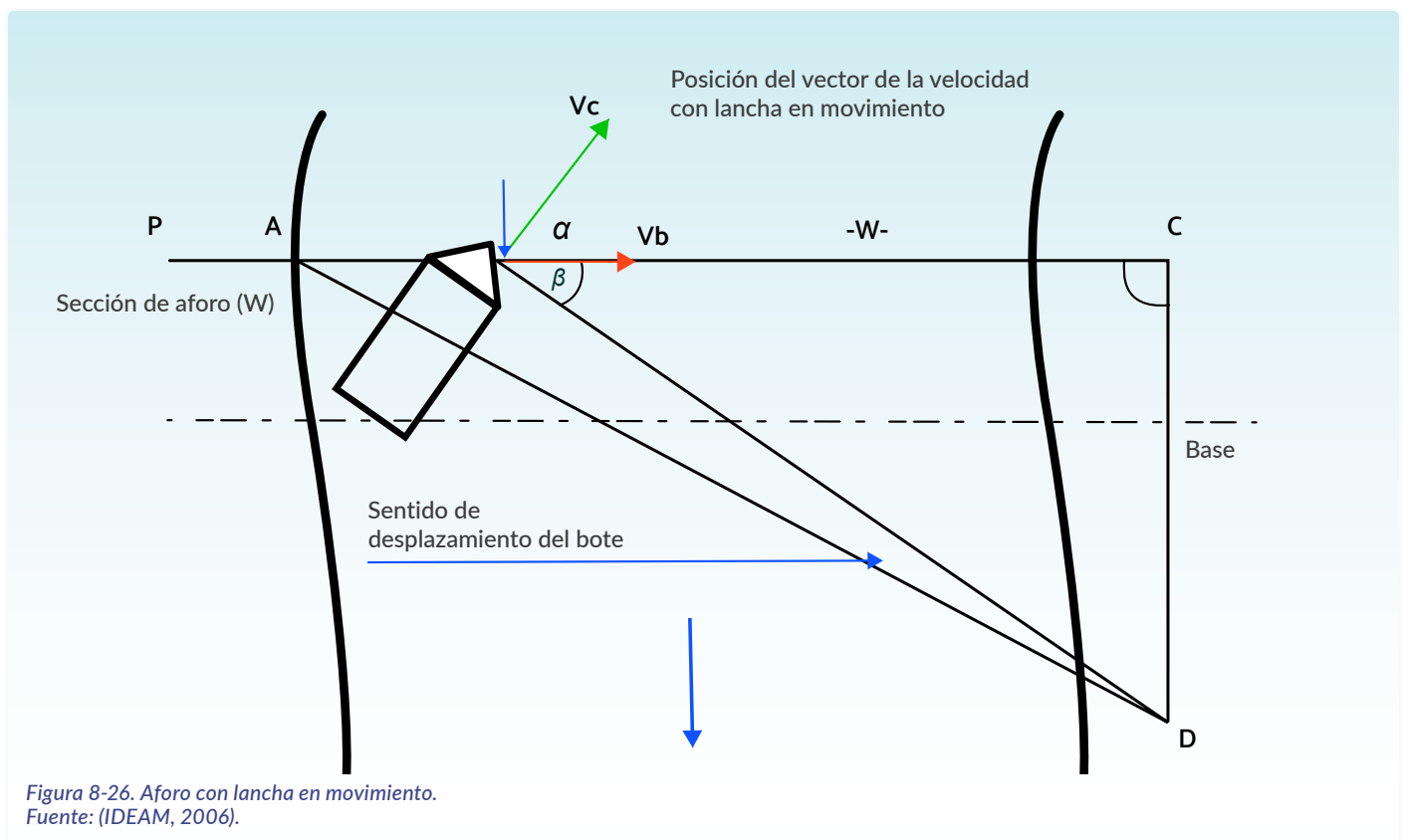


Figura 8-26. Aforo con lancha en movimiento.
Fuente: (IDEAM, 2006).

Para la determinación del ancho de la sección (W) es necesario fijar puntos en ambas orillas (P) y (C), en lo posible por fuera del nivel de aguas altas. Esta sección de aforos, con la base C-D, debe ser construida de tal manera que el ángulo Beta (β) se

encuentre entre 15° y 75° para facilitar una mayor precisión tanto en el cálculo como en la localización del objetivo al momento de la observación. La metodología de corrección se explica a continuación (Figura 8-27):

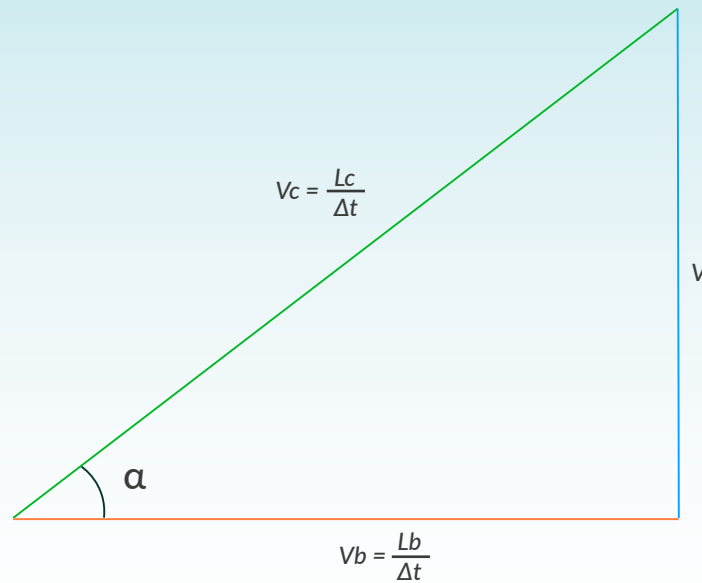


Figura 8-27. Sumatoria de vectores de velocidad.

La velocidad (V_c), corresponde a la medición con el molinete, y es la resultante de V (velocidad del flujo en la sección transversal) y V_b (velocidad de la embarcación).

Alpha (α) representa el ángulo que forma la hélice con la trayectoria de la sección transver-

sal y define la dirección del vector resultante (V_c), (Smoot & Novak, 1969).

La velocidad de la corriente (V) perpendicular al recorrido del barco (curso real), en cada uno de los puntos de observación, se determina a partir de la (Ecuación 8-12):

$$V = V_c * \text{Seno} (\alpha)$$

Ecuación 8-12

De la Figura 8-27 se deduce la Ecuación 8-13:

$$L_b = V_c * \text{Coseno} (\alpha) * \Delta t$$

Ecuación 8-13

Donde L_b es la distancia que el barco ha recorrido a lo largo del curso real entre dos puntos de observación consecutivos, siempre y cuando la velocidad de la corriente sea perpendicular al recorrido (Smoot & Novak, 1969).

Como la velocidad medida con el molinete corresponde a (Ecuación 8-14):

$$V_c = \frac{L_c}{\Delta t}$$

Ecuación 8-14

Y, por tanto:

$$L_c = V_c * \Delta t$$

Entonces (Ecuación 8-15):

$$L_b \approx L_c * \text{Coseno}(\alpha)$$

Ecuación 8-15

L_c corresponde a la distancia relativa a través del agua entre dos puntos de observación consecutivos. Se debe considerar que la distancia entre puntos de observación es relativamente corta, y que el ángulo α se puede considerar constante (Smoot & Novak, 1969).

El caudal se calcula de manera similar al método convencional área-velocidad, sumando los productos de las áreas de los segmentos y las velocidades medias en cada sección parcial.

Como el molinete generalmente se sitúa a un metro por debajo de la superficie, es necesario el uso de un coeficiente para ajustar la velocidad medida. En ríos grandes, el coeficiente es generalmente uniforme a través de la sección. Investigaciones efectuadas en varios ríos han mostrado que el coeficiente varía entre 0.9 y 0.92.

El método de lancha en movimiento proporciona una única medida del caudal, es decir, una observación en la relación nivel-caudal con una aproximación de más o menos del 5 % para un 95 % de nivel de confianza.

• Aforo con flotadores

Se utiliza cuando se requiere medir en forma rápida, pero poco precisa, el caudal en una corriente que presenta una lámina de pocos centímetros de profundidad, cuando se está en presencia de grandes cantidades de material en suspensión, cuando deba efectuarse una medición del caudal en un período muy breve, en situaciones que comprometan la integridad de los aforadores o cuando no se justifica la compra de dispositivos de aforo más precisos. En estos casos, se mide la velocidad superficial a lo ancho del cauce utilizando flotadores especiales, diseñados y suministrados para este fin (Figura 8-28).

Los flotadores miden la velocidad superficial del agua. Durante la medición, se registra el tiempo que tarda un pequeño flotador en recorrer una distancia conocida (usualmente 10 m) marcada previamente sobre un tramo recto y uniforme (Briones & García, 1997).

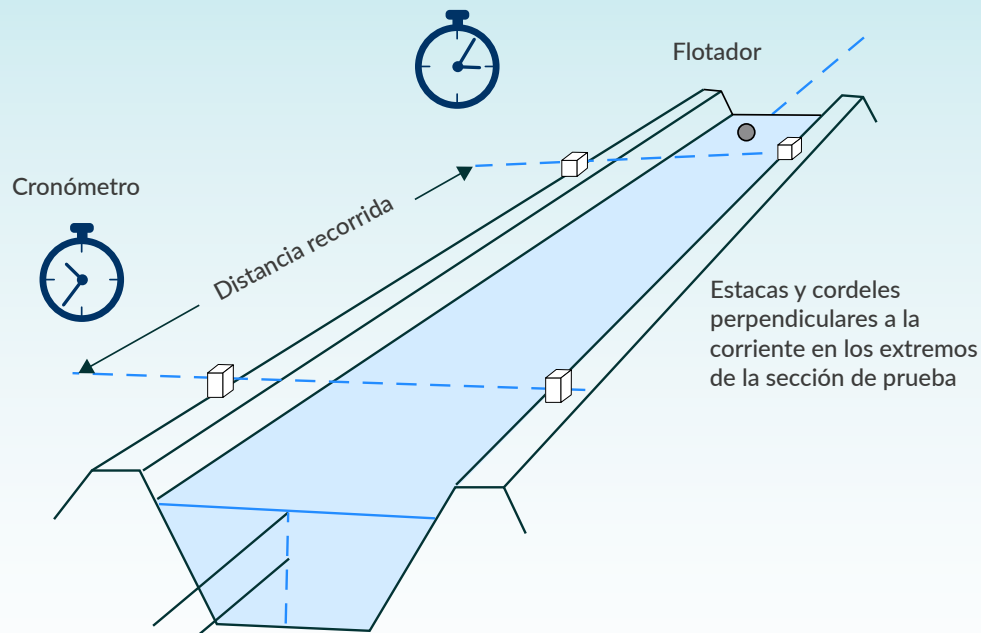


Figura 8-28. Medición de la velocidad superficial del agua con un flotador.
Fuente: Adaptado de Briones & García, 1997.

Normalmente, se toman las velocidades a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho de la sección, para lo cual se selecciona un tramo de la corriente, limitado por dos secciones, entre las cuales las líneas de flujo deben ser paralelas. En la sección uno, se colocan los flotadores y en la sección dos se registra la llegada y se anota el tiempo de desplazamiento de cada uno de los flotadores. Posteriormente, se calcula la velocidad para cada flotador y la velocidad media en la corriente se obtiene promediando las tres velocidades, observando que, para láminas pequeñas, la velocidad en la vertical es uniforme, por lo cual la velocidad superficial es representativa para toda la sección de aforo. Las distancias entre el flotador y la margen al paso de cada sección transversal se determinan a través de medios ópticos adecuados, por ejemplo, un teodolito.

La velocidad del flotador es igual a la distancia entre secciones transversales dividida por el tiempo de desplazamiento. Deben obtenerse, como mínimo, cinco valores de velocidad del flotador en cada segmento, y la media de estos valores se multiplica por un coeficiente para obtener la velocidad media del agua en cada uno de ellos. El coeficiente está basado en la forma del perfil de velocidad vertical y en la profundidad relativa de inmersión del flotador. El coeficiente por aplicar a la velocidad medida se determina, en lo posible, en cada punto de observación mediante un análisis de las mediciones de caudal efectuadas con el molinete.

Cuando no se disponga de tales resultados puede utilizarse un factor de ajuste (F) para efectuar una estimación aproximada (Tabla 8-4).

Tabla 8-4. Factor de ajuste F de la velocidad de un flotador en función del coeficiente R entre la profundidad del flotador sumergido y la profundidad del agua.

R	F
0.10 o menos	0.86
0.25	0.88
0.5	0.9
0.75	0.94
0.95	0.98

Fuente: (OMM, 2011).

Otra posibilidad consiste en representar gráficamente la velocidad del flotador en función de la correspondiente distancia desde la margen, con el fin de determinar la velocidad superficial media al través del río. Como la velocidad superficial es mayor que la velocidad promedio del caudal, se hace necesario corregir la medición dada por el flotador, a través de un coeficiente (*K*) que varía de 0.65 (pequeños caudales) a 0.85 (grandes caudales), (Briones & García, 1997), (IDEAM, 2006).

La velocidad media del flujo en la sección transversal es igual a la velocidad superficial media multiplicada por el coeficiente *K* que igual puede ser deducido de las mediciones precedentes efectuadas mediante un molinete para caudales menores.

El área de la sección transversal se establece por medio de sondeos de profundidad y medición del ancho del cauce. El caudal correspondiente a cada segmento se calcula multiplicando el área promediada de su sección transversal y la velocidad media del flujo en este. El caudal total es la sumatoria de estos.

Entre los objetos que pueden servir como buenos flotadores se encuentran una bola de caucho, un trozo

de madera, un limón, una hoja seca o un envase de plástico tapado (Briones & García, 1997).

• **Aforo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)**

Se utiliza para medir el caudal en ríos grandes o pequeños, sin presencia de rocas de gran tamaño, lo cual permite el desplazamiento horizontal del equipo para la medición.

Los instrumentos ADCP, basados en el efecto Doppler, pueden instalarse en una embarcación en movimiento, como se observa en la Figura 8-29 (B). El instrumento mide en forma simultánea la velocidad, profundidad del agua y la trayectoria de la embarcación para calcular el caudal. Este método permite calcular el caudal parcial a medida que la embarcación atraviesa el río. El resultado de una medición no es suficiente para proporcionar un valor exacto del flujo-caudal; únicamente proporciona una imagen instantánea del flujo. Para conseguir un valor más exacto del caudal del río es importante calcular el promedio de varios transectos. Para calcular el caudal en un emplazamiento se recomienda efectuar como mínimo cuatro recorridos a lo largo de la sección de aforos (OMM, 2011).

Cuando un instrumento ADCP procesa la señal reflejada por las partículas del agua, divide la columna de agua en varios segmentos discretos apilados a lo largo de la vertical; estos segmentos se denominan *celdas de profundidad*. Un instrumento ADCP determina la velocidad y dirección de cada celda de profundidad. Al mismo tiempo, la señal proveniente del fondo, denominada *pista de fondo*, mide la velocidad y dirección de la barca. Esto significa que la barca no tiene que atravesar perpendicular el flujo.

Los procedimientos utilizados para obtener datos de calidad son cada vez más estándares en

todo el mundo. El número de transectos depende de la diferencia entre las mediciones del caudal. Si el caudal correspondiente a cualquiera de los cuatro transectos difiere en más de un 5 %, se debe efectuar, como mínimo, otro adicional para obtener la medición del caudal a partir del promedio de los cinco recorridos. En ocasiones se efectúa un número mayor de transectos para reducir los posibles errores sistemáticos de la dirección. El usuario debe configurar los instrumentos antes de comenzar las operaciones y el modo de configuración seleccionado depende de las condiciones en el

emplazamiento (profundidad y velocidad del agua, etc.) en el momento de la medición.

Es importante seleccionar el modo adecuado para conseguir la mayor exactitud de las mediciones del caudal. El usuario determina la profundidad y distancia apropiadas desde el ADCP hasta las márgenes, y se asegura que el cabeceo, balanceo y la velocidad de la barca-instrumento estén dentro de unos límites aceptables durante las mediciones. Un error sistemático en alguna de estas puede dar lugar a un importante error sistemático en los valores del caudal resultantes (OMM, 2011).



Figura 8-29. Medición de caudal con ADCP. A: Río Amazonas. B: Río San Juan. C: Transmisión del ADCP al computador. Estación Rumichaca, río Guaitara.

El ADCP utiliza el efecto Doppler para transmitir el sonido a una frecuencia fija y escuchar los ecos retornados por los reflectores presentes en el agua, como pequeñas partículas o plancton, que reflejan el sonido hacia el ADCP, los cuales se mueven a la misma velocidad horizontal del agua.

Cuando el sonido enviado por el ADCP llega a los reflectores, este se mueve a una mayor frecuencia debido al efecto Doppler como se observa en la Figura 8-30; este desplazamiento es proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y los reflectores.

Parte de este sonido desplazado es reflejado hacia el ADCP donde se recibe desplazado una segunda vez. Los archivos generados por el equipo, como gráficas y tablas de trayectos, pueden llevarse a un software como Excel para plotear los resultados del aforo.

En el momento de la medición del caudal, el instrumento ADCP debe estar debidamente calibrado, según los manuales correspondientes con su referencia. Del mismo modo, este instrumento debe estar conectado y transmitiendo señal a un computador para el cálculo del caudal (Figura 8-31).

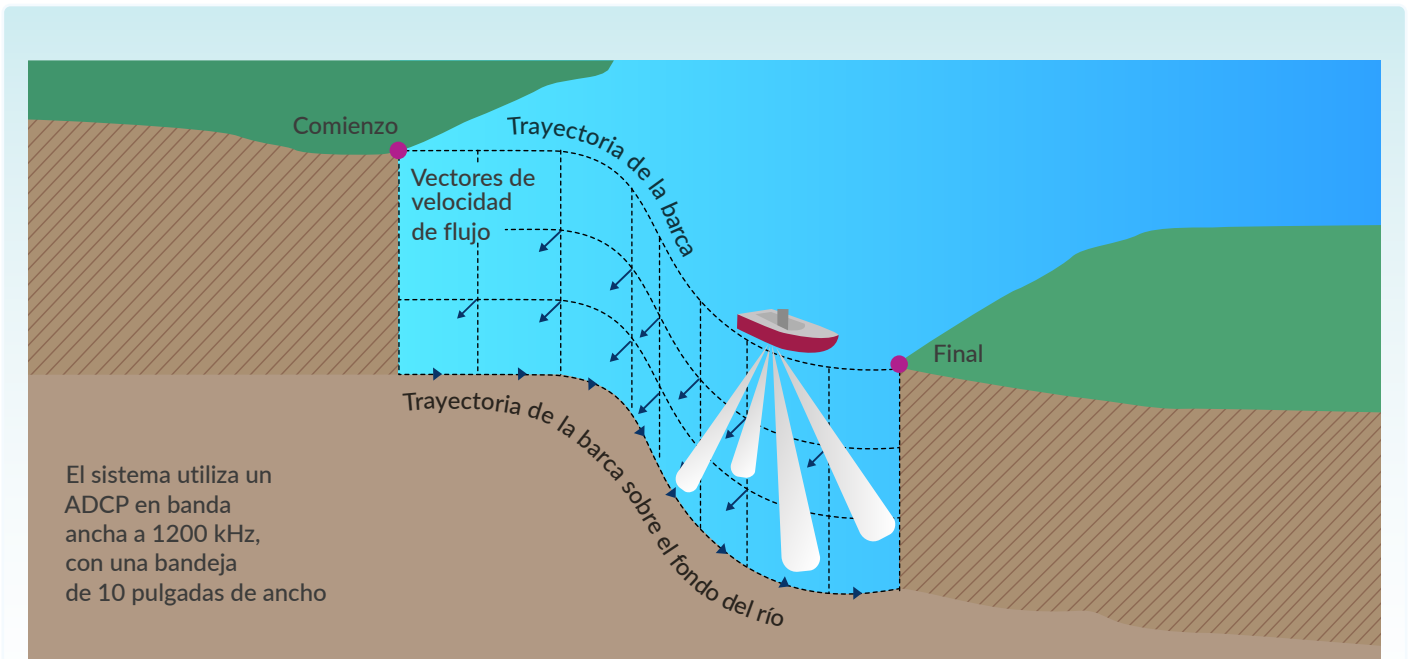


Figura 8-30. Configuración típica de una medición con un instrumento de efecto Doppler.
Fuente: Adaptado de OMM, 2011.

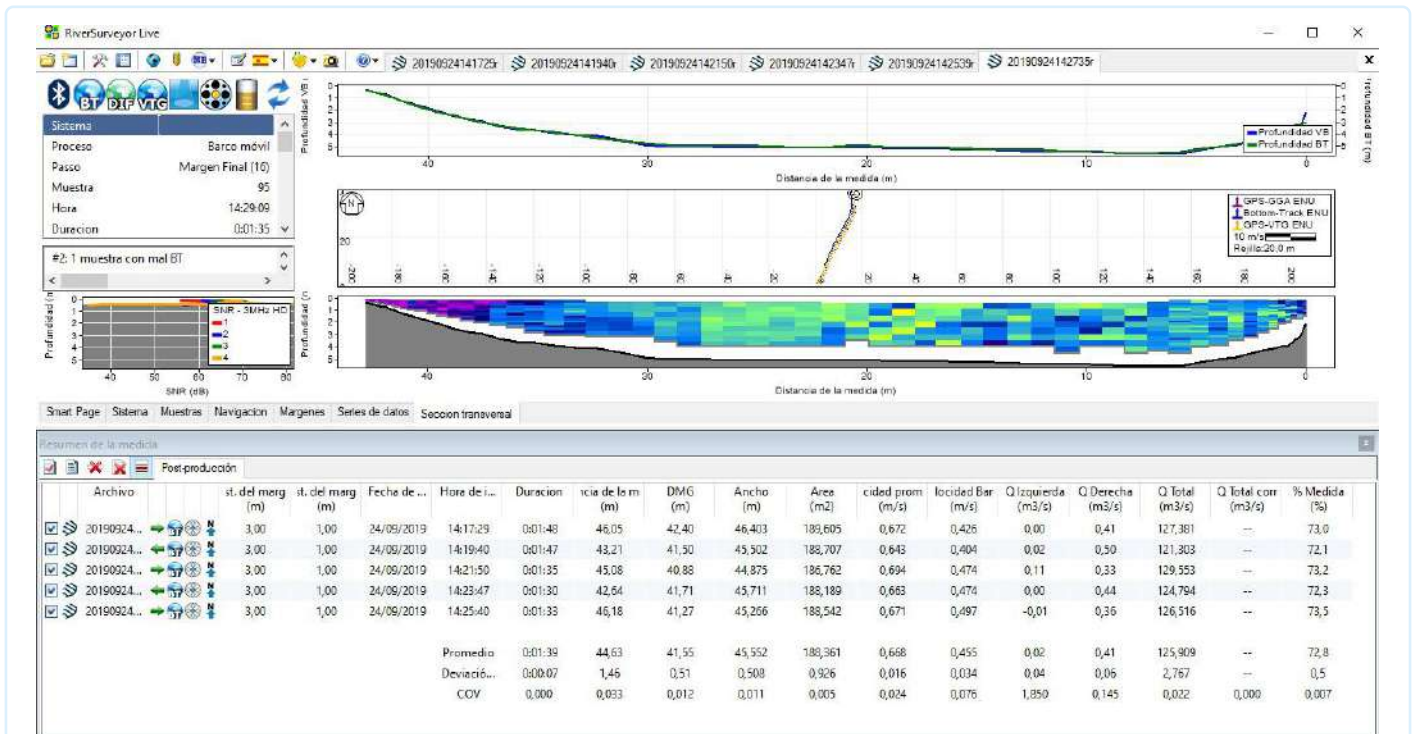


Figura 8-31. Salida de un ADCP.

- **Aforo FlowTracker2 (FT2)**

Este instrumento de medición de caudal, opera por medio de tecnología acústica, es decir, que funciona bajo el principio de efecto Doppler¹. Es fabricado

1. El efecto Doppler es el fenómeno por el cual la frecuencia de las ondas percibida por un observador varía cuando el foco emisor o el propio observador se desplazan uno respecto al otro.

<https://www.fisicalab.com/apartado/efecto-doppler>

por la compañía *SonTek-a Xylem Brand* y su mayor precisión se da particularmente en cuerpos de agua de flujo bajo y en aguas no tan profundas. La recolección de datos en el plano horizontal se hace de manera bidimensional o tridimensional y depende del sensor que se adquiriera (Figura 8-32).



Figura 8-32. Sondas de medición bidimensional y tridimensional.

La conexión entre el sensor y el equipo se hace por medio de un cable de 1.5 m con posibilidad de extender hasta los 10 m. La varilla de vadeo es ajustable y práctica para facilitar la medición de profundidades totales del lecho y para ubicar la profundidad de medición del sensor; además la varilla cuenta con un adaptador para anclar el equipo y permite que una sola persona lo opere y realice la medición.

Su operación es muy sencilla e intuitiva, la interfaz que utiliza para el desplazamiento entre comandos lo hace muy fácil de manejar, el color de la pantalla y el ajuste del brillo de la misma, permiten al operador del equipo una visualización clara de la medición que está realizando. Las dimensiones y el peso del equipo, además de su capacidad para resistir las condiciones adversas del trabajo en campo (golpes, agua y polvo), facilitan su transporte y operación.

El FT2 funciona con ocho baterías AA alcalinas o recargables que otorgan una autonomía de operación de aproximadamente 10 horas continuas. El equipo posee una memoria interna de 2 GB que le permite almacenar

tanto las mediciones realizadas como las plantillas con la información base de cada lugar de monitoreo, para no tener que diligenciar esta información cada vez que se realice una visita al mismo lugar (Figura 8-33).



Figura 8-33. Medición en campo con equipo caudalímetro FlowTracker2.

El FT2 tiene incorporado un GPS con una precisión de hasta 2.5 m, que permite georreferenciar aproximadamente el lugar de muestreo, además cuenta con un Bluetooth que tiene un rango de conexión hasta 10 m, esto permite hacer conexión con el computador de campo para visualizar y verificar los datos durante la medición y realizar ajustes de ser necesario. También viene equipado con un sensor para medir la temperatura del agua y un sensor de inclinación que genera una alerta sonora y visual que indica la mala ubicación del sensor dentro del agua.

La operación del equipo, en cuanto a la recolección de información ya sea para el cálculo de caudal o para medición de velocidad y dirección del flujo, se lleva a cabo de la siguiente manera:

Al igual que la medición con molinete convencional, el muestreo con FT2 se debe realizar en una sección del río donde el flujo sea lo más laminar posible, es necesario retirar los escombros y la vegetación existente en la sección elegida, el lugar escogido debe ser de fácil acceso y seguro para el operador. Se debe extender una cinta métrica de orilla a orilla en la sección de

muestreo elegida, posterior a esto se divide la sección en el número de verticales necesarias dependiendo del ancho del río, en cada vertical se mide la profundidad y

dependiendo de esta, se elige el número de mediciones por realizar; el tiempo de recolección de datos en cada punto de medición es de 45 segundos.

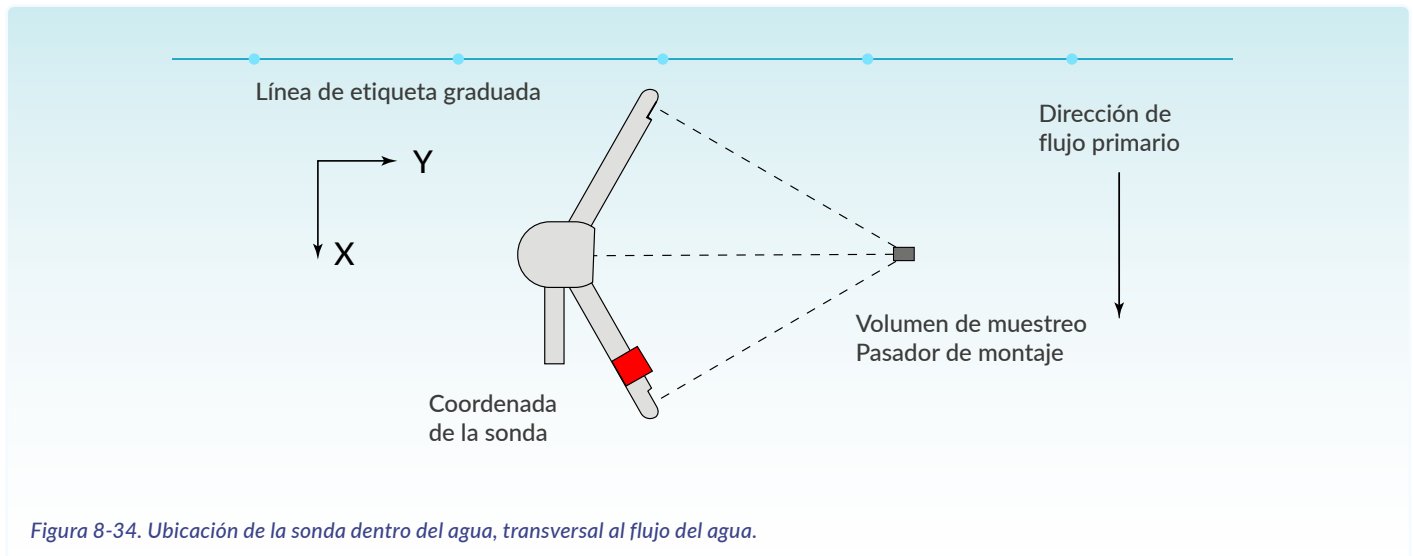


Figura 8-34. Ubicación de la sonda dentro del agua, transversal al flujo del agua.

En la Figura 8-34 se indica la ubicación correcta del equipo dentro del agua. Se debe siempre asegurar que la banda de color rojo ubicada en uno de los brazos del sensor esté apuntando aguas abajo.

Antes de iniciar la medición y teniendo el equipo dentro del agua, es muy importante que se realice una verificación del haz de sonido, con el fin de descartar cualquier daño o anomalía en el sensor, es el primer control de calidad de los datos que se efectúa en la medición.

Para iniciar con el cálculo de caudal, se le debe indicar al equipo en cuál de las orillas del río se va a empezar la medición, cuál es la profundidad en ese punto y a qué distancia desde el punto de referencia de la orilla se encuentra; en este caso esa información se convierte en la primera estación de muestreo. Para la segunda estación se ingresa de nuevo la profundidad y la distancia que se desplazó, se tiene como

referencia el mismo punto de partida y el número de verticales que se haya definido previamente, de esta manera se vadea toda la sección transversal hasta llegar a la orilla contraria; en la última estación de muestreo se debe ingresar la orilla en la cual se está terminando la medición además de la profundidad. Antes de finalizar y guardar la medición, el FT2 tiene la ventaja de permitir repetir la medición en una o varias verticales en las cuales se requiera de mayor información, o también se pueden adicionar verticales intermedias entre las ya establecidas, si así lo desea el operador del equipo.

Durante la medición, el operador del equipo puede visualizar en tiempo real, datos de caudal instantáneo, velocidad de flujo en cada haz de medición, señales de intensidad de ruido, ángulo de inclinación del sensor, dirección del flujo, temperatura del agua, y el nivel de la batería (Figura 8-35); esto

permite realizar algunos controles de calidad y efectuar las correcciones correspondientes para aumentar la precisión del muestreo.

Posterior al trabajo realizado en campo se procede a descargar, procesar y evaluar la información recolectada, el software del equipo permite visualizar gráficamente todas las mediciones realizadas, hacer

ajustes en cuanto a la configuración de la medición y del equipo, visualizar en paralelo diferentes mediciones de un mismo lugar de muestreo para hacer comparaciones, corregir errores de la medición, eliminar mediciones fuera de los rangos, visualizar las advertencias generadas y visualizar el resumen del caudal calculado y exportarlo en un informe.



Figura 8-35. Interfaz de visualización de parámetros durante medición. Fuente: (SonTek, 2018).

Tabla 8-5. Ventajas y desventajas del equipo FlowTracker2.

Ventajas	Desventajas
Fácil de operar.	El número y tipo de baterías para su operación.
Reduce el uso de papel y el error al diligenciar los datos.	Principalmente diseñado solo para vadeo.
Disminuye la incertidumbre y el error.	
Visualización de información en tiempo real de velocidad y caudal.	
Optimiza tiempos y operatividad.	
Diseño apto para condiciones de campo.	

En la Tabla 8-5. Ventajas y desventajas del equipo FlowTracker2 se describen algunas ventajas y desventajas del uso en campo del equipo FT2 y del procesamiento de la información en oficina.

Método volumétrico

El aforo volumétrico se realiza cuando se trata de medir caudales pequeños (de algunos pocos litros por segundo) en condiciones que no permitan el uso del molinete, o no se cuente con este equipo (Figura 8-36).

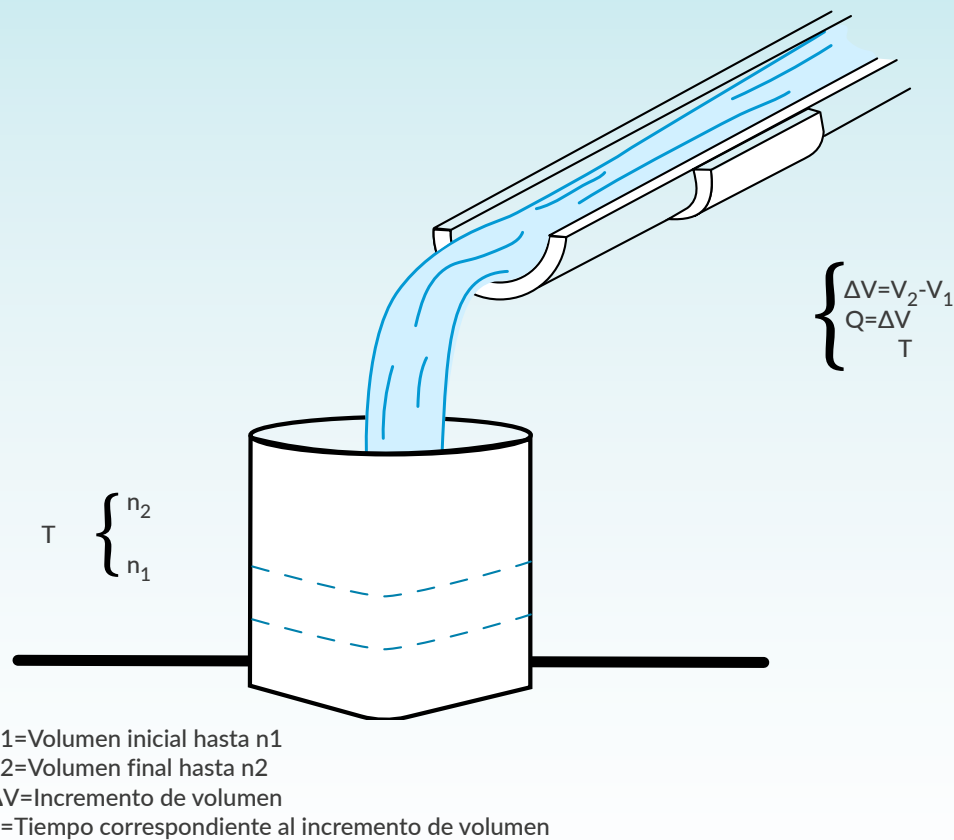


Figura 8-36. Aforo volumétrico.
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2006.

Se recomienda utilizarlo en corrientes pequeñas, en las cuales se pueda coleccionar en un recipiente calibrado, el 100 % del flujo por medir. La calibración del recipiente y el tiempo de recolección deben ser muy precisos para garantizar la buena calidad de la medición del caudal.

Para el método volumétrico, es necesario definir y adecuar la sección; para tal efecto, se recurre a recipientes de uso común como un balde o caneca que tengan registros de volumen; en otros casos, el aforo se realiza en tanques de mayor tamaño con dimensiones

precisas, de tal manera que, mediante la medición de un diferencial de nivel, se determina un incremento de volumen y, tomando el tiempo de este aumento, se puede calcular directamente el caudal que lleva la corriente o el canal.

La calidad de la medición depende del cuidado en las maniobras, por ejemplo, que ingrese al recipiente el 100 % del flujo, es decir, que no se presenten pérdidas y que la medición del tiempo sea muy exacta, para lo cual, en algunos casos, es necesario adelantar adecuaciones en el cauce con el propósito

de transportar el total del flujo al recipiente mediante ayudas adicionales, como una caña-guadua (media) o una canaleta, según la magnitud del caudal.

El caudal se obtiene por la relación entre el volumen recolectado en litros y el tiempo correspondiente en segundos (Ecuación 8-16):

$$Q = \text{volumen/tiempo}$$

Ecuación 8-16

Aforo con trazadores (dilución)

La medición del caudal mediante este método está basada en la determinación del grado de dilución en el agua de la corriente de una solución del trazador vertida en ella, como se observa en la Figura 8-37. Este método se recomienda para secciones de aforo donde se encuentren grandes turbulencias

y remolinos, régimen torrencial, altas pendientes, poca profundidad, lechos inestables y líneas de flujo desordenadas. Los aforos con trazadores también llamados *aforos químicos*, permiten conocer el caudal a partir de la variación de concentración de una sustancia inyectada en el cauce, con el fin de estudiar su comportamiento y evolución.



Figura 8-37. Ensayo con trazadores en el río Cravo Sur en el sector de La Cabaña, Yopal, Casanare.
Fuente: (Archivo Empresa Fluvia, 2014).

El desarrollo tecnológico permite hoy realizar aforos químicos de manera automatizada, evita el transporte de equipos de laboratorio y obtiene adicionalmente al caudal, otras variables de significativa importancia para el control hidrológico y el modelamiento de calidad del agua como parte de la gestión de vertimientos en ríos, como la velocidad, el área de la sección, los coeficientes de Manning y Chézy y la longitud de mezcla.

En las mediciones del caudal se pueden emplear dos (2) métodos en los que intervengan sustancias trazadoras; el primero basado en la *inyección de la sustancia a un caudal constante* y el segundo con *inyección (vertimiento) instantánea*.

La condición fundamental de la selección de los emplazamientos para la medición del caudal mediante el método por dilución, es que se produzca una mezcla homogénea de la solución inyectada en el agua de la corriente en un tramo relativamente corto de un canal. La mezcla se ve mejorada por las rugosidades del canal y la presencia de cantos rodados que aumentan la turbulencia de la corriente, tales como cascadas y estrangulamientos abruptos del curso del agua.

Seleccionado el sitio del emplazamiento o de medición, se debe determinar la distancia L aproximada en metros, requerida entre el sitio de inyección y el sitio de medición, la cual se puede calcular a partir de la (Ecuación 8-17):

$$L = 0.13 * C * \left(\frac{(0.7 * C) + 6}{g} \right) * \frac{b^2}{d}$$

Ecuación 8-17

Donde,

b : Ancho medio del río

d : Profundidad media de la corriente

C : Coeficiente de Chézy para el tramo ($15 < C < 50$).

g : Aceleración de la gravedad.

Existen numerosos métodos empíricos para el cálculo del coeficiente de Chézy (C), entre los cuales se encuentran los desarrollados por autores como Manning, Darcy Weisbach, Kutter y Bazin, estos pueden ser consultados en libros de hidráulica de canales abiertos. En la selección del método se deben tener en cuenta las consideraciones bajo las cuales fue desarrollado.

En campo, se vierte en la corriente una solución de un elemento químico estable o radiactivo a un ritmo constante o instantáneo; la solución se diluye por efecto de la mezcla. La relación entre el caudal constante de la solución inyectada y la determinación de la concentración resultante en la corriente en el sitio de medición, permite conocer el caudal

de la corriente; la precisión del método depende principalmente de:

- a. Que la solución inyectada se diluya uniforme en toda la sección transversal de la corriente, antes de llegar a la sección de muestreo. Si la solución trazadora se inyecta en forma continua, la concentración de esta solución debe ser

constante en toda la sección de medida. Si el elemento trazador se inyecta en forma instantánea debe cumplir con que la concentración sea la misma en todos los puntos de la sección y que (Ecuación 8-18):

$$C = \int_0^T C_i dt$$

Ecuación 8-18

Donde,

C: Concentración resultante.

C_i: Concentración medida en un instante de tiempo.

T: Tiempo en el que toda la muestra pasa por determinado punto de la sección.

- b. Que los materiales, sedimentos, plantas u organismos depositados en el lecho del río no absorban la sustancia trazadora y que esta no se descomponga con el agua de la corriente. La concentración debe determinarse en la sección de muestreo y como mínimo, en otra sección transversal situada aguas abajo, a fin de asegurar que no exista una

diferencia sistemática en la concentración media entre una u otra sección de muestreo.

- **Determinación del peso del trazador**

El peso (*Pe*) en gramos de trazador por emplear en una medición de caudal, esté definido por la (Ecuación 8-19):

$$Pe = Qa * T * Co$$

Ecuación 8-19

Donde,

Qa: Caudal aproximado $\left(\frac{l}{s}\right)$.

T: Tiempo de muestreo (s) .

Co: Concentración esperada $\left(\frac{g}{l}\right)$.

• **Determinación del tiempo de medición**

Para el caso de disolución de sales y disponiendo en terreno de un conductímetro, es posible graficar la conductividad contra el tiempo (Figura 8-38, Figura 8-39), que determina así el comienzo y el final del aforo; las mediciones de conductividad se realizan desde el momento que se inicia la inyección continua o instantánea

de la solución y el muestreo comienza cuando se registra el incremento de la conductividad, el cual continúa a intervalos de tiempo (Δt), hasta que la conductividad se haga constante para el primer caso, mientras que en la inyección instantánea (Figura 8-39) el aforo termina cuando la conductividad es igual al dato inicial, es decir que la corriente recupera su estado natural.

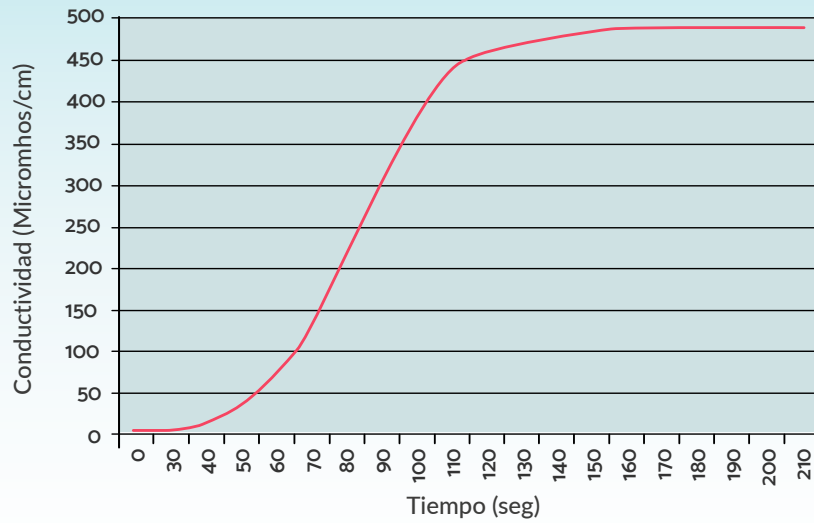


Figura 8-38. Conductividad según inyección constante.
Fuente: (IDEAM, 2006).

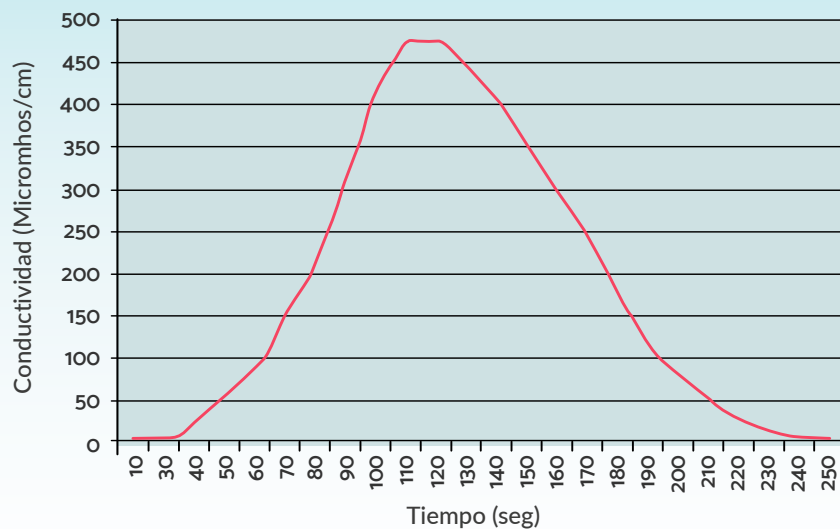


Figura 8-39. Conductividad según inyección instantánea.
Fuente: (IDEAM, 2006).

El tiempo (T_i), medido desde el momento de iniciarse la inyección, hasta el instante en que comienza a pasar la onda, está dado por la relación entre

la distancia L y la velocidad (V_e) de la corriente en m/s, estimada previamente para el tramo definido (Ecuación 8-20):

$$T_i = \frac{L}{V_e}$$

Ecuación 8-20

El tiempo de muestreo (T) está dado por la sumatoria de los Δt constantes, empleados para la extracción de cada una de las muestras, para las cuales se emplean recipientes con capacidad de 100 ml. Este tiempo va a depender, para el caso de inyección constante, del tiempo que dure la inyección más el T_i y, en el caso de inyección instantánea, del tiempo que tarde en pasar totalmente la onda del trazador (Figura 8-40).

Aunque no se conoce una norma que defina con precisión, los intervalos de tiempo (Δt), normalmente se utilizan 10, 15, 20, 25 o 30 segundos; lo importante es que se tomen el número de muestras necesarias para definir con precisión el comportamiento de las concentraciones durante el aforo.

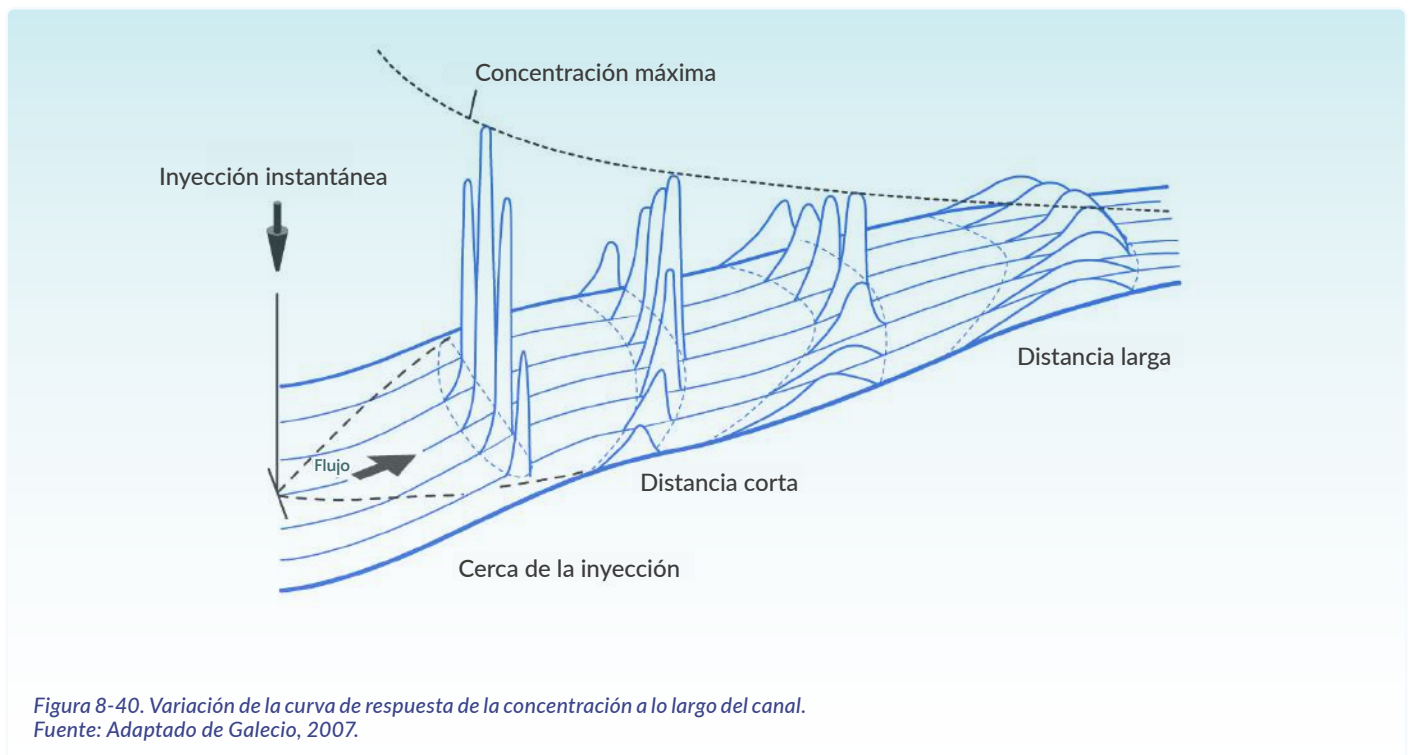


Figura 8-40. Variación de la curva de respuesta de la concentración a lo largo del canal. Fuente: Adaptado de Galecio, 2007.

• Cálculo del caudal

El cálculo del aforo por dilución depende del método empleado. En el caso de mayor uso en la

práctica, el cual consiste en la inyección de trazador a caudal constante, se emplea la (Ecuación 8-21):

$$Q = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_b} \right) * Q_{tr}$$

Ecuación 8-21

Donde,

Q: Caudal de la corriente.

Q_{tr}: Caudal de inyección del trazador.

C₁: Concentración inicial del trazador inyectado.

C₂: Concentración final del agua de la corriente en el momento de la medida.

C_b: Concentración básica inicial del agua de la corriente, antes de la inyección del trazador.

• Características de los trazadores

Para que las mediciones de caudal tengan aceptabilidad, las sustancias usadas como trazadoras deben tener ciertas características físicas, químicas y ambientales, establecidas como fruto de investigaciones a nivel internacional y nacional. Las principales son:

- Su comportamiento debe ser idéntico al de la sustancia por medir, en este caso agua. Es necesario que se desplace a igual velocidad, lo que implica que no debe efectuar intercambio iónico y tampoco debe sufrir absorción química o física, además de no alterar las propiedades y condiciones del agua, tales como densidad, viscosidad y temperatura.
- Es conveniente que sea fácilmente soluble en agua, no se precipite y permita marcar grandes cantidades de fluido con una pequeña masa de trazador.
- Es importante que pueda ser medido in situ.
- No debe contaminar el medio durante períodos prolongados ni afectar a seres vivos.
- Es significativo que su costo sea reducido.
- Se debe disolver rápido en el río a una temperatura normal. No se debe encontrar en el agua del río, o sí está presente, que sea en cantidades mínimas.
- No se debe descomponer ni ser retenida o absorbida por sedimentos, plantas y organismos.
- Su concentración debe ser detectada por métodos sencillos.

- Debe ser inofensiva para el ser humano y los animales, en el grado de concentración que alcance en la corriente.

Solo el trazador ideal puede cumplir con todos estos requerimientos, por lo que se hace indispensable tener un conocimiento práctico de cada uno, con el fin de utilizar el apropiado de acuerdo con la necesidad del estudio y a las características hidráulicas, morfológicas, físicas y químicas del cauce y el agua de la corriente.

Las sustancias que más se utilizan en el método de trazadores son:

Cloruro de sodio: la sustancia trazadora más económica es la sal común (NaCl). El trazador se inyecta en la corriente, y su detección in situ por el método de conductividad es relativamente sencilla; el grado de disolución es de 600 gramos por litro.

Dicromato de sodio: se usa extensamente como trazador en el método de aforo por dilución, por su alta solubilidad (600 gramos por litro). Esta sal satisface la mayor parte de los requerimientos indicados y su análisis colorimétrico realizado en el laboratorio permite medir concentraciones muy reducidas de dicromato.

Cloruro de litio: el cloruro de litio presenta una solubilidad de 600 gramos por litro y, en laboratorio, el análisis fotométrico de la llama, puede detectar concentraciones de litio de 0.001 gramos por litro (espectrofotometría de emisión).

Otros trazadores químicos utilizados son el yoduro de sodio, nitrato de sodio y sulfato de manganeso.

Rodamina W: su uso está ampliamente difundido en los Estados Unidos de América para el aforo por dilución, ya que sus características de absorción son mejores que las de otras tintas. Su concentración

se puede medir en la estación de aforos usando fluorímetros que puedan detectar concentraciones de 5 a 10 partes por millón (ppm).

Elementos radiactivos: se han utilizado isótopos radiactivos tales como la bromina 82, el yodo 131 y el sodio 24; las concentraciones de estos elementos del orden de 10^{-9} , pueden determinarse exactamente con un contador o un dosímetro, cuya sonda de detección esté suspendida sobre la corriente o en un tanque contador normalizado. Aunque los elementos radiactivos constituyen trazadores ideales para el método de dilución, los peligros que presentan para la salud y en general para el medio natural limitan su utilización.

- **Registro de datos**

Actualmente se cuenta con equipos de registro continuo para la ejecución de aforos químicos en corrientes. Estos equipos facilitan la medición, análisis y caracterización de cauces naturales, entregan resultados en tiempo real y en el sitio de aforo, con base en la técnica de trazadores, conocida por su precisión. La señal se toma con electrónica de dos tipos de sensores (cloruro de sodio-sal y rodamina) y el análisis lo hace un computador manual mediante modelos físico-matemáticos propios, que producen y entregan la información de manera inmediata y la almacenan en la memoria. Sirven para todo tipo de cauces, con caudales muy bajos (pocos litros) hasta caudales muy grandes ($100 \text{ m}^3/\text{s}$ con trazador fluorimétrico).

El sistema está constituido por un sensor de conductividad eléctrica, una interfaz electrónica, una computadora de mano (PDA) y un software para procesamiento, análisis, almacenamiento y consulta de información (Figura 8-41).



Figura 8-41. Trazadores automáticos.
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2006.

A continuación, se lista el procedimiento para la medición con este tipo de equipos:

- a. Seleccionar un tramo del cauce con facilidad de acceso para inyectar el trazador (sal o rodamina) en la sección uno y medir el paso de la nube del trazador en la sección dos.
- b. Medir la conductividad de la corriente antes de inyectar el trazador, para detectar la presencia (concentración) natural del trazador en el agua.
- c. Preparar una solución del trazador con concentración conocida.
- d. Instalar el equipo (sonda, interfaz y PDA) en la sección dos, para medir el paso de la nube del trazador.
- e. Verter la solución con el trazador en la sección uno y al mismo tiempo, marcar en la gráfica de la pantalla del PDA una señal (triángulo).
- f. Iniciar la medición. En la pantalla del PDA, al inicio se va observando el paso de la nube, con aumento de la concentración hasta llegar a un punto máximo en un tiempo X ; posterior, se observa el descenso y forma una onda que, en la parte final del paso de la nube, se vuelve constante y mantiene el valor de la concentración detectada en la corriente antes del vertimiento.

- g. Una vez ha pasado la nube, se cierra la aplicación y se puede allí mismo, ejecutar las rutinas de cálculo, con base en los datos que el software extrae de la curva experimental.
- h. Mediante la rutina de modelamiento, el usuario aplica las ecuaciones implícitas en el software y genera una curva teórica, la cual es comparada con la curva experimental.
- i. Si el usuario considera que la modelación (curva) es apropiada, es decir hay coincidencia entre teoría y experimento, pasa a conocer los resultados de los diferentes parámetros: velocidad, caudal, área, longitud de mezcla, coeficientes de Chézy y Manning y el número de Reynolds.

Estructuras aforadoras

Son estructuras que han sido estudiadas y calibradas en diferentes condiciones experimentales. Para cada una de ellas es posible obtener una ecuación de descarga (relación nivel-caudal) que permite determinar el caudal instantáneo en función de la altura de la lámina de agua con respecto a un punto de la estructura, la cual se mide con ayuda de una

mira o un instrumento registrador. A continuación, se describen las estructuras más utilizadas:

• **Vertederos**

Son dispositivos hidráulicos fijos o removibles que consisten en una escotadura a través de la cual se hace circular el flujo que se quiere medir en el canal o corriente natural. La precisión del aforo depende de la velocidad de llegada a la estructura, por lo tanto, es importante remansar el agua y ampliar la sección del canal arriba del sitio para obtener velocidades mínimas (< 0.15 m/s). La estimación del caudal a partir de este tipo de estructuras, depende de: 1) su geometría, la cual puede ser rectangular, trapezoidal o triangular, 2)

espesor de la pared del vertedero (delgada o gruesa), 3) aristas redondeadas o con filo, 4) presencia de contracciones en la pared del vertedero, y 5) altura de la cresta.

La definición de la ecuación, se puede determinar a partir de fórmulas empíricas ampliamente descritas en los textos de hidráulica, o mediante ensayos de laboratorio o aforos in situ (normalmente volumétrico) que permiten obtener la relación nivel caudal.

Vertedero rectangular: puede ocupar total o parcialmente el ancho del canal, presentan contracciones laterales que reducen la longitud efectiva de la cresta y, en consecuencia, el caudal medido por pérdidas por rozamiento (Figura 8-42).

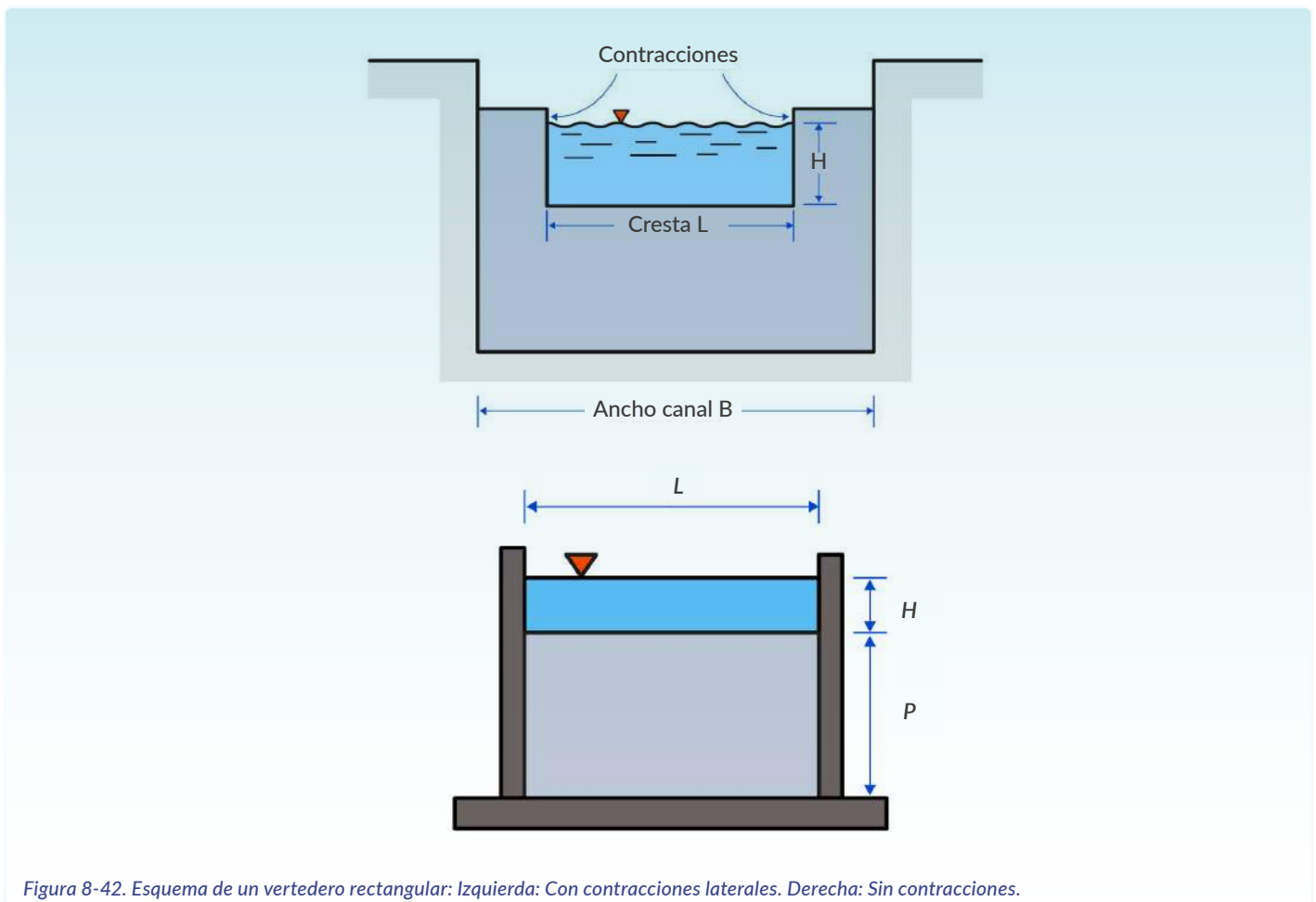


Figura 8-42. Esquema de un vertedero rectangular: Izquierda: Con contracciones laterales. Derecha: Sin contracciones.

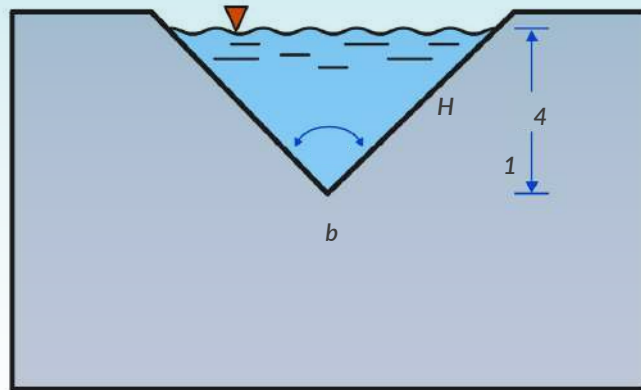


Figura 8-43. Esquema de un vertedero trapezoidal.

Vertedero trapezoidal (Cipolletti): se construye con paredes laterales inclinadas en una relación 1 horizontal a 4 vertical (Figura 8-43).

Vertedero triangular: se recomienda para medición de caudales pequeños, es particularmente con-

veniente para medición de caudales muy fluctuantes. Los más utilizados son los de escotadura con ángulo de 90° (Figura 8-44) y 60° .

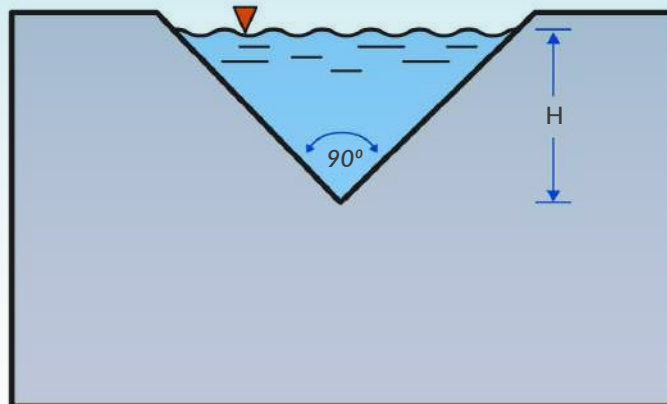


Figura 8-44. Esquema de un vertedero triangular de escotadura con ángulo de 90° .

Para la instalación de un vertedero se recomienda (Briones & García, 1997):

- Construir la cresta y los lados de la escotadura del vertedero de un espesor no mayor a 3 mm.
- Diseñar la estructura para el caudal máximo esperado en la corriente por aforar. La máxima carga no debe ser mayor que un tercio de la longitud de la cresta.

- Colocar el vertedero en sentido transversal a la corriente, sobre un tramo recto y uniforme de canal, procurando que la distancia aguas arriba del vertedero sea por lo menos igual a 10 veces la longitud de la cresta.
- Evitar obstrucciones en el lado aguas arriba del vertedero.
- Asegurar que la cresta esté recta y a nivel.
- En lo posible, se deben instalar los vertederos en el extremo final de un dique largo, suficientemente ancho y profundo, de tal forma que el agua se aproxime al vertedero libre de remolinos, a una velocidad no mayor a 0.15 m/s.

La altura de la cresta del vertedero por encima del fondo del canal, debe ser aproximadamente igual a dos veces, y preferible, tres veces la carga de agua.

Los vertederos ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua:

- Las mediciones de caudal son precisas e instantáneas.
- La construcción de la estructura es sencilla para las geometrías citadas.
- La duración del dispositivo es larga, desde luego con un buen mantenimiento.

La elección del tipo y las dimensiones del vertedero se basan, en primera instancia, en el caudal máximo previsto por medir, o en los rangos de variación del caudal, en el caso de corrientes fluctuantes.

Para los diferentes tipos de vertederos, las mediciones de caudal son precisas mientras se mantengan las consideraciones de diseño y funcionen perfectamente en corrientes que no transporten grandes cantidades de sedimento, por cuanto este material se deposita en el fondo del canal (tanque de amortiguación), inmediatamente arriba de la estructura y hace que las líneas de

flujo alteren su dirección, lo que implica un desajuste. En consecuencia, es necesario revisar continuamente el cauce de la corriente y los diferentes elementos de la estructura, efectuar trabajos de mantenimiento preventivo y conservación, así (IDEAM, 2006):

- a. Revisión del estado y la posición del limnómetro, verificar por topografía la cota cero.
- b. Extracción de malezas acuáticas, piedras, gravilla y sedimento fino del tanque amortiguador, aguas arriba de la estructura.
- c. Verificación de la cota y nivel (horizontal) de la cresta del vertedero, realizar los trabajos de conservación pertinentes.
- d. Corrección de filtraciones a través de los estribos y muros.
- e. Verificación del estado del piso y taludes a la salida de la estructura, realizar los trabajos de conservación requeridos.

• **Canaletas**

Son estructuras de gran aplicación en terrenos planos. Su principio de funcionamiento está basado en la interposición de estas estructuras en un flujo a superficie libre con pérdidas de carga pequeñas, que obliga al establecimiento de un régimen crítico en la sección de control, lo cual permite establecer una relación entre el caudal y la profundidad. Las canaletas más utilizadas son:

Tipo Balloffet: se caracteriza por tener paredes paralelas y fondo plano, por lo cual se hace fácil su construcción; posee características de solidez y resistencia a las condiciones de campo.

Su estructura es muy sencilla, y en el caso de instalarla en un canal rectangular ya construido, con una placa de fondo perfectamente horizontal, resulta económica su construcción. Su funcionamiento hi-

dráulico preciso se ajusta a ecuaciones comprobables basadas en los principios generales de la hidráulica.

Las dimensiones de la estructura se expresan en función del ancho (B) de la sección de acceso, tal como se muestra a continuación (Figura 8-45), (Tabla 8-6):

La medición de la altura de la lámina de agua se efectúa en un limnómetro ubicado a una distancia (B) antes de la garganta.

Para canales en concreto, el ancho (B) del aforador debe representar, en la medida posible, el ancho promedio de la sección del canal, es decir, que las dos áreas por sección plana sean aproximadamente iguales. Si el canal es en tierra, el ancho B puede ser menor.

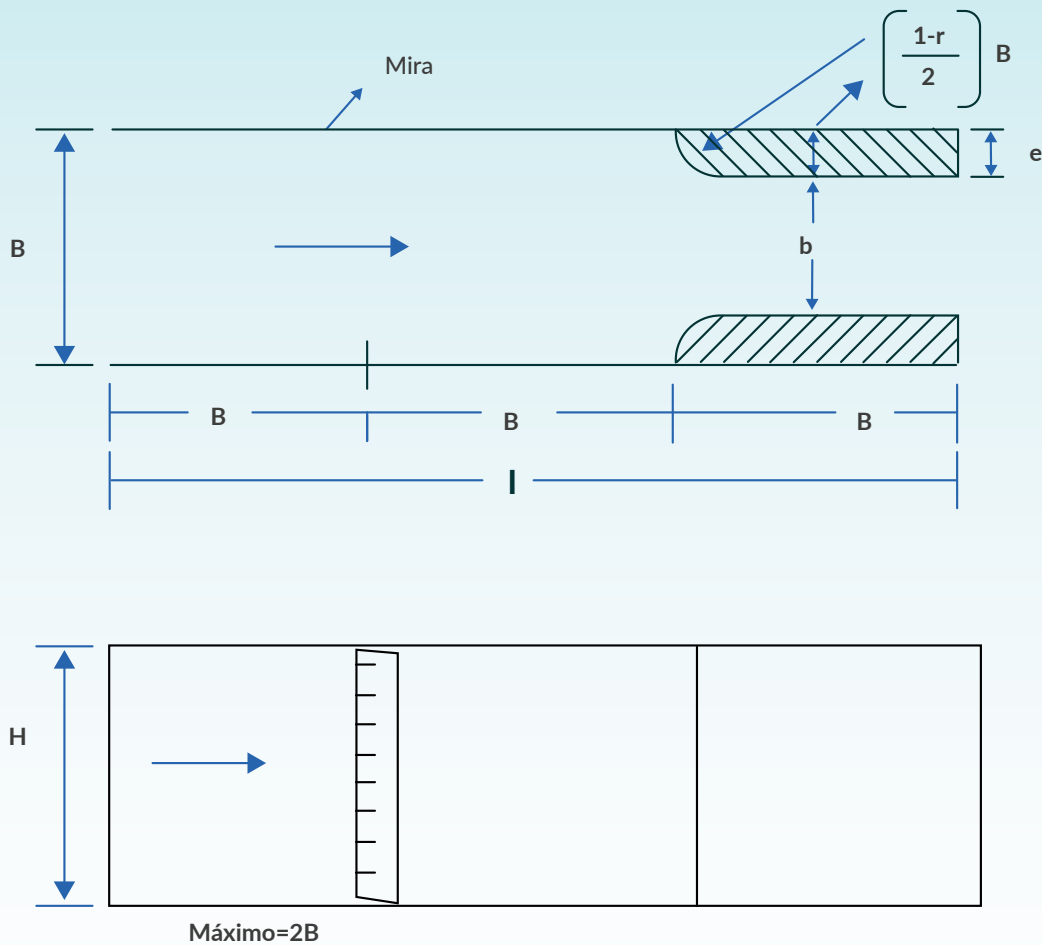


Figura 8-45. Canaleta tipo Balloffet.
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2006.

Tabla 8-6. Dimensiones a partir de la relación con el ancho de la sección de acceso (B).

Dimensión de la estructura	Relación con el ancho de la sección de acceso (B)
Longitud total del medidor (l)	3B
Longitud de la sección de acceso	2B
Longitud de la sección contraída o garganta	B
Ancho de la sección de acceso	B
Ancho de la sección contraída (b)	rB
Relación de contracción (r)	b/B
Altura máxima (H)	2B
Ancho de los abultamientos y radio de curvatura (e)	$((1 - r) / 2) * B$

Fuente: (IDEAM, 2006).

En los dos casos, esta dimensión depende del caudal (Q) que se desea cuantificar y el diseñador puede disminuirla en función de esta característica y del costo de la estructura.

Se puede utilizar cualquier valor para la relación de contracción de acuerdo con el borde libre aguas arriba. Si hay poco borde libre, normalmente se usa $r=2/3$, por cuanto esta relación produce menor elevación de nivel aguas arriba; en caso contrario el valor sugerido es $r=1/3$.

Al seleccionar el ancho (B) se recomienda que, al aplicar la relación de contracción, la garganta y los dos abultamientos queden con dimensiones expresadas en cifras redondas, lo cual facilita la construcción de la estructura y, consecuentemente, garantiza la calibración y la precisión de las mediciones.

Balloffet establece que el caudal en condiciones de flujo libre, para $r=2/3$, con unidades en Sistema Internacional (SI), está dado por la (Ecuación 8-22):

$$Q_{[m^3/s]} = 1.23 Bh^{3/2}$$

Ecuación 8-22

Por otra parte, para una relación de contracción $r=1/3$, el caudal se expresa como (Ecuación 8-23):

$$Q = 0.557 Bh^{3/2}$$

Ecuación 8-23

Medidor sin cuello (cutthroat): Consiste principalmente en una sección de entrada, una sección de salida, una garganta y un fondo aforador. El caudal (Q) del aforador se obtiene midiendo las profundidades de flujo aguas arriba (H_a) y aguas abajo (H_b) de la garganta (Figura 8-46). Con el objeto de medir con precisión las profundidades H_a y H_b el medidor debe estar provisto de pozos aquietadores.

La sección de entrada está constituida por dos paredes verticales con una convergencia de 3:1; la sección de salida está compuesta también por dos paredes verticales con una divergencia de 6:1 que forma una constricción o garganta

ta (W); el fondo o plantilla de aforador es un plano horizontal.

El tamaño del aforador es generalmente especificado por la amplitud de la garganta (W) y la longitud total del aforador (L).

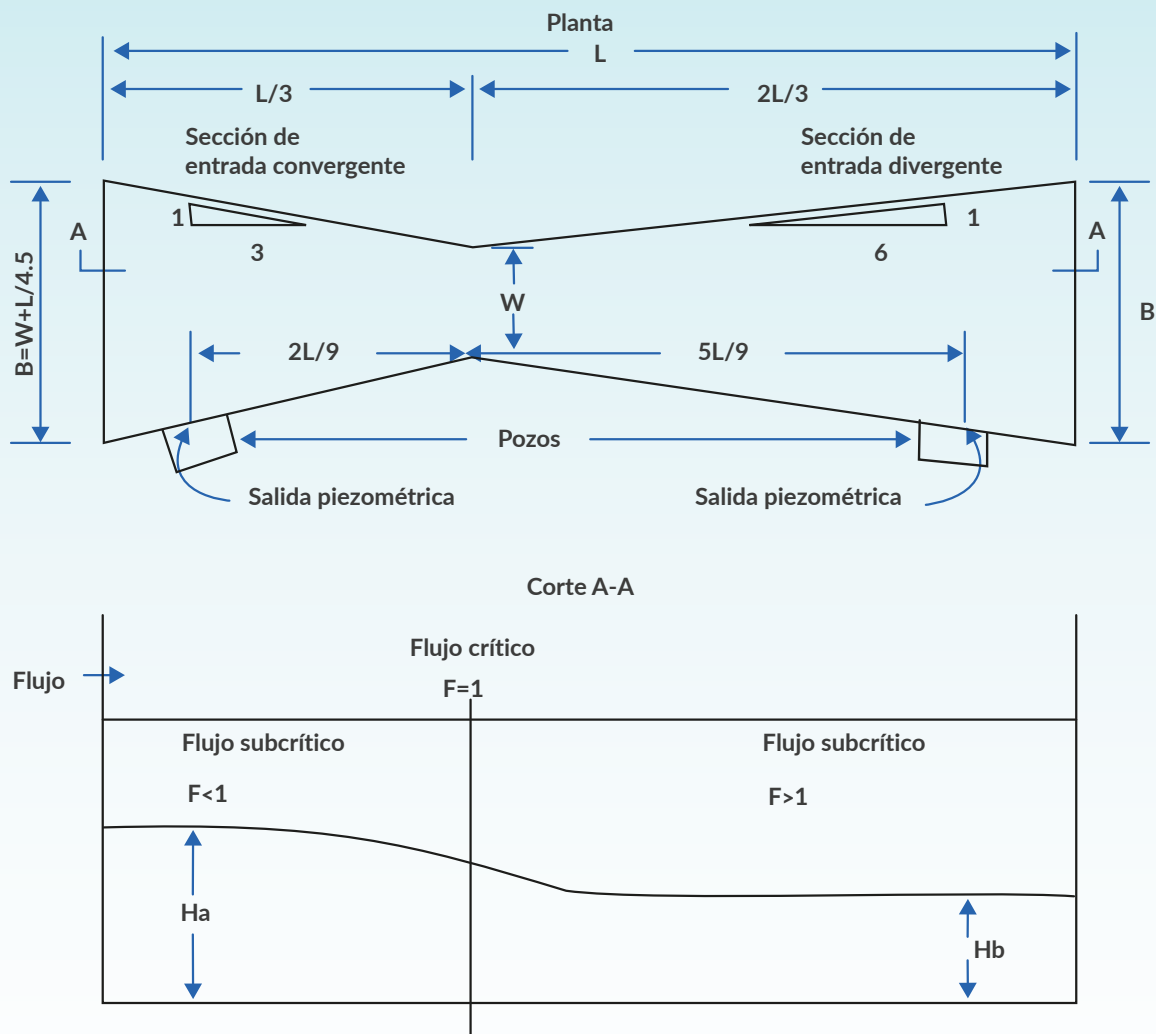


Figura 8-46. Medidor sin cuello (cutthroat).
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2006.

Tanto el ancho de entrada como el ancho de salida, tienen igual amplitud (B), cuyo valor está dado por la (Ecuación 8-24):

$$B = W + \left(\frac{L}{4.5} \right)$$

Ecuación 8-24

Donde L , que es la longitud total, es igual a (Ecuación 8-25):

$$L = L_1 + L_2$$

Ecuación 8-25

Los pozos aquietadores deben estar colocados a un lado de la estructura y comunicados con ella en un punto bien definido en la sección de entrada y salida del aforador, a una distancia L_a y L_b aguas arriba y aguas abajo de la garganta respectiva. Su uso es restringido en el campo, pues quedan expuestos a innumerables factores que pueden causar obstrucciones y, en general, el deterioro de su funcionamiento, por lo cual son reemplazadas por rejillas graduadas, que cumplen con satisfacción el mismo trabajo. Las longitudes de L_a y L_b se pueden calcular por medio de las siguientes expresiones (Ecuación 8-26):

$$L_a = \frac{2}{9}L; \quad L_b = \frac{5}{9}L$$

Ecuación 8-26

En estos pozos de aquietamiento se pueden poner flotadores y limnigrafos cuando se requieren mediciones precisas y continuas.

El flujo en la estructura puede ocurrir bajo dos diferentes condiciones hidráulicas: una donde no existe sumersión, llamada *flujo libre* y otra donde

la elevación de la superficie de la corriente, aguas abajo desde el aforador, tiene una altura suficiente para retardar la descarga, denominada *flujo sumergido*.

El grado de sumersión (S) del resalto, se encuentra mediante la siguiente relación (Ecuación 8-27):

$$S_{[\%]} = \left(\frac{H_b}{H_a} \right) * 100$$

Ecuación 8-27

El cálculo de caudal, cuando el flujo es libre, se determina a partir de la siguiente expresión (Ecuación 8-28):

$$Q = C(H_a)^N$$

Ecuación 8-28

Donde,

Q : Caudal $\left(\frac{m^3}{s} \right)$.

H_a : Profundidad del flujo aguas arriba (m).

H_b : Profundidad del flujo aguas abajo (m).

N : Exponente de flujo libre.

C : Coeficiente de flujo libre.

El valor de N es función única de la longitud (L), es decir, es constante para todos los medidores de una misma longitud, independiente de la amplitud de la garganta.

El coeficiente C depende de la longitud y de amplitud de la garganta (W) y se puede encontrar mediante la siguiente función empírica (Ecuación 8-29):

$$C = 1.025 * K * W$$

Ecuación 8-29

En donde K es el coeficiente de longitud del aforador para flujo libre, los cuales se listan en la Tabla 8-7.

Por otro lado, el cálculo de caudal, cuando el flujo es sumergido, se determina a partir de la siguiente expresión (Ecuación 8-30):

$$Q = C_s (H_a - H_b) \left(\frac{N}{(\log(S))^{N_s}} \right)$$

Ecuación 8-30

Donde,

Q : Caudal $\left(\frac{m^3}{s}\right)$.

H_a : Profundidad del flujo aguas arriba (m).

H_b : Profundidad del flujo aguas abajo (m).

N : Exponente de flujo libre.

N_s : Exponente de flujo sumergido.

S : Sumergimiento $\left(\frac{H_a}{H_b}\right)$ (%).

C_s : Coeficiente de flujo sumergido.

El coeficiente de flujo sumergido (C_s) se calcula mediante la Ecuación 8-31:

$$C_s = K_s * W_{1.025}$$

Ecuación 8-31

En donde K_s es el coeficiente de longitud del aforador para flujo sumergido; los valores de K_s y N_s pueden obtenerse directamente de la Tabla 8-7.

Tabla 8-7. Valores de K_s y N_s

L (m)	S (%)	Flujo libre		Flujo sumergido	
		N	K	Ns	Ks
0.5	60.7	2.1	6.2	1.7	3.5
0.6	62.0	2	5.2	1.6	2.9
0.7	63.0	1.9	4.6	1.6	2.6
0.8	64.2	1.9	4.2	1.5	2.4
0.9	65.3	1.8	3.9	1.5	2.2
1.0	66.4	1.8	3.6	1.5	2.0
1.2	68.5	1.8	3.2	1.4	1.8
1.4	70.5	1.7	2.9	1.4	1.6
1.6	72.0	1.7	2.7	1.4	1.5
1.8	73.8	1.6	2.5	1.4	1.3
2.0	75.5	1.6	2.4	1.4	1.2
2.2	77.0	1.6	2.3	1.4	1.2
2.4	78.4	1.6	2.2	1.4	1.1
2.6	79.5	1.6	2.2	1.4	1.1
2.7	80.5	1.6	2.1	1.4	1.1

Fuente: (IDEAM, 2006).

Canaleta Parshall: está conformada por tres secciones principales: una sección de contracción convergente que se localiza en su extremo aguas arriba, una garganta y una sección divergente o de expansión aguas abajo. Para determinar el caudal, se dispone de dos medidores de profundidad (H_a y H_b), los cuales se calibran al colocar la cota cero de manera que coincida con la cota de la cresta del canal (sección convergente). Opera como un dispositivo de cabeza sencilla con mínima pérdida de energía, por lo cual se utiliza en canales poco profundos y con escasa pendiente, como se observa en la Figura 8-47.

El aforador Parshall está formado por tres secciones principales: una sección convergente de contracción, se localiza en su extremo aguas arriba;

una sección constreñida o garganta, y una última sección divergente o de expansión aguas abajo (Figura 8-48).



Figura 8-47. Canaleta Parshall Parque Nacional Natural Los Nevados.

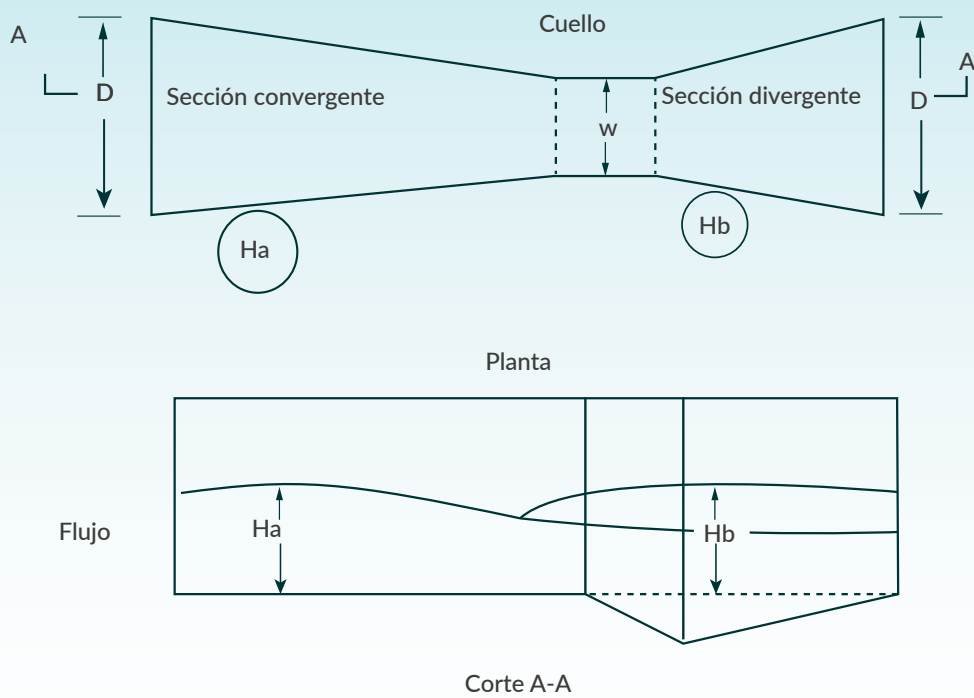


Figura 8-48. Esquema de un aforador Parshall.
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2006.

El piso de la sección convergente está nivelado, tanto longitudinal como transversal; el de la garganta se inclina hacia abajo y el de la sección divergente tiene un declive ascendente. El ancho de la garganta (W) se emplea para determinar el tamaño del aforador.

Cuando se elige la relación correcta entre el ancho de la garganta y la descarga, la velocidad de aproximación queda controlada de forma automática. Este control se logra seleccionando una anchura de

garganta suficiente para admitir el flujo máximo que se puede medir, pero al mismo tiempo, suficientemente angosta para que cause un aumento en la profundidad del flujo aguas arriba.

En los cálculos debe tenerse en cuenta que si $H_b = H_a$, el aforador trabaja con sumersión y el caudal (Q) es función de H_a y H_b . El grado de sumersión (S) se determina así (Ecuación 8-32):

$$S_{[\%]} = \left(\frac{H_b}{H_a} \right) * 100$$

Ecuación 8-32

Donde,

H_a : Profundidad del flujo arriba.

H_b : Profundidad del flujo abajo.

Es conveniente fijar la cresta de la canaleta Parshall de tal manera que ocurra flujo libre. Si las condiciones no permiten dicha operación, la relación de sumergencia debe mantenerse siempre que sea posible, por debajo del 95 %, dado que la canaleta no medirá de manera confiable si esta es mayor (Chow, 1994).

En la Tabla 8-8 se presentan valores encontrados experimentalmente para diferentes tamaños del aforador:

Tabla 8-8. Valores para diferentes tamaños del aforador.

Tamaño del aforador (m)	Flujo libre	Flujo sumergido
$W < 0.30$	$S < 0.6$	$0.6 < S < 0.95$
$0.30 < W < 2.50$	$S < 0.7$	$0.7 < S < 0.95$
$2.50 < W < 15$	$S < 0.8$	$0.8 < S < 0.95$

Fuente: (IDEAM, 2006).

Las ecuaciones para determinar el caudal en los aforadores Parshall, son:

- Para flujo libre (Ecuación 8-33):

$$Q = m * H_a^N$$

Ecuación 8-33

- Para flujo con sumergimiento (Ecuación 8-34):

$$Q = m * H_a^N - C$$

Ecuación 8-34

Los valores que pueden tomar los parámetros M y N varían de acuerdo con el tamaño del aforador (Tabla 8-9).

Tabla 8-9. Valores de M y N en unidades métricas, para el cálculo de la descarga en un aforador Parshall.

W (m)	M	N	W(m)	m	N
0.15	0.381	1.580	4.5	10.790	1.6
0.30	0.680	1.522	5	11.937	1.6
0.50	1.161	1.542	6	14.229	1.6
0.75	1.774	1.558	7	16.522	1.6
1.00	2.400	1.570	8	18.815	1.6
1.25	3.033	1.579	9	21.107	1.6
1.50	3.673	1.588	10	23.400	1.6
1.75	4.316	1.593	11	25.692	1.6
2.00	4.968	1.599	12	27.985	1.6
2.50	6.277	1.608	13	30.278	1.6
3.00	7.352	1.600	14	32.570	1.6
3.50	8.498	1.600	15	34.863	1.6
4.00	9.644	1.600			

Fuente: (IDEAM, 2006).

Cuando el aforador trabaja a flujo sumergido, se puede estimar el parámetro C con las siguientes

expresiones (Ecuación 8-35, Ecuación 8-36 y Ecuación 8-37):

Cuando: $w < 0.15$ m:

$$C = \frac{0.0285Ha^{2.22}}{\left(\frac{Ha + 3.05}{3.05} - S\right)^{1.44}} - \frac{Ha - 0.056}{87.94}$$

Ecuación 8-35

Cuando $0.30 < W < 2.50$ m:

$$C = \left\{ \left[\frac{3.28Ha}{(1.8/S)^{1.8} - 2.45} \right]^{4.57} - 3.14S + 0.093S \right\} W^{0.815}$$

Ecuación 8-36

Cuando $2.50 < W < 15.0$:

$$C = 69.671(S - 0.71)^{3.333} Ha^2 W$$

Ecuación 8-37

8.1.2.4 Materiales y equipos

En la Tabla 8-10 se presentan los materiales y equipos utilizados para los diferentes métodos de

medición de caudal. Adicional, la Tabla 8-11, muestra la lista de chequeo mínima para los diferentes métodos de aforo ya mencionados.

Tabla 8-10. Equipos en general para medición de caudal a partir de aforos.

Métodos		Equipos-materiales	Tipo de equipos-materiales
Métodos área-velocidad	Aforo por vadeo	Estos métodos utilizan molinetes o micromolinete de copa o de hélice.	Electromecánico
	Aforo por suspensión		
	Aforo angular		
	Aforo en bote cautivo		
	Aforo en bote cautivo		
	Aforo con lancha en movimiento		
	Aforo con flotadores	Elementos que floten en el agua y permitan medir la velocidad superficial.	Mecánico
	ADCP	ADCP que calcula las componentes de la velocidad del agua en las tres direcciones.	Electrónico
FlowTracker2	Equipo FT2 con todos sus componentes (consola, cable, sonda y sensores).	Electrónico	
Método volumétrico	Aforo volumétrico	Recipiente con volumen conocido y cronómetro.	Mecánico
Método de dilución	Inyección constante e inyección instantánea.	Sustancias químicas (trazadores) y medidor de concentración del trazador.	Químico
Estructuras aforadoras	Vertederos	Estructura aforadora instalada en la corriente.	Mecánico o electromecánico
	Canaletas	Curva calibrada de la estructura.	

Tabla 8-11. Lista de chequeo para aforo líquido. Equipos y personal requerido.

Equipos necesarios	Tipo de aforo									
	Por vadeo	Por suspensión	Angular	Bote cautivo	Lancha en movimiento	ADCP	Flow-Tracker2	Volumétrico	Flotadores	Trazadores
Molinete o micromolinete.	X	X	X	X	X					
Contador de revoluciones.	X	X	X	X	X					
Cinta métrica.	X						X		X	X
Varilla de vadeo.	X						X			
Cartera de aforos y planillero.	X	X	X	X	X			X	X	
Malacate y tabla con polea.		X	X	X						
Escandallos de 30, 60, 75 y 100 kg.		X	X	X						
Transportador para medición del ángulo de arrastre.		X								
Tabla de conversión para corrección de profundidades por ángulo de arrastre.		X								
Jalones y banderolas de colores vivos.			X		X					
Sextante o tránsito.			X		X					
Lancha con motor fuera de borda.			X		X					
Radios portátiles o celulares.			X						X	
Bote.				X						
Manila.				X						

Equipos necesarios	Tipo de aforo									
	Por vadeo	Por suspensión	Angular	Bote cautivo	Lancha en movimiento	ADCP	Flow-Tracker2	Volumétrico	Flotadores	Trazadores
Soporte para fijación de molinete.					X					
Ecosonda.					X					
Batería de 12 voltios.					X					
Ocho baterías AA.						X				
Cronómetro.					X			X	X	X
Flotadores.									X	
Perfilador ADCP.						X				
Cable de interfaz.							X			
Bote para sujetar el perfilador.						X				
Transmisor Bluetooth.						X				
Sonda.							X			
Sensores.							X			
PDA a prueba de agua.						X				
Consola FT2.							X			
Software y programa para PC.						X	X			
Canaleta para conducción de flujo al recipiente.								X		
Recipiente (balde, caneca, tanque) con volumen conocido.								X		X

Equipos necesarios	Tipo de aforo									
	Por vadeo	Por suspensión	Angular	Bote cautivo	Lancha en movimiento	ADCP	Flow-Tracker2	Volumétrico	Flotadores	Trazadores
Conductímetro										X
Botella de Mariotte.										X
Dos botellas de 500 y 1000 ml.										X
Mezclador que no altere la solución.										X
Agua destilada.										X
Trazador.										X
Personal requerido										
Inspector.	X	X		X	X					X
Técnico aforador.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Auxiliar técnico.	X	X		X	X	X	X			X
Motorista.			X	X	X					
Auxiliar de topografía.			X							
Técnico capacitado en el manejo del software.						X	X			

Instrumentos de apoyo

Adicional a los materiales y equipos para el aforo líquido, también son necesarios otros instrumentos que sirvan de apoyo para tomar mediciones de área y velocidad. Entre ellos se mencionan principalmente los puentes hidrométricos y tarabitas, que se construyen y diseñan considerando la altura y pendiente de los taludes de los cauces.

Estos instrumentos, son instalaciones necesarias para realizar aforos líquidos y sólidos, tomar muestras para calidad de agua, entre otras aplicaciones. El puente hidrométrico debe quedar como mínimo 1 m, por encima del nivel máximo histórico, con el objeto de evitar daños durante avenidas y para ofrecer condiciones óptimas de aforo. Debe construirse perpendicular al eje de la línea de la corriente del agua.

Las estructuras deben ser lo más rígidas posibles y diseñadas para resistir cargas hasta de 1000 Kg, con el fin de que al momento de realizar las mediciones hidrométricas tengan el menor movimiento.

La construcción de cables y canastillas (Figura 8-49) debe tener ciertas condiciones entre las cuales se destacan las siguientes:

El soporte inferior de la canastilla no debe tocar en ningún momento la superficie del agua, para lo cual es importante definir la altura máxima que han alcanzado las crecientes del río.

- ♦ El cable o los cables deben formar con la horizontal una catenaria del 2 % de la longitud del ancho, es decir para 100 metros sería de dos metros, valor que se debe tener en cuenta en el momento de diseñar la altura de los pórticos de la tarabita.
- ♦ El sistema constituido por cables, tensores, anclajes y canastilla debe poder soportar cargas móviles hasta de 500 Kg, y sus componentes deben estar convenientemente protegidos contra la corrosión a causa de la intemperie.
- ♦ En función del ancho de la sección de aforos, las tarabitas pueden ser monofilares o bifilares, es decir, tener uno o dos cables de apoyo para el desplazamiento de la canastilla.



Figura 8-49. Tarabita, Estación Carlosama. Río Blanco.

8.1.3 Observaciones en cuerpos de hielo y nieve

En Colombia, por encima de los 4800 metros de altitud aún es posible encontrar cuerpos de agua en estado sólido llamados técnicamente “glaciares” y comúnmente “nevados”, los cuales se consideran parte de la criósfera terrestre y, por lo tanto, del ciclo del agua. Son entidades observables, medibles, cuantificables y objeto de estudio en especial por ser excelentes indicadores de cambio climático. Su tendencia actual es el cambio de estado sólido a líquido a causa del aumento térmico de la baja atmósfera.

Se asocia a esta importancia, que los cuerpos de hielo son puntos significativos dentro de la hidrología de cuencas, ya que actúan como reguladores de las corrientes y aportan agua por medio de la fusión glacial. Paralelamente, suministran agua a ecosistemas anexos, ayudan a mantener cuerpos y cursos de agua claves dentro de la ecología de especies de animales y vegetales. También permiten evaluar tendencias en cambios climáticos e indicadores en el clima, ya que mantienen un registro del tiempo en su interior, con la conservación de partículas de aire y polen y responden a los cambios de temperatura y precipitación (IDEAM, 2012).

Actualmente, este tipo de estudios implican hacer un seguimiento a los parámetros físicos necesarios para identificar los cambios en el glaciar en un periodo dado, con lo cual se pueden conformar una serie de datos para el análisis. A continuación, se presenta lo relacionado con la recolección de datos y a la instrumentación para evaluar los cambios en la geometría del glaciar durante un periodo de tiempo, conociendo las variaciones en la longitud, superficie y volumen.

8.1.3.1 Selección de puntos

Si se está monitoreando un glaciar, se deben considerar los siguientes criterios de selección (Ceballos, 2015):

Representatividad del glaciar

Debe representar las condiciones climáticas locales y regionales; además debe tener un rango altitudinal suficientemente amplio que permita definir área de ablación (pérdida) y de acumulación (ganancia).

Tamaño del glaciar

Un glaciar pequeño es más vulnerable y responde rápido a los pequeños cambios atmosféricos, mientras que, un glaciar grande permite realizar un estudio más extenso a lo largo del tiempo.

Morfología de la cuenca

Es fundamental para la medición de un balance glaciológico e hidrológico en una cuenca con sus límites bien definidos, lo cual permite obtener datos coherentes con la realidad, en otras palabras, su cuenca no debe entregar aportes a otras cuencas antes de su punto de concentración de agua.

Estado del frente glaciar e hidrología

Es importante que posea un frente limpio, sin hielo muerto cubierto de escombros, con un drenaje definido que pueda ser medido.

Viabilidad, accesibilidad y seguridad

El glaciar debe tener buenas rutas de acceso, que permita instrumentarlo, en lo posible sea uniforme y no se encuentre muy agrietado, que no presente lugares peligrosos como zonas de avalanchas, desprendimiento de bloques o pendientes muy fuertes.

Con base en lo anterior, se elige un glaciar o parte de él. Los datos, análisis e interpretaciones que se obtengan son estimativos de lo que ocurre en todo el glaciar.

8.1.3.2 Frecuencia

Cuando se definen las frecuencias de medición de variaciones en el régimen de los glaciares, estas deben estar programadas en ciertas épocas del año que permitan obtener datos representativos y de acuerdo con lo que se quiere medir.

Una vez seleccionado el glaciar o glaciares (glaciar piloto), la frecuencia en el monitoreo depende de lo que se quiere analizar: *retroceso del frente inferior glaciar, cambio de área, volúmenes almacenados, cambios en la superficie, acumulación de nieve, sinterización de la nieve o la neviza, agua de fusión, balance de masas, balance hidrológico, balance energético, reconstrucciones fotogramétricas, seguimientos fotográficos*, los cuales definen la escala del estudio, el número de visitas y el tipo y cantidad de instrumentación.

En Colombia por su ubicación ecuatorial y la influencia de la ZCIT, es recomendable realizar, por lo menos, una visita cada cambio de temporada de lluvia a temporada seca y tener en cuenta el ciclo del año hidrológico, es decir, definir un inicio en la temporada más seca o más húmeda del año y terminar al año siguiente.

Para facilidad y por la coincidencia entre el año gregoriano con la temporada seca, en la región Andina colombiana se sugiere iniciar en el mes de enero. Por ejemplo, para mediciones de retroceso del frente del glaciar, es recomendable dos veces al año o en su defecto una vez al año.

Para mediciones de espesor del hielo, se sugiere realizar dos campañas de mediciones al año o mínimo una vez anual.

Los cálculos del balance de masa glaciológico por el método directo in situ se deben realizar con una periodicidad mensual, bimestral, trimestral o por lo menos semestral.

El balance de masa de grandes áreas glaciares por métodos fotogramétricos se debe realizar en periodos de 5 a 10 años.

Cálculos de área mediante métodos indirectos como el uso de imágenes de satélite cada 2, 3 a 5 años.

En todo caso y debido a las condiciones de accesibilidad, climáticas y de altitud, toda campaña de campo debe ser optimizada para capturar la mayor cantidad de datos posible.

8.1.3.3 Tipos de medición

En la actualidad, el IDEAM realiza monitoreos directos e indirectos a los seis actuales glaciares nacionales. De forma directa in situ en el volcán nevado Santa Isabel-Sector Conejeras y en la Sierra Nevada del Cocuy, sector Ritacuba Blanco. Para las otras zonas glaciares del país, se realiza seguimiento al cambio de área por medio de imágenes de satélite de alta resolución espacial.

Se siguen metodologías avaladas mundialmente y recomendadas por el Grupo de Trabajo de Niveles y Hielos (GTNH-PHI-LAC-UNESCO), del *Institut de Recherche Pour le Développement* (IRD), la Universidad de Zúrich (Suiza) y el *World Glacier Monitoring Service* (WGMS, por sus siglas en inglés), (IDEAM, 2012).

Estos tipos de análisis, corresponden a observaciones de la geometría del glaciar y cambios de masa, los cuales son descritos a continuación:

Geometría de glaciar

Busca evaluar sus cambios en la geometría durante determinado tiempo, conocer las variaciones de la masa de hielo en longitud, superficie y volumen. Estas mediciones incluyen métodos geodésicos del terreno, análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélite, reconstrucción con base en análisis geomorfológicos o de investigaciones históricas (IDEAM, 2012).

Las actividades más importantes para cuantificar estas variaciones son:

1. Mediciones de longitud con respecto a retroceso del frente del glaciar, las cuales se realizan mediante la ubicación de puntos fijos (rocas de gran tamaño, taludes de roca) cerca al límite inferior del

glaciar para obtener series de retroceso longitudinal (Figura 8-50, Figura 8-51), (IDEAM, 2012).

Si se dispone de equipos topográficos o equipos de posicionamiento satelital, se sugiere levantar semestral o anualmente el perímetro del frente glaciar siempre con la misma georreferencia con el fin de hacer comparaciones y cálculos de velocidades de retroceso.

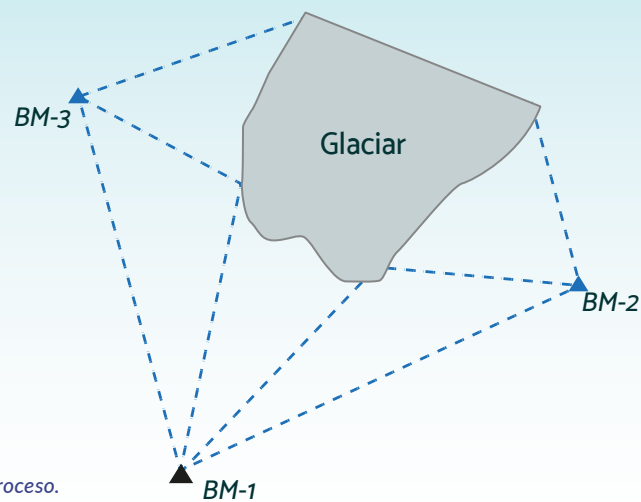


Figura 8-50. Esquema de medición de retroceso.
Fuente: (IDEAM, 2012).



Figura 8-51. Ubicación de un punto fijo utilizando un talud de roca para mediciones de retroceso.

2. Mediciones de superficie referidas al cálculo de área del glaciar; se realizan con base en la interpretación y procesamiento digital de fotografías

aéreas y de imágenes de satélite (*Landsat ETM, QuickBird, Spot, Aster, Alos y Rapid Eye*), (Figura 8-52), (IDEAM, 2012).

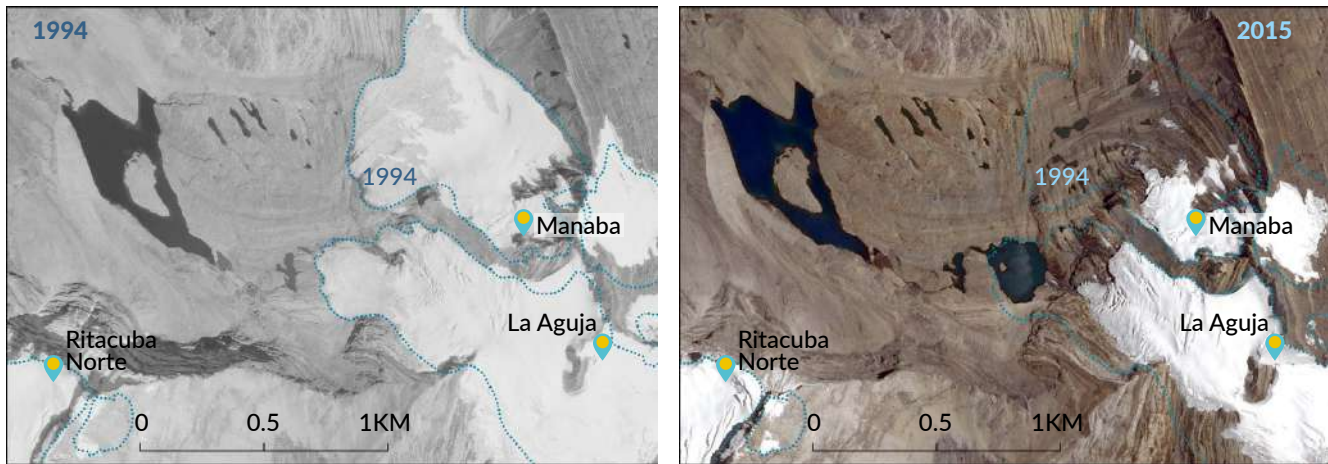


Figura 8-52. Evolución glaciar de la Sierra Nevada de El Cocuy o Güicán 1994 - 2015. Sector "Laguna la isla". Izquierda: aerofotografía (IGAC, 1994). Derecha: Imagen satelital SPOT 2015.

3. Mediciones del espesor del hielo, las cuales utilizan métodos geofísicos, destacándose los radares de penetración del suelo (GPR, por sus siglas en inglés), cuyo funcionamiento se basa en el principio de reflexión de ondas al encontrar dos medios físicos diferentes (hielo-roca). Básicamente se trata de una emisión y recepción de ondas desde la superficie del glaciar al encontrar en su recorrido el contacto entre el hielo y la roca (Ceballos, 2015).

También se pueden hacer mediciones, tales como gravimetría, sísmica de refracción o prospección eléctrica.

4. Mediciones con registro fotográfico, las cuales consisten en capturar fotografías digitales del frente, el hielo de la zona baja del glaciar con cierta periodicidad, generalmente asociada al año hidrológico, para

poder seguir visualmente la evolución del glaciar. La fotografía debe ser tomada desde el mismo lugar y ángulo, y si es posible, a la misma hora y con el mismo tipo de lente, además que cada punto de toma de la fotografía debe ser georreferenciado con GPS (IDEAM, 2012).

5. Mediciones topográficas, las cuales permiten construir la cartografía del glaciar, suministran información del área del glaciar, área parcial del glaciar (zona de ablación-acumulación), topografía del glaciar, hipsometría, cambios del borde de hielo del glaciar, evaluación del área glaciar, velocidad de desplazamiento del glaciar, además de ser insumo para el cálculo del volumen del hielo del glaciar y el balance de masa glaciológico (IDEAM, 2012).

Cambios de masa

Este tipo de mediciones permiten conocer cuánta agua gana o pierde la superficie de un glaciar en un periodo de tiempo determinado. La estimación de este balance de masa glaciológico, se puede realizar por medio de mediciones directas en el terreno a través de balizas o estacas, sondas para nieve y pozos de acumulación (IDEAM, 2012). Las balizas permiten cuantificar los cambios en la superficie del nivel del hielo o la nieve; la sonda para nieve permite conocer el espesor hasta el hielo.

En pozos de acumulación, permiten cuantificar la acumulación neta de nieve o hielo. La acumulación neta en un punto se mide de forma directa mediante un pozo excavado o una perforación, es preferible al final del año hidrológico. El cambio de hielo y/o nieve a agua se calcula midiendo la densidad del mismo, empleando para ello una balanza electrónica (Ceballos, 2015).

8.1.3.4 Equipos-instrumentación

El monitoreo de los glaciares requiere la manipulación de métodos e instrumentos en los campos de la topografía, geodesia y prospección geofísica. Se trata no solo de herramientas indispensables para analizar la dinámica de la masa de hielo, sino también de técnicas, como la restitución aerofotogramétrica o el análisis de imágenes de satélites,

que pueden ofrecer una alternativa a varias observaciones efectuadas tradicionalmente a partir del terreno (Francou & Pouyaud, 2004).

Se presentan algunos de los instrumentos utilizados para medición de los glaciares, entre los que se encuentran: balizas para determinar el desplazamiento superficial, sondas para nieve y equipos de prospección geofísica como el radar de penetración del suelo.

Balizas o estacas

Son utilizadas para medir los cambios de masa en la superficie del glaciar, reflejados como pérdida o ganancia de hielo y se pueden homologar al limnómetro o a la mira hidrológica para la estimación de niveles de los ríos.

Estos instrumentos son en tubería PVC de una pulgada de diámetro, se clavan sobre el glaciar a una profundidad no menor a cinco metros y dejan sobresalir en la superficie un tramo de algunas decenas de centímetros (emergencia de la baliza). Las balizas se clavan en secciones de dos metros y cada sección va unida a la otra con cordel o cable metálico. Cada sección de estaca se identifica con un número romano (I, II, III); la sección III es la superior (Figura 8-53). La idea de las secciones es dar flexibilidad a las balizas, disminuir el riesgo de pérdida total y a medida que se funde el hielo, no quede un solo tubo sobresaliendo (Ceballos, 2015).

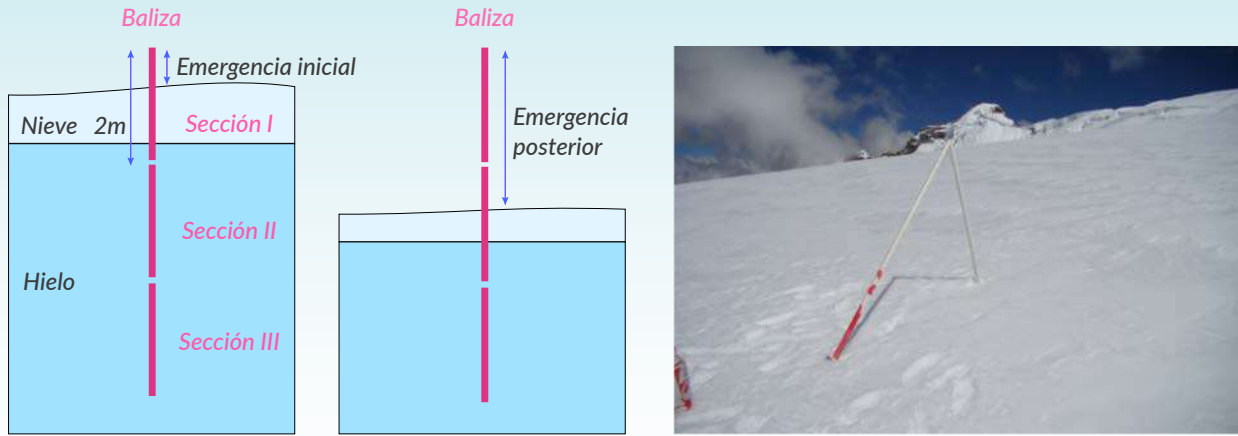


Figura 8-53. Izquierda: Baliza dispuesta sobre la superficie del glaciar y su medida entre dos periodos de tiempo. Derecha: Baliza Ritacuba Blanco 3, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán.

Estas balizas pueden encontrarse distribuidas en una red, que permita una mayor precisión. Esta red puede estar en forma de cuadrilla (malla) o en forma

lineal, con balizas separadas cada 25 o 50 m de altitud (Figura 8-54), (IDEAM, 2012).

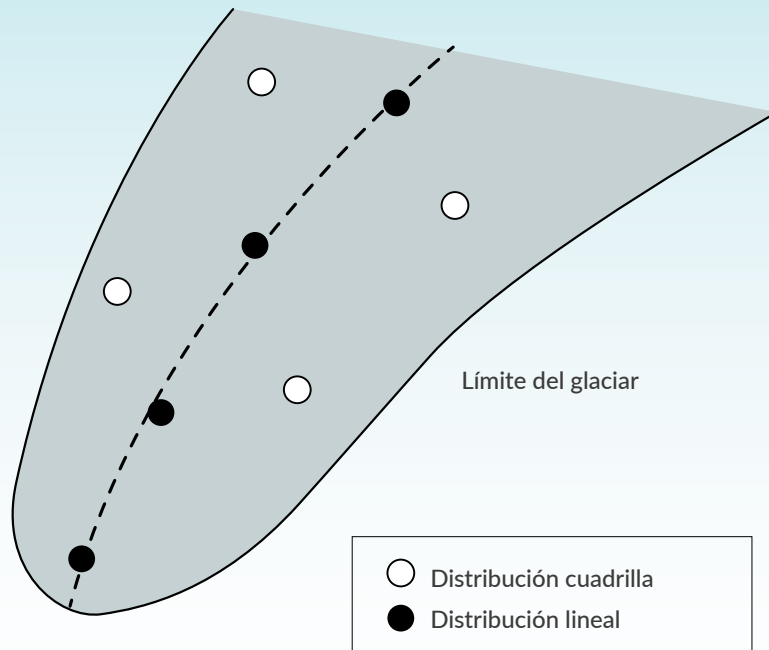


Figura 8-54. Distribución de la red de balizas. Fuente: (IDEAM, 2012).

Sonda para nieve

Consiste en un tubo de aluminio plegable delgado, el cual tiene una escala métrica (Figura 8-55); es un

instrumento bastante delgado que traspasa fácilmente la nieve y permite conocer su espesor hasta el hielo (IDEAM, 2012).



Figura 8-55. Captura de valores de espesor de nieve con el uso de una sonda para nieve. Fuente: (IDEAM, 2012).

Radar de penetración del hielo

Este equipo utiliza impulsos cortos de energía electromagnética de radiofrecuencia que se dirigen al sustrato glaciar mediante una antena trasmisora. Consiste en un transmisor ubicado en la superficie glaciar y un receptor ubicado en la misma superficie a una distancia horizontal del transmisor. Cuando la onda radiada encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de

los materiales del hielo, una parte de la energía se refleja de nuevo a la superficie y la otra parte se transmite hacia profundidades mayores. La onda en retorno es captada por el receptor y el equipo registra los tiempos dobles de transmisión del pulso (Figura 8-56, Figura 8-57). El espesor del hielo se determina a partir del tiempo empleado por la sonda, entre su salida desde el trasmisor y su retorno al receptor (IDEAM, 2012).

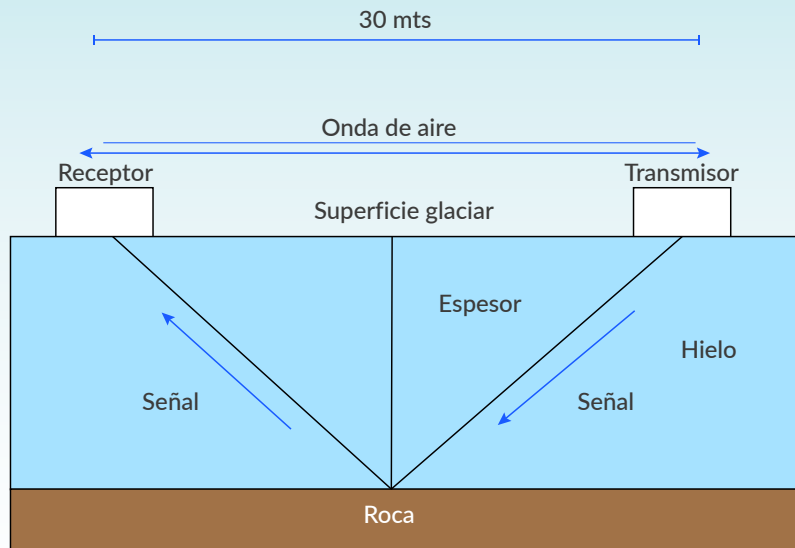


Figura 8-56. Esquema ilustrativo de radar de impulso para determinar espesores de hielo. Fuente: Adaptado de Ceballos, 2015.

En el mercado existen varias referencias, algunas son utilizadas por el IDEAM como el sistema de osciloscopio Fluke y el osciloscopio Picoscope, es este

último el más utilizado ya que permite analizar de forma más eficiente los datos provenientes del radar.



Figura 8-57. Transmisor utilizado para determinar el espesor del hielo, este envía una señal la cual es recibida por un receptor.

Perforadora de hielo tipo Heucke

Es un instrumento utilizado cuando se va a trabajar con balizas; genera vapor de agua caliente que es conducido por una manguera y al contacto con el

hielo lo funde, formando un orificio de una pulgada de diámetro y hasta 12 m de profundidad para insertar una baliza de varias secciones (Figura 8-58).



Figura 8-58. Izquierda: Detalle de perforadora Heucke. Derecha: Perforación de hielo empleando la perforadora Heucke.

Levantamientos topográficos

Para levantamientos topográficos del glaciar, se utilizan instrumentos topográficos y geodésicos tales como el Sistema Global de Navegación por Satélite

(GNSS por sus siglas en inglés) en sus modos dinámicos (navegación y cinemático) o estático (diferencial), (Figura 8-59) o los métodos tradicionales de topografía como teodolitos y distanciómetros (IDEAM, 2012).

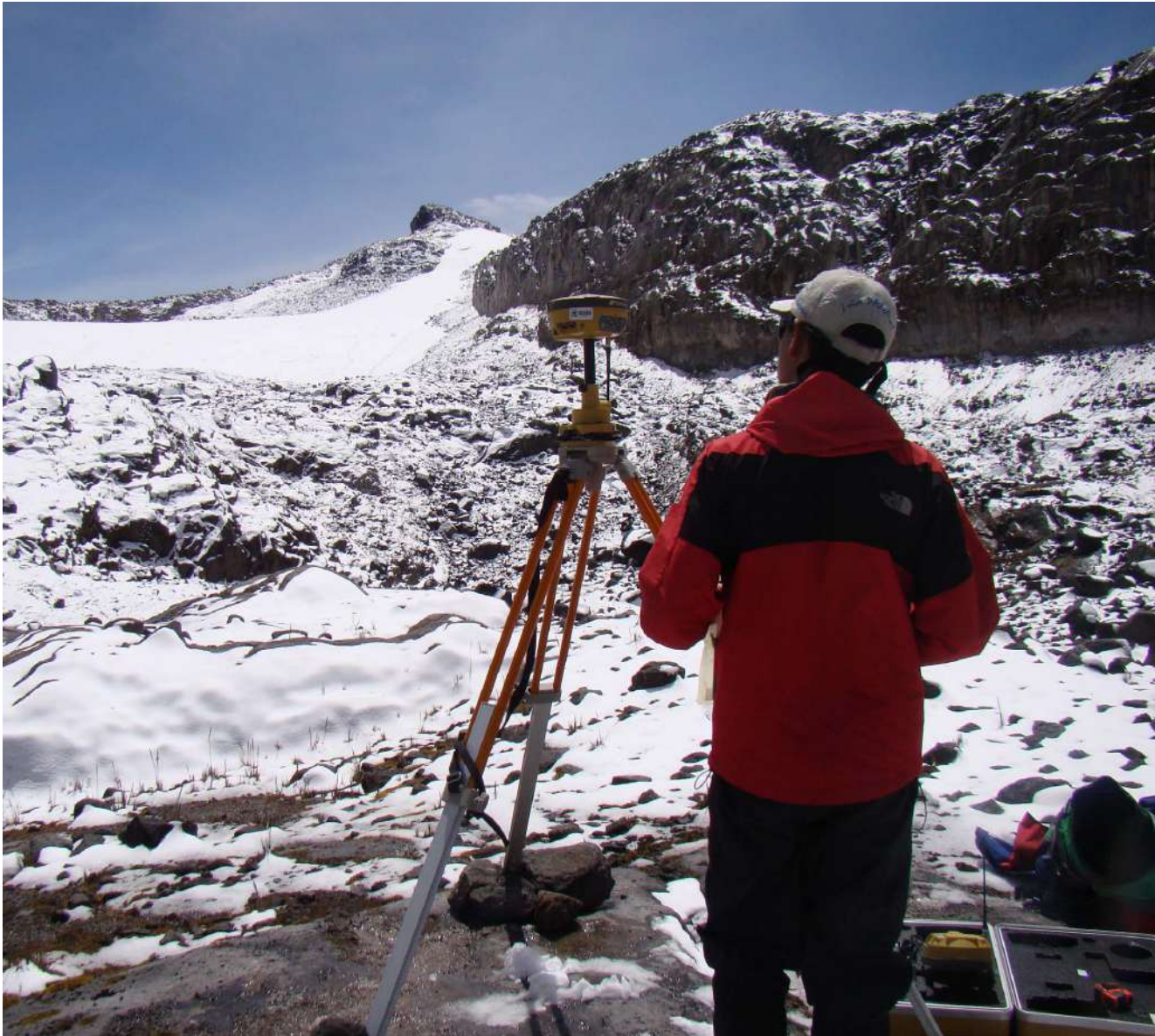


Figura 8-59. Levantamiento topográfico utilizando un equipo GNSS diferencial.

Sensor de nivel de agua de fusión glaciar

Para el cálculo del caudal de agua líquida (agua de fusión glaciar) que aporta un glaciar, es necesario instalar cerca al borde del glaciar y donde se

concentra el agua de derretimiento, una estructura aforadora de cualquier tipo según las condiciones locales. Estas estructuras son descritas en la sección 8.1.2 Caudales.

8.1.3.5 Procedimientos para las mediciones

A continuación, se describen los procedimientos para las mediciones correspondientes a observaciones de la geometría del glaciar y cambios de masa:

Retroceso del glaciar

Se debe medir desde puntos fijos (como rocas de gran tamaño o taludes de roca cerca al límite inferior glaciar), la distancia hasta el límite del hielo (no la nieve). Estas rocas son marcadas, colocando

la fecha de medición, y desde ese punto, se mide la distancia hasta la mínima del hielo con una cinta métrica y en dirección de la pendiente, (Figura 8-60). También se debe registrar la altitud del borde del hielo (Ceballos, 2015).

Cada medida se anota en metros y se registra en un formato indicando la fecha y las observaciones de las medidas. Es recomendable tener varios puntos de medición alrededor del glaciar, los cuales deben ser georreferenciados con GPS (Ceballos, 2015).

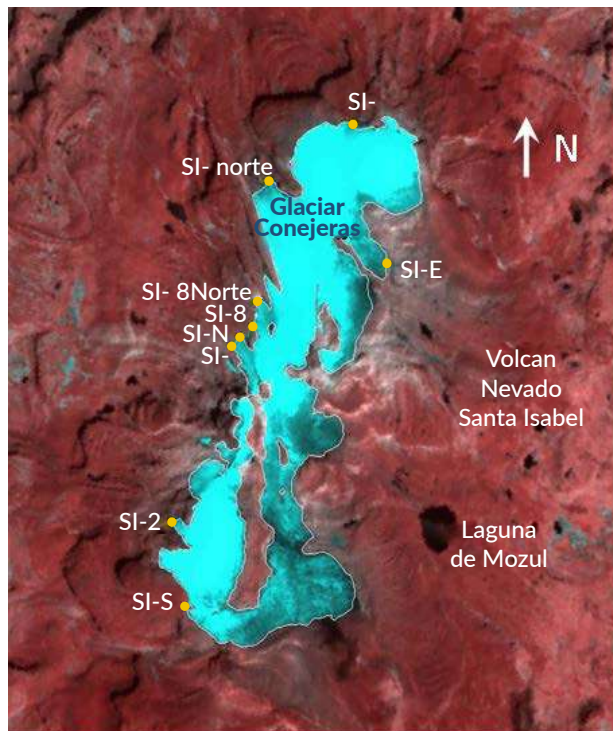


Figura 8-60. Puntos de retroceso longitudinal monitoreados a 2015 en el volcán nevado Santa Isabel por el IDEAM. Fuente: (Ceballos, 2015), (Imagen Spot, 2006).

Se debe considerar que después de varios años, estos puntos que inicialmente fueron marcados, van a quedar alejados del borde del hielo. En este caso, se deben identificar otros puntos fijos.

Espesor del hielo

Para mediciones del espesor del hielo con el radar de penetración, los puntos deben estar georreferenciados y deben ser identificados con un código. Es

recomendable emplear este código de identificación para cualquier glaciar, precedido por el nombre del mismo y de esa manera identificar fácil el punto de registro (tiempo, ubicación, espesor).

Balance de masa

En el caso de utilizar balizas, estas deben ser insertadas en el glaciar. La forma más práctica es utilizando una perforadora de hielo tipo Heucke.

Consisten en medir con un flexómetro la parte de la baliza que está en la superficie, desde el borde superior hasta el punto donde se encuentra el hielo (Figura 8-61). Estos datos deben ser registrados en un formato, en donde se debe escribir el número de la sección en la que se encuentra la baliza, la medida de emergencia, el espesor de nieve y las observaciones de cada baliza.



Figura 8-61. Medición de balizas en monitoreo de glaciares colombianos.



Figura 8-62. Captura de medición del espesor de la capa de nieve con el uso de una sonda. Sierra Nevada El Cocuy.

Cuando se utilizan sondas para realizar mediciones de la capa de nieve, estas deben ser enterradas y tomar la medida de la profundidad a la que se encuentra el hielo o hasta donde la sonda llegue (Ceballos, 2015), (Figura 8-62).

Cuando se realicen pozos de acumulación (Figura 8-63), se deben considerar las siguientes recomendaciones presentadas en el documento *Método de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales* (Francou & Pouyaud, 2004):

1. Escoger una zona regular y seleccionar un rectángulo de 3 x 1 m, paralelo al eje de la pendiente general.
2. Excavar de tal manera que la pared donde se haga el muestreo sea ubicada en la parte que da hacia la pendiente mayor, evacuando la nieve hacia la parte baja del pozo perforado.
3. Hacer peldaños hacia la parte baja del pozo aproximadamente cada 50 cm.
4. Dejar homogénea la pared del muestreo con una pala lisa.
5. Cuando se encuentre la capa basal, colocar el flexómetro contra la pared para medir de forma continua la altura.
6. Tomar la muestra de nieve haciendo penetrar el tubo verticalmente.
7. Una vez llenado el tubo se pesa la muestra sobre la balanza, la cual debe estar ubicada de forma horizontal.
8. Tomar nota del dato arrojado por la balanza para cada muestra de nieve recolectada.

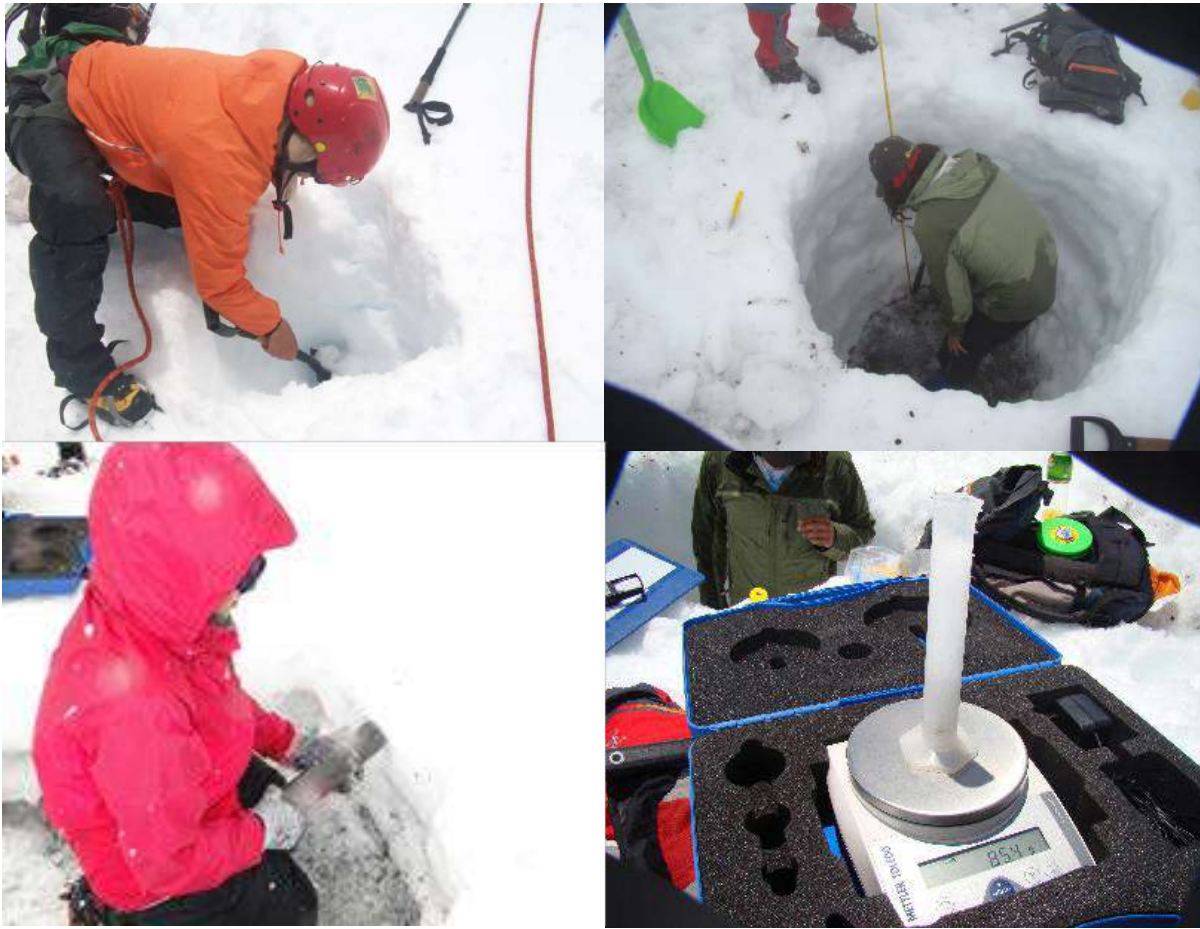


Figura 8-63. Consideraciones generales para las mediciones en pozos de acumulación. Sierra Nevada de El Cocuy.

En Colombia, la tendencia es la disminución en la cantidad de precipitación sólida (nieve y neviza), por lo que hacer pozos de acumulación resulta cada vez más esporádico. Solo en los glaciares altos que superen los 5000 m de altitud aún es posible encontrar acumulaciones de algunos metros susceptibles de medir. Sin embargo, las pequeñas y eventuales acumulaciones de nieve deben ser registradas (espesor promedio en varios puntos o aprovechando las balizas de ablación instaladas sobre la superficie del glaciar).

Es recomendable, para calcular de forma general la nieve acumulada durante un periodo de tiempo, que puede ser un año, esparcir en las cumbres nevadas aserrín sobre algunos metros cuadrados (2 a 4 m²), registrar su posición geográfica y en lo posible, instalar una baliza para identificar, un año después, el sitio donde se arrojó este material. Una vez identificado, se excava hasta encontrar el aserrín y se mide la altura de la excavación que será el dato de acumulación. Se aprovecha el pozo para tomar muestras de nieve y calcular su densidad cada 10, 20 o 30 centímetros.



PNN Los Nevados
📷 Jorge Luis Ceballos

8.1.4 Sedimentos

De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional publicado por la OMM, el sedimento es todo *material transportado por el agua desde su lugar de origen al de depósito. En los cursos de agua, son los materiales aluviales llevados en suspensión o como arrastre de fondo*, (OMM, 2012).

Los sedimentos en los cursos de agua están asociados con el fenómeno de la erosión, principalmente por el potencial erosivo del agua. La erosión producida por el agua puede ser de tres tipos:

- a. Erosión laminar, que consiste en la remoción de la capa superficial del suelo, zanjas o cárcavas, estado en que los cauces van creciendo y profundizando en el tiempo.
- b. Erosión fluvial, es un fenómeno por el cual un río socava su propio lecho y erosiona los taludes, esta erosión es asociada a movimientos de remoción en masa sobre las vertientes, los cuales no siempre reflejan en un aporte inmediato de sedimentos a los cursos de agua, toda vez que los materiales arrancados se depositan en la parte inferior del deslizamiento. No obstante, si los fenómenos ocurren cerca a los cauces o sobre los mismos, el material no solo llega en forma más o menos rápida a la corriente, sino que la puede taponar, ocasionando represamientos momentáneos, que, al reventarse, aumentan la fuerza erosiva de la corriente sobre sus márgenes y, por tanto, su carga sólida.
- c. Erosión antrópica, causada por el ser humano y sucede como consecuencia de las prácticas agropecuarias inadecuadas, donde es habitual cultivar en terrenos inclinados; dependiendo de las características de los suelos se puede ocasionar a corto, mediano y largo plazo el desgaste de los mismos. En

suelos inclinados y pobres en nutrientes, las actividades como el sobrepastoreo, permiten la pérdida de hierba o de pasto y dificultan su regeneración, fomentan la sequedad, desertización y facilitan la erosión. La Figura 8-64 ilustra en forma resumida las principales características de los sedimentos y sus procesos de medición.

Según la manera como se transportan los sedimentos en el flujo, estos se clasifican en *de fondo*, *de arrastre de fondo*, *en saltación* y *en suspensión*.

De fondo: Compuestos por los materiales depositados por la corriente en el lecho del río.

De arrastre de fondo: Son aquellos materiales que se deslizan o ruedan por el lecho de un río por acción de la velocidad de la corriente, forman rizos y dunas.

En saltación: Es el material procedente del fondo sustituido por las partículas más finas, que en un momento dado adquiere la suficiente energía para abandonar el lecho, mantenerse en suspensión durante algún tiempo y caer más adelante.

En suspensión: Conformado por las partículas de menor tamaño que se mantienen suspendidas por efecto de la turbulencia de la corriente y se mueven a velocidad similar a la del flujo.

Los sedimentos se clasifican, según su tamaño, en gruesos (gravas y arenas) y en finos (arenas finas, limos y arcillas). Esta clasificación tiene implicaciones dinámicas relacionadas con la forma como estos materiales son transportados y depositados por el flujo.

Los **sedimentos gruesos** se mueven por arrastre sobre el fondo de las corrientes; la intensidad de su movimiento depende de las condiciones y de la turbulencia del flujo cerca del fondo. Su transporte disminuye rápidamente con cualquier reducción de la intensidad del flujo, causada por un aumento en

la profundidad o por la reducción de la pendiente y la velocidad.

Los **sedimentos finos** cuya velocidad de asentamiento es mucho menor que la magnitud de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad en el sentido vertical, viajan en suspensión en el agua y están

totalmente sustentados por el flujo, aun en muy bajas velocidades. Por esta razón, no responden inmediatamente a los cambios de velocidad del agua o de intensidad general del flujo. Estas partículas suelen depositarse en forma más uniforme en el canal o en cualquier cuerpo de agua.

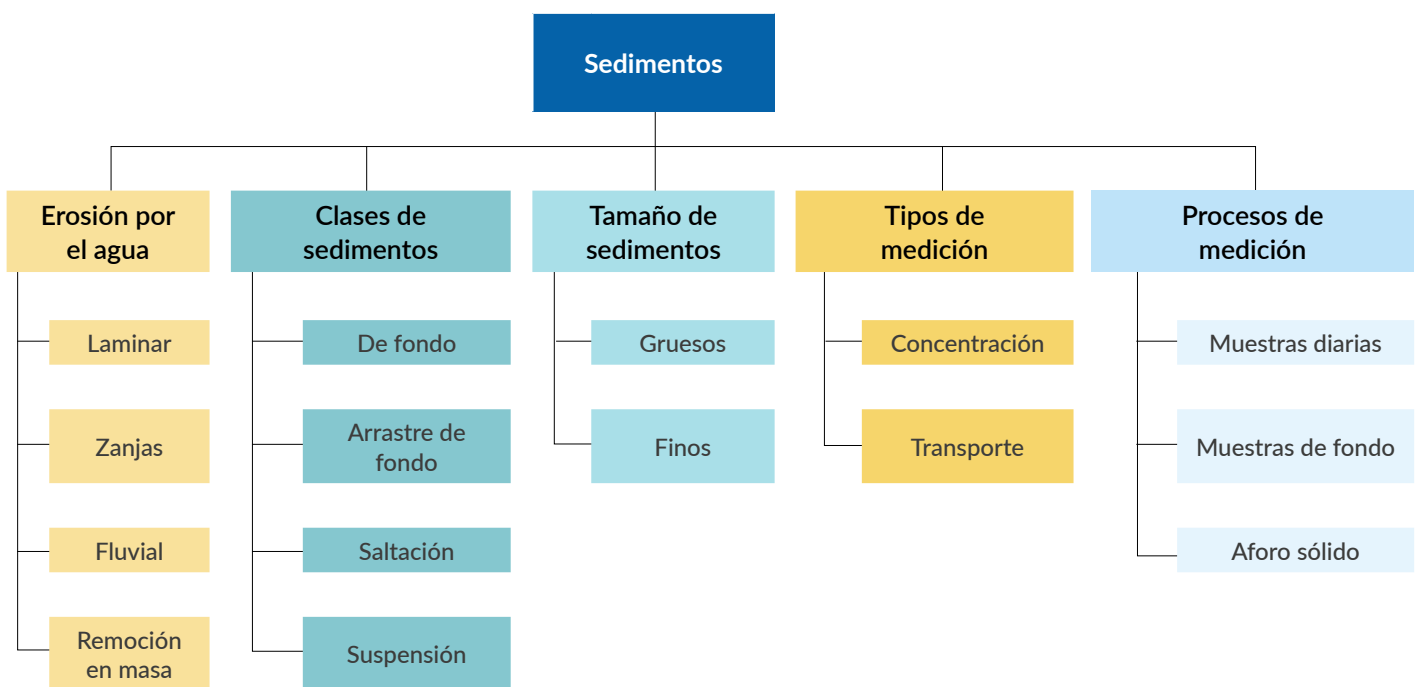


Figura 8-64. Tipos de sedimentos y procesos de medición.

La medición de los sedimentos se realiza mediante la determinación de la *concentración* del material en suspensión en el agua, y mediante la determinación del *transporte*.

1. Se denomina **concentración** a la cantidad de sólidos que se encuentran en una unidad de solución (sólido + líquido). Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm), o en peso de sólido por

unidad de volumen líquido, es decir una parte por millón (1 ppm) es igual a 1 miligramo por litro (mg/l) y a 0.001 kg/m³.

Teóricamente las mayores concentraciones se distribuyen en los estratos más bajos que en los más altos dentro de un cauce natural; pero este proceso no se comporta igual cuando existe un intercambio turbulento de las masas de agua, en el cual las que

suben transportan más partículas hacia la superficie que las que descienden hacia el fondo (MAVDT & IDEAM, 2011).

De esta forma se establece un estado de equilibrio entre el transporte descendente y el ascendente promedio debido al intercambio turbulento. Esto significa que una mayor turbulencia genera mayor uniformidad en la distribución de los sedimentos, mientras que, a mayores velocidades de asentamiento, derivados por un flujo más lento y regulado, resulta una distribución menos uniforme, con altas concentraciones cerca al fondo y bajas concentraciones hacia la superficie de la corriente.

Para determinar la carga sólida en suspensión de una corriente y para establecer tanto el transporte como la distribución de las diferentes partículas del material que la componen, normalmente se toman muestras a lo ancho de la sección de medida. La concentración media en una vertical es el promedio de las concentraciones de todos los puntos de la vertical. El propósito de realizar una campaña de mediciones es establecer un sistema adecuado para la selección de un número limitado de muestras que garanticen la representatividad de las concentraciones obtenidas, o sea, un buen estimativo de la concentración media en la sección de medida.

La concentración media C_m (kg/m^3) en la sección resulta de dividir la *carga de sedimentos* T (kg/s) entre el *caudal líquido* Q (m^3/s) (Ecuación 8-38):

$$C_m = \frac{T}{Q}$$

Ecuación 8-38

2. El **transporte** de sedimentos es la cantidad de sólidos que transporta una corriente en la unidad de

tiempo, y se obtiene con base en muestreo de sedimentos; el transporte total comprende tanto el sedimento que se traslada suspendido en la corriente como el que viaja arrastrándose o rodando por el fondo; el transporte de arrastre de fondo se mide directamente con muestreadores especializados para este fin y se expresa generalmente en $\text{m}^3/\text{día}$, y el transporte de sedimentos en suspensión se refiere a la cantidad de sólidos o sedimentos suspendidos que pasan por la sección de una corriente en una unidad de tiempo, se expresa generalmente en $\text{t}/\text{día}$ o kg/s .

El transporte de sedimento en suspensión T (kg/s) es igual al producto de la concentración media C_m (kg/m^3) por el caudal líquido Q (m^3/s) que pasa por una sección (Ecuación 8-39).

$$T = Q * C_m$$

Ecuación 8-39

Los procesos involucrados en la determinación de la concentración y el transporte de sedimentos son tres, el aforo sólido, la toma de muestras diarias y de fondo.

El aforo sólido es el proceso por el cual se determina la cantidad de sólidos suspendidos que transporta un curso de agua en una unidad de tiempo y para un nivel de agua dado. Consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforos, a lo ancho y en profundidad, para determinar la concentración y el transporte de sedimentos, asociados al nivel y al caudal que se presenta en la corriente durante el muestreo.

Muestreo y tipos de muestras. El muestreo es el proceso por el cual se toma una muestra o cantidad de agua representativa de las condiciones de un río, lago o pozo, para ser analizada luego, bien sea en campo o en el laboratorio. La calidad de los datos depende,

en primer lugar, de que el muestro se haya hecho correctamente. Los métodos de muestreo por utilizar (equipo y procedimiento) dependen de factores tales como el tipo de agua a muestrear, su calidad y el tipo de muestra.

Se pueden distinguir dos tipos principales de muestras:

1. **Muestras puntuales:** Se trata de muestras discretas tomadas en un punto, a una profundidad y en una fecha determinadas, con el fin de caracterizar la carga de sedimentos en suspensión en ese sitio y tiempo, o bajo diferentes volúmenes de muestra. Este tipo de aforo se utiliza en secciones profundas mayores de cinco metros. No obstante, es posible hacer aforos puntuales a profundidades menores, siempre y cuando el muestreador lo permita y se garantice el manejo del muestreador. Asimismo, si se emplea el muestreador USP-61 (ver más adelante, sección 8.1.4.4 *Instrumentos de medida*), no se recomienda a profundidades mayores a 15 m. En general, se toman varias muestras en una vertical, a diferentes profundidades previamente establecidas, cuyo número depende de la precisión del muestreo, las cuales posteriormente se mezclan, para constituir una muestra compuesta. El número de verticales a lo ancho de la sección de aforo no debe ser menor de seis. El aforo del caudal líquido debe ser simultáneo o previo a la medición del aforo sólido.

2. **Muestras integradas:** En este tipo de muestreo, el muestreador recorre la vertical en ambas direcciones (superficie-fondo-superficie), de tal manera que durante el doble desplazamiento en la vertical se tome una muestra que representa la concentración media en la vertical.

Muestras de fondo. Consiste en instalar o construir sistemas que atrapan los sedimentos que se des-

plazan por el fondo de la corriente (trampas), pesarlos y determinar la cantidad de arrastre por unidad de tiempo.

En el presente protocolo se describe la forma como se debe medir el caudal sólido, la representatividad del sitio donde se mide, la frecuencia y hora de medición, las unidades en que se mide, la recolección de los datos y su procesamiento, validación, almacenamiento y difusión.

Antes de describir los métodos de observación, es necesario tener en cuenta los procesos que intervienen en el monitoreo de sedimentos, tal como se resumen en la Figura 8-65.

- Diariamente se toman muestras superficiales de agua, de las cuales se realizan determinaciones de concentración superficial de sedimentos.
- Periódicamente se realizan aforos sólidos, que permiten determinar la concentración media de sedimentos en suspensión en la sección de aforos, así como la concentración superficial. Con base en los aforos sólidos se determina la relación entre caudal líquido y caudal sólido, se establece la relación entre concentración superficial y media de los aforos. Con esa relación y la serie de concentraciones superficiales diarias, se genera la serie de concentraciones medias diarias. Con esta serie y con la serie de caudales líquidos se determina el transporte diario de sedimentos en suspensión. La relación entre el caudal líquido y el caudal sólido también permite determinar el transporte diario.
- Para conocer el transporte total de sedimentos de una corriente, es necesario, además del muestreo de sedimentos en suspensión, realizar el muestreo de material de arrastre de fondo, cuyas muestras también requieren un proceso especial de laboratorio (granulometría).

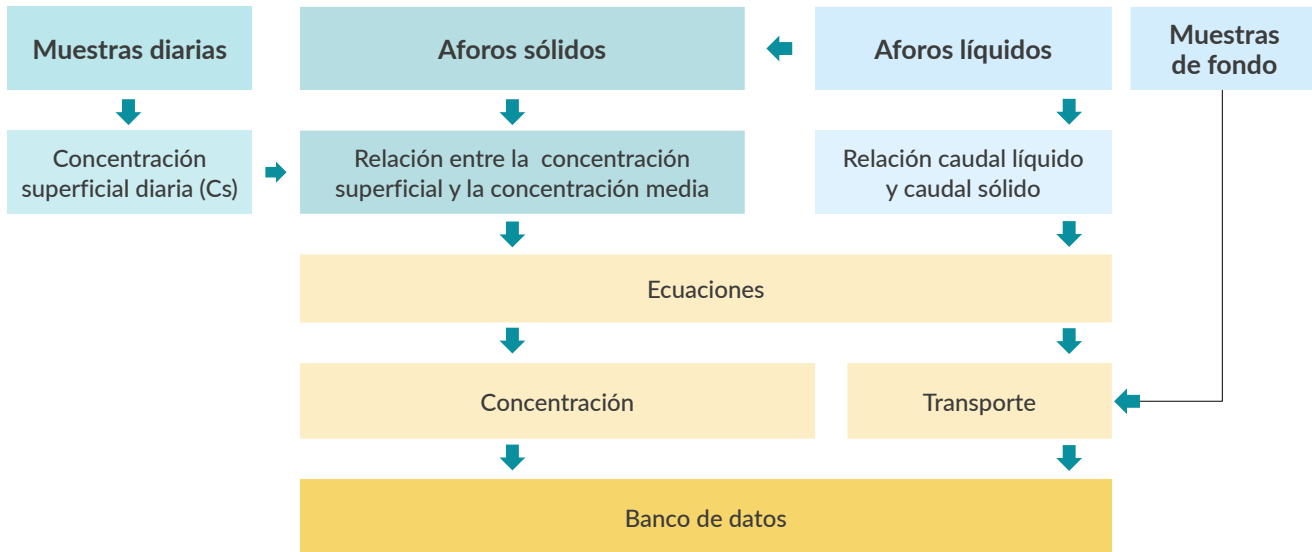


Figura 8-65. Componentes del monitoreo de sedimentos. Fuente: (IDEAM, 2009).

8.1.4.1 Medición de sedimentos y caudales sólidos

Cuando se va a iniciar un programa de monitoreo de sedimentos o caudal sólido de los cursos o cuerpos de agua, la **primera pregunta** que se debe contestar es **¿para qué se mide?** No vale la pena gastar recursos económicos, técnicos y humanos en algo que no se sabe para qué va a servir. En principio, es importante medir los sedimentos de una corriente de agua con tres propósitos principales.

- Para conocer el transporte de sedimentos de una corriente, en atención a su importancia en la calidad del agua y en los procesos de aprovechamiento del agua y de los cauces para distintos fines.
- Para conocer la influencia que la carga sólida tiene sobre la amenaza que las crecidas de la corriente representan para las instalaciones o actividades humanas existentes o previstas en las proximidades del cauce, toda vez que mientras mayor sea la carga sólida

mayor es la energía cinética del agua y aumenta su poder destructor sobre infraestructuras y viviendas, entre otros.

- Para soportar programas de protección de fuentes hídricas frente a amenazas de origen antrópico.
- Si no existe la necesidad de conocer el caudal sólido (porque el agua o el cauce no se usa o no se va a usar, por ejemplo) o no existe un riesgo⁶ actual o potencial ligado a las crecidas, o el curso o cuerpo de agua no está amenazado por procesos de sedimentación, no se justifica medir su caudal sólido.

Dentro de este marco, el conocimiento de los sedimentos de una corriente o cuerpo de agua se justifica por su uso para los siguientes fines, entre otros:

- Protección de la navegación fluvial, marítima y terrestre.

⁶ El riesgo resulta de la probabilidad de una amenaza (crecida en este caso) pueda afectar una actividad o instalación humana (vulnerabilidad).

- Diseño de obras civiles (alcantarillados, presas, carreteras, etc.).
- Diseño y operación de embalses.
- Planificación y control de riego y drenaje.
- Pronóstico de avenidas torrenciales e inundaciones, prevención y atención de desastres naturales y estudios de riesgo.
- Control de aprovechamientos hídricos y vertimientos.
- Planeación municipal, departamental y nacional.
- Sector académico, investigación, programas internacionales de intercambio de datos, programas internacionales de investigación, etc.

El aforo sólido se considera como el conjunto de operaciones para determinar la cantidad de sólidos suspendidos y de fondo que transporta un curso de agua en la unidad de tiempo, para un caudal líquido y un nivel de agua determinado.

El aforo sólido consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforos, a lo ancho y en profundidad, para determinar la concentración y el transporte de sedimentos, referenciados al nivel y al caudal que se presenta en la corriente durante el muestreo. Los puntos de medición o muestreo deben coincidir con los realizados en el aforo líquido, pues los primeros están en función de los resultados obtenidos del aforo líquido. Por lo tanto, tener en cuenta que, para todos los métodos de aforo de sedimentos, la medición del aforo de caudal líquido debe ser simultánea o antes del aforo sólido.

Como parte integral del aforo sólido se aprovecha el material sólido recogido en las muestras, para realizar análisis granulométricos que permiten determinar el tamaño de las partículas asociado al tipo de material.

Es importante mencionar que el fenómeno del transporte de sedimentos en los cauces está gobernado

por la turbulencia y las formas de los lechos de los ríos, lo cual imprime al proceso un carácter muy variable en el tiempo y el espacio que debe ser capturado durante el monitoreo de los sedimentos para obtener una mayor precisión en la estimación del transporte sólido anual típico de las corrientes. Para tal fin, es necesario realizar mediciones en diferentes estados de la corriente y de esta forma cubrir todos los rangos de variación de niveles y caudales, desde mínimos hasta máximos durante el transcurso del año.

La **segunda pregunta** que surge en un programa de monitoreo de caudales es **¿dónde medir?** La selección del sitio o sitios de medición depende del objetivo del monitoreo, el cual puede requerir redes más o menos densas. Diseñada la red, si no existe, se debe definir el sitio o sitios específicos de medición, los cuales deben cumplir los mismos requerimientos de una estación de aforo líquido, a saber:

- a. La sección debe estar situada a un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección.
- b. La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la calibración de caudales máximos.
- c. La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme, evitándose tramos con quiebres fuertes de pendiente que desequilibran la velocidad de la corriente. Se deberá evitar áreas de aguas muertas y contracorrientes o remolinos.
- d. El lecho del río debe tener geometría regular, cauce estable y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.). Se debe evitar los lechos fangosos.

- e. La corriente debe mostrar líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente y deben ser normales a la sección transversal de aforos.
- f. La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las obras para medición como tarabitas, puentes, pasarelas y otras necesarias para el aforo líquido y sólido.

Una vez escogido el sitio de la estación, se debe realizar la hidrotopografía del mismo, cuyo objeto es conocer las características topográficas del área y tramo de emplazamiento de la estación, en especial en los siguientes aspectos: georreferenciación, topografía del sector de la estación e hidrotopografía del cauce en el tramo de aforos. Este conocimiento permite, además, reconstruir la estación, en caso de que sus obras sean destruidas por algún evento extremo. Dado que la estación de aforo sólido coincide con una estación de aforo líquido, los procedimientos de hidrotopografía son los mismos indicados en el protocolo de niveles y caudales.

8.1.4.2 Frecuencia de monitoreo de sedimentos

La frecuencia del monitoreo de sedimentos debe estar determinada por la variabilidad de la carga sólida del curso de agua y las condiciones de estabilidad de la sección. La toma de muestras superficiales de sedimentos en suspensión debe ser diaria, con tres muestras por cada muestreo. Los aforos sólidos se deben hacer una vez al mes, buscando en lo posible aforar en épocas de aguas altas, bajas y medias.

La toma de muestras de fondo debe corresponder con los objetivos del monitoreo, aunque, en lo posible se recomienda que tengan la misma frecuencia del aforo sólido. No existen, propiamente hablando, estaciones de muestreo de sedimentos

constituidas por instalaciones o infraestructuras especiales. Como se dijo, el muestreo se lleva a cabo en los mismos sitios de las estaciones hidrométricas, y aprovecha la infraestructura de estas. Por tanto, las visitas de inspección a los sitios de muestreo corresponden a las visitas de inspección de las estaciones hidrométricas (ver sección 8.1.1 Niveles y sección 8.1.2 Caudales).

En un programa regular de muestreo de sedimentos solo son transmisibles los filtros de las muestras tomadas, debidamente rotulados y empacados, los cuales deben ser enviados al laboratorio una vez finalice el aforo sólido. Por tanto, la frecuencia de envío de los filtros para análisis de laboratorio es la misma frecuencia del aforo sólido. Junto con las muestras o filtros tomados durante el aforo sólido, es necesario diligenciar las casillas del formato de aforo sólido que corresponda llenar con los datos de campo (ver sección 8.1.4.10 Registro y procesamiento de datos).

Los filtros de las muestras superficiales diarias deben ser debidamente almacenados y recogidos por la comisión de inspección, con la frecuencia con que esta se realice. Previo el envío de los datos y/o filtros al laboratorio de la entidad, los mismos deben ser objeto de un control de calidad por parte del área operativa o entidad involucrada, tal como se describe más adelante, en la sección 8.1.4.14 Validación de datos: CONTROL DE CALIDAD.

8.1.4.3 Parámetros por medir y unidades de medida

Parámetros por medir

- **Concentración de sedimentos en suspensión**
Concentración determinada en laboratorio a partir de las muestras tomadas en campo, bien sea diarias o correspondientes a los aforos líquidos.

• Transporte sólido

Resultante de aplicar las ecuaciones que relacionan la concentración con el caudal líquido y el caudal líquido con el caudal sólido.

Unidades de medida

La concentración se mide generalmente en unidades de peso por unidades de volumen, y generalmente se da en miligramos por litro (mg/l), que se pueden convertir en kilogramos por metro cúbico (kg/m³) o, en caso necesario, en toneladas por metro cúbico (t/m³). El transporte o caudal sólido se expresa en unidades de peso por unidades de tiempo, que generalmente se da en kilogramos por segundo (kg/s), aunque se puede convertir en toneladas por día (t/d) o kilotoneladas por año (kt/año).

8.1.4.4 Instrumentos de medida

Se ilustrará sobre los equipos e instrumentos para realizar el muestreo de sedimentos en suspensión y el muestreo de material de arrastre de fondo.

Equipos para medir a concentración de sedimentos en suspensión

No existe una forma única de efectuar mediciones del transporte de sedimentos en las corrientes hídricas, por lo cual los equipos utilizados son variados. En general, las mediciones de los sedimentos se realizan tomando muestras dentro del flujo en una sección de aforo para un nivel y un caudal determinado. La medición de cada tipo de sedimento depende de la heterogeneidad en el tamaño de los granos, la densidad y la manera como se transporta dentro del flujo de la corriente.

Para la toma de muestras de sedimentos en suspensión, los muestreadores son seleccionados dependiendo del tamaño y del tipo de partículas. Un listado importante de los muestreadores disponibles según el material a muestrear se encuentra en el Manual de Transporte de Sedimentos y Mediciones en Ríos, Estuarios y Mares Costeros (Van Rijn, 2006) que se muestra en la Tabla 8-12:

Tabla 8-12. Muestreadores y métodos de muestreo de carga de sedimentos en suspensión en ríos.

Tipo de método	Tipo de muestra	Precisión
Arcillas-Limos		
Bomba-Botella	Directa.	20% (botella llenada por bombeo durante 15 minutos a bordo de una lancha).
Arena		
Botella USP-61	Directa (botella en mano a una profundidad <1m).	20%-30% (se requieren muchas muestras), lejos del lecho.
Botella-Trampa	Directa (botella en mano a una profundidad <1m).	20%-30% (se requieren muchas muestras), lejos del lecho.
Laser (LISST)	Directa. Automático.	20%-30% (concentraciones < 150 mg/l).

Tipo de método	Tipo de muestra	Precisión
Arena		
Óptico (OBS)	Directa. Automático.	30%-50% (dependiendo del número de muestras de calibración; botellas llenadas, sensor en un bote).
Bomba-Óptica	Directa.	30%-50% (dependiendo del número de muestras de calibración; botellas llenadas, sensor en un bote).
Bomba-Botella	Directa.	20% (botella llenada por bombeo durante 15 minutos a bordo de una lancha).
Bomba-Filtro	Directa.	20% (submuestreo de partículas muy finas < tamaño del filtro).
Botella USP-61	Directa (botella en mano a una profundidad < 1m).	20%-30% (se requieren muchas muestras), lejos del lecho.
Botella-Trampa	Directa (botella en mano a una profundidad < 1m).	20%-30% (se requieren muchas muestras), lejos del lecho.
Acústico (ASTM, ABS)	Directa. Automático.	20%-30% (dependiendo del número de muestras para la calibración).
Laser (LISST)	Directa Automático.	20%-30% (concentraciones < 500 mg/l).
Botella Delft	Directa.	50% (requiere muchas muestras, submuestreo de partículas finas), lejos del lecho.

Fuente: (Van Rijn, 2006).

Como se observa en la Tabla 8-12, existe gran cantidad de muestreadores y estos se pueden dividir en manuales o automáticos.

Como lo plantea Davis (2005), en su guía para la selección y uso apropiado de los muestreadores de sedimento y calidad del agua aprobados en Estados Unidos, el creciente interés en la salud de los ríos y arroyos, además de la promulgación de las nuevas regulaciones de calidad del agua han promovido el interés en los equipos y tecnologías de muestreo de sedimentos y calidad del agua con el fin de obtener datos de calidad, que puedan ser usados por las instituciones tanto de tipo

público como privado, para el análisis de la condiciones actuales y la evaluación de proyectos de conservación e infraestructura, entre otras.

En los Estados Unidos, este interés data del año 1939, cuando fue creado el Proyecto de Sedimentación de la Interagencia Federal de los Estados Unidos (FISP), el cual se encargaba de unificar y estandarizar las actividades de investigación y desarrollo de las agencias federales involucradas en estudios de sedimentos fluviales. La nomenclatura del FISP para los equipos de muestreo de sedimentos denota la serie, tipo y el año en que se desarrolló (Figura 8-66).



Caño Cristales
▣ Claudia Andramunio

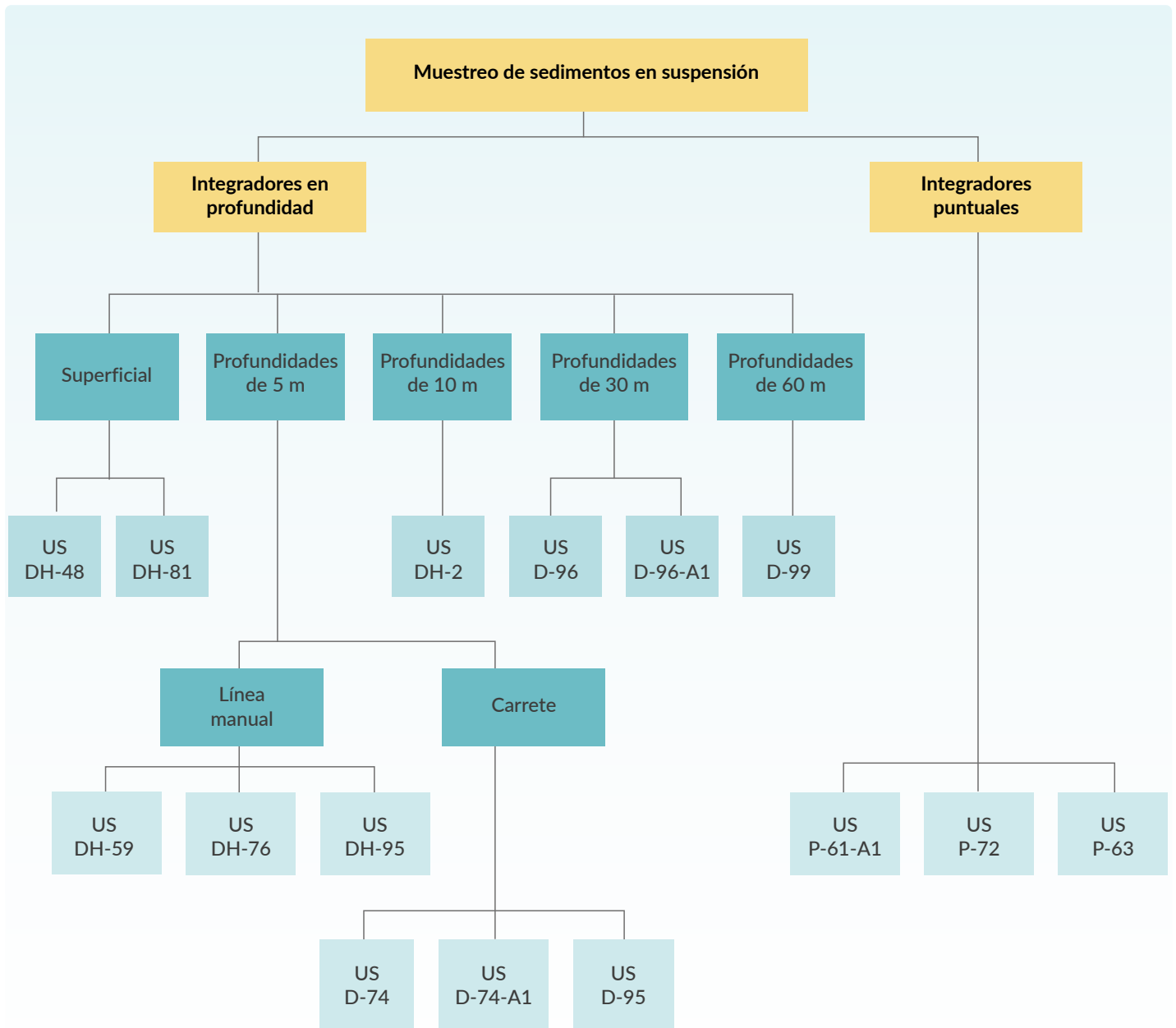


Figura 8-66. Integradores puntuales y de profundidad para medición de sedimentos.
Fuente: (Davis, 2005 en Van Rijn, 2006).

- ♦ US: Series Estados Unidos.
- ♦ D: Integrador en profundidad.
- ♦ P: Integrador puntual.
- ♦ H: De mano o de línea de mano.
- ♦ 00 (numérico): Año en cual empezó a desarrollarse.
- ♦ BL: Carga de fondo.
- ♦ BM: Material del lecho.
- ♦ SA: Analizador de sedimentos.

Por ejemplo, el US DH-48 es un muestreador de sedimento en suspensión integrador en profundidad y de uso manual que se fabricó en el año 1948; el US BL-84 es un muestreador de carga de fondo que data del año 1984; el US DH-2 es un muestreador de sedimento en suspensión y calidad del agua integrador en profundidad y de uso manual que fue desarrollado en el año 2002. La letra H en la designación del muestreador hace referencia a que este es de uso manual, si

esta no aparece, el equipo debe usarse en conjunto con un sistema de suspensión compuesto por un cable y un malacate. También es muy importante tener en cuenta las diferencias que existen entre: (1) Un río profundo (Figura 8-67), donde los muestreos se deben hacer desde puentes, tarabitas o botes caudivos, y (2) Un río de aguas someras donde el vadeo es posible y el muestreo es realizable manualmente (Figura 8-68).

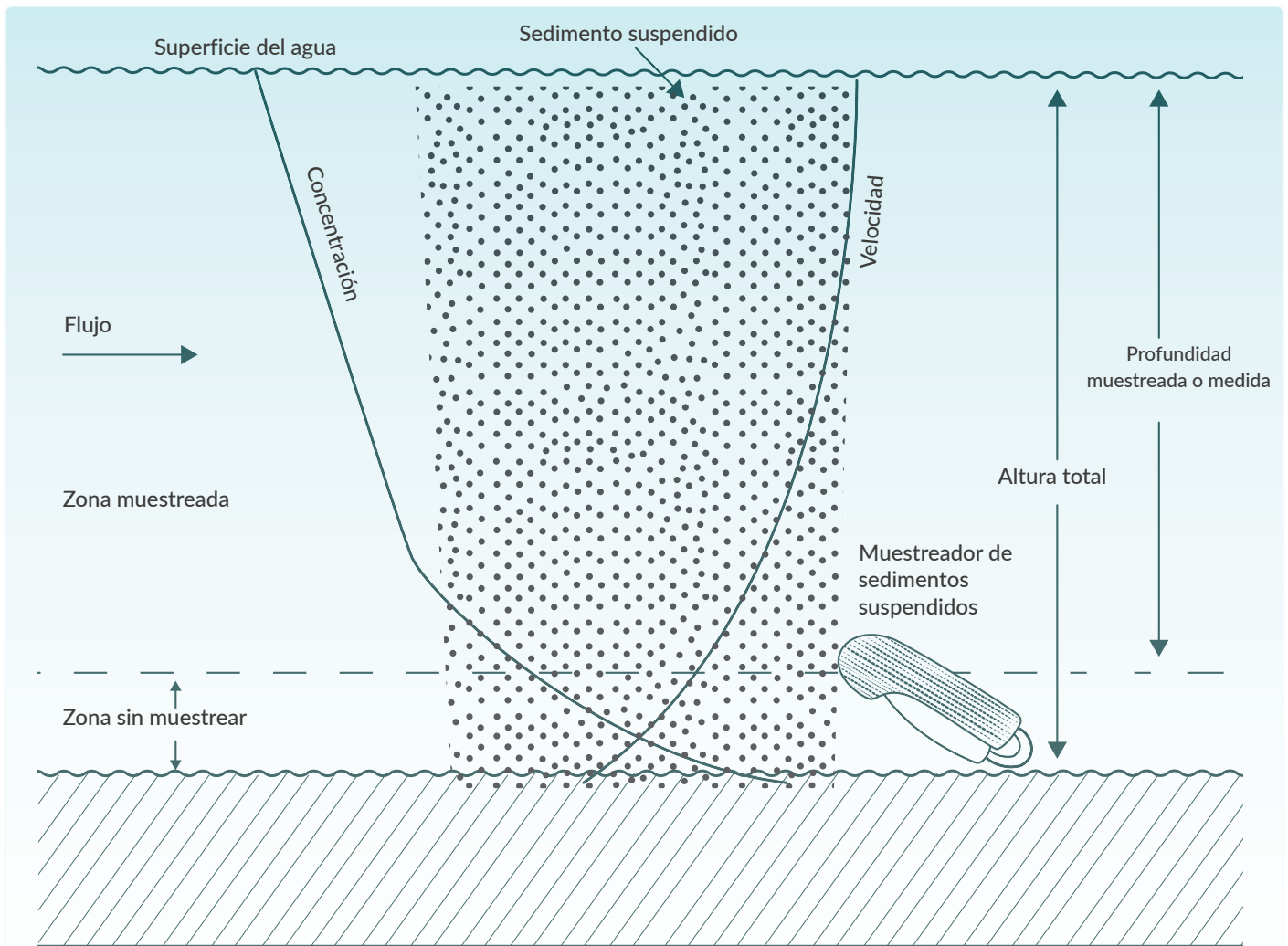


Figura 8-67. Zona muestreada y no muestreada en el perfil de una corriente, con respecto a los perfiles.
Fuente: (Edwards & Glysson, 1999).



Figura 8-68. Río Fonce. Izquierda: Corriente profunda y aforada desde Tarabita. Derecha: Taquiza, corriente de aguas someras y vadeable.

El equipo de muestreo de sedimento en suspensión del FISP es diseñado y calibrado para muestrear isocinéticamente. Un muestreador isocinético recoge una muestra agua-sedimento de la corriente a una tasa igual a la velocidad de la corriente incidente en la boquilla de admisión. La muestra agua-sedimento recogida es proporcional a la velocidad instantánea en el centro de la boquilla de admisión y por lo tanto es representativa de la carga de sedimento en ese punto. Existen numerosos tipos de muestreadores de carga en suspensión, cada tipo varía según el objetivo del muestreo si es integrado isocinético o si es puntual; además el tamaño del muestreador varía según el tipo de río, para corrientes pequeñas que pueden ser vadeables se pueden utilizar los más pequeños y a medida que aumenta el tamaño del río se incrementa el tamaño del muestreador.

En velocidades menores de 0.5 m/s, los muestreadores que usan contenedores rígidos (botellas de plástico o de vidrio), tienen una leve cabeza estática entre el escape de aire y la boquilla, de manera que el muestreador todavía recogerá la muestra. El usuario

u operador del equipo y el personal encargado de analizar los resultados deberá entender que la muestra recogida bajo estas condiciones no es una muestra isocinética.

Los muestreadores de sedimento en suspensión isocinéticos se dividen en dos tipos de categorías de acuerdo con la medición que se puede realizar: (1) *los integradores en profundidad*, y (2) *los integradores puntuales*. Un muestreador integrador en profundidad se llena a medida que se baja y se sube a través de la columna de agua. Los muestreadores integradores en profundidad se dividen en dos categorías generales más, aquellos que usan una *botella rígida* para recoger la muestra y aquellos que usan una *bolsa plegable*.

Los muestreadores que usan un recipiente de *botella rígida* están limitados a profundidades de flujo de cinco metros o menos, mientras que los muestreadores de *bolsa plegable* están limitados en profundidad de acuerdo con el volumen de la bolsa y el tamaño de la boquilla, este muestreador especial fue desarrollado para la medición en ríos profundos por Nordin et al. (1983).

Un muestreador de sedimento en suspensión integrador puntual tiene una válvula de operación remota para comenzar y para detener la recolección de la muestra. El muestreador es bajado a la profundidad deseada en la columna de agua y la muestra es recogida mediante la apertura y cierre de la válvula de forma remota; luego, el muestreador es subido a la superficie para remover el recipiente de la muestra.

Los muestreadores de calidad del agua, son muestreadores de sedimento en suspensión que están especialmente recubiertos y utilizan materiales no contaminantes en las partes que entran en contacto con la muestra. Todos los muestreadores

de calidad del agua aprobados por el FISP pueden ser usados como muestreadores de sedimento en suspensión, pero no todos los muestreadores de sedimento en suspensión aprobados por el FISP pueden ser usados para muestreo de calidad de agua. Los muestreadores integradores en profundidad diseñados después de 1980 pueden servir para el doble propósito de muestrear sedimento en suspensión y calidad de agua.

A continuación, en la Tabla 8-13, se presentan los muestreadores que existen para la medición de cargas de sedimento en suspensión y sus respectivos rangos de aplicación.

Tabla 8-13. Características y parámetros de operación de muestreadores de sedimento suspendido.

Equipo	Boquilla [pulgada]	Volumen del contenedor	H máxima [pie]	Vel. Mínima [pie/s]	Vel. Máxima [pie/s]	Zona no -muestreada [pulgada]	Peso [lb]
US DH-48	1/4	pinta	9	1.5	8.9	3.5	4
US DH-59	3/16	pinta	15	1.5	5.0	4.5	22
US DH-59	1/4	pinta	9	1.5	5.0	4.5	22
US DH-76	3/16, 1/4	cuarto	15	1.5	6.6	3.2	25
US DH-81	3/16	litro	9	2.0	6.2	4.0	1
US DH-81	1/4	litro	9	1.5	7.6	4.0	1
US DH-81	5/16	litro	9	2.0	7.0	4.0	1
US DH-95	3/16	litro	15	2.1	6.2	4.8	29
US DH-95	1/4	litro	15	1.7	7.0	4.8	29
US DH-95	5/16	litro	15	2.1	7.4	4.8	29
US DH-2	3/16	litro	35	2.0	6.0	3.5	30
US DH-2	1/4	litro	20	2.0	6.0	3.5	30
US DH-2	5/16	litro	13	2.0	6.0	3.5	30
US D-74	3/16	pinta/cuarto	15	1.5	6.6	4.1	62

Equipo	Boquilla [pulgada]	Volumen del contenedor	H máxima [pie]	Vel. Mínima [pie/s]	Vel. Máxima [pie/s]	Zona no-muestreada [pulgada]	Peso [lb]
US D-74	1/4	pinta/cuarto	9(pt) 15(qt)	1.5	6.6	4.1	62
US D-74AL	3/16	pinta/cuarto	15	1.5	5.9	4.1	42
US D-74AL	1/4	pinta/cuarto	9(pt) 15(qt)	1.5	5.9	4.1	42
US D-95	3/16	litro	15	1.7	6.2	4.8	64
US D-95	1/4	litro	15	2.0	6.7	4.8	64
US D-95	5/16	litro	15	2.0	6.7	4.8	64
US D-96	3/16	3 litros	110	2.0	12.5	4.0	132
US D-96	1/4	3 litros	60	2.0	12.5	4.0	132
US D-96	5/16	3 litros	39	2.0	12.5	4.0	132
US D-96A1	3/16	3 litros	110	2.0	6.0	4.0	80
US D-96A1	1/4	3 litros	60	2.0	6.0	4.0	80
US D-96A1	5/16	3 litros	39	2.0	6.0	4.0	80
US D-99	3/16	6 litros	220	3.5	15.0	9.5	275
US D-99	1/4	6 litros	120	3.0	15.0	9.5	275
US D-99	5/16	6 litros	78	3.0	15.0	9.5	275
US P-61A1	3/16	pinta/cuarto	180(pt) 120(qt)	1.5	10.0	4.3	105
US P-63	3/16	pinta/cuarto	180(pt) 120(qt)	1.5	15.0	5.9	200
US P-72	3/16	pinta/cuarto	72(pt) 51(qt)	1.5	5.3	4.3	41

• Muestreadores integradores puntuales

Los muestreadores integradores puntuales consisten en un recipiente provisto de una válvula accionada desde la superficie, que permite abrir y cerrar el acceso del agua para tomar muestras en los puntos deseados. Junto con la válvula de acceso funciona un dispositivo de compensación de presiones que facilita la entrada del agua a la misma velocidad del flujo. Este

muestreador es utilizado cuando se quiere determinar la distribución de la concentración de sedimentos en la vertical.

Un modelo perfeccionado de este tipo de muestreadores es el USP-61, desarrollado por el *Inter-Agency Committee Water Resources* de los Estados Unidos. Este modelo fue construido con características hidrodinámicas y consta de un

cuerpo de bronce fundido provisto de aletas y cola direccional (Figura 8-70). La parte delantera del muestreador es rebatible para permitir el acceso a una cavidad donde se aloja una botella de 500 ml. Al cerrarla, se ajusta un empaque en forma de anillo a la boca de la botella dejándola comunicada con la válvula de acceso y el escape de aire. El muestreador pesa 46 kilogramos (100 libras aprox.).

Para el acceso del agua al frasco de la muestra se emplean tres tamaños de boquillas (1/4", 3/16" y 1/8") para utilizar de acuerdo con la velocidad de flujo del agua y tiempo de llenado de acuerdo con la Figura 8-69.

En la Tabla 8-14 se relacionan instrumentos para medición de concentración y transporte de sedimentos en suspensión.

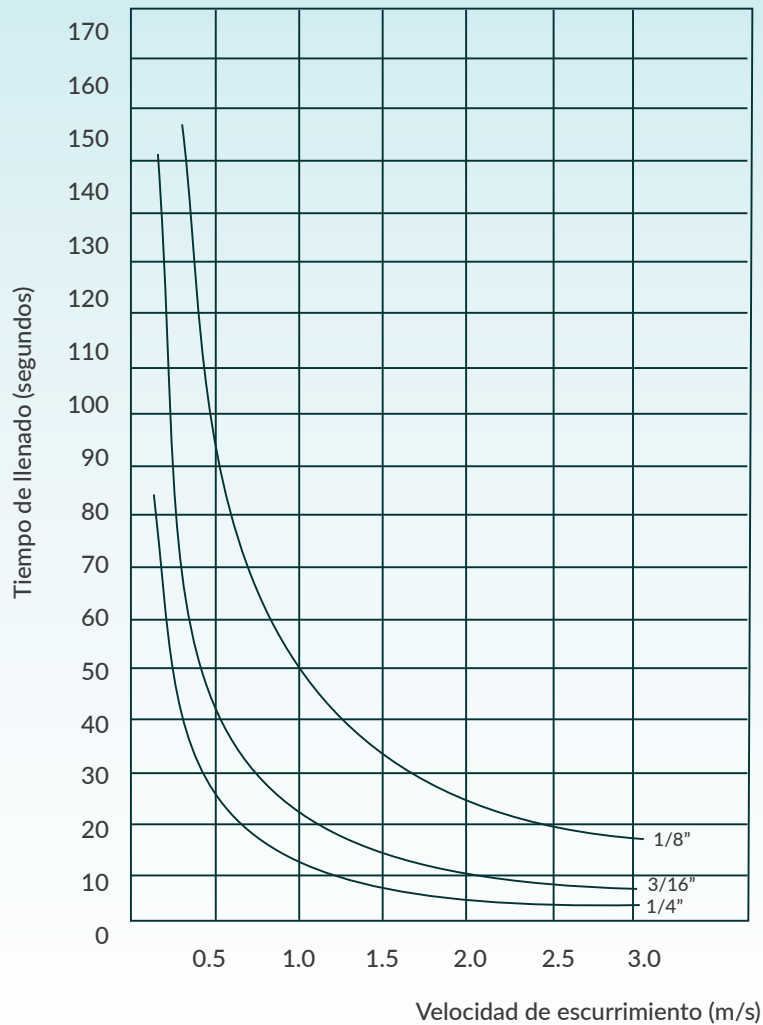


Figura 8-69. Relación entre tiempo de llenado y velocidad en la boquilla de toma muestras del tipo USP en función del tamaño de la boquilla.

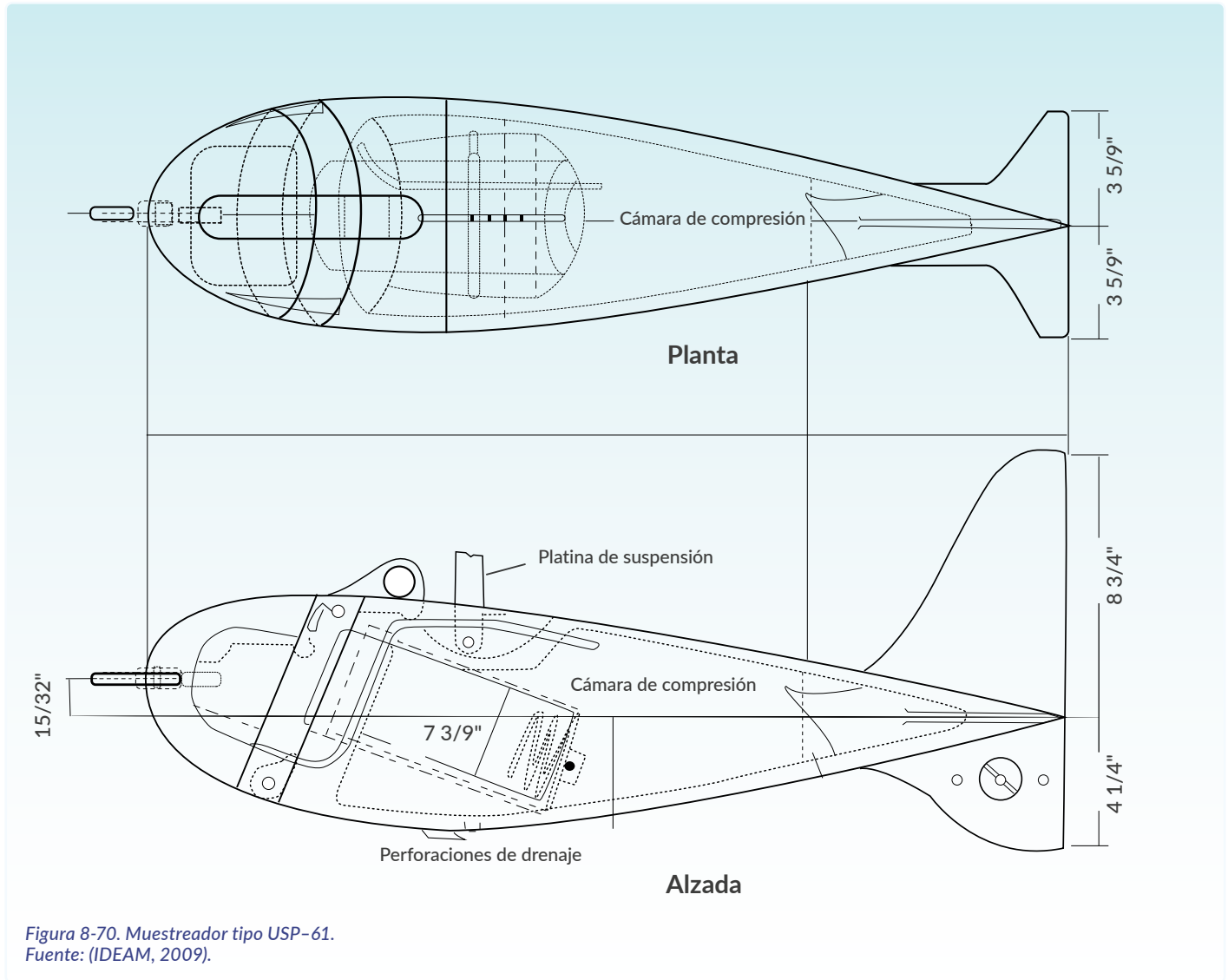


Figura 8-70. Muestreador tipo USP-61.
Fuente: (IDEAM, 2009).

La recolección del volumen óptimo en una muestra depende de la velocidad del flujo y del tamaño de la boquilla utilizada. Conocida la velocidad del flujo en m/s (escala horizontal) se asciende verticalmente hasta la curva correspondiente al diámetro de la boquilla usada y se cruza horizontal a la izquierda hasta cortar el eje (Y), encontrando el tiempo de llenado de la botella.

En Colombia, los instrumentos históricamente utilizados son:

- Muestreadores tipo USDH-48, USD-49, USDH-59 y USP-61.
- Muestreadores con bolsa plegable.
- Toma muestras superficiales con frascos de 470 ml. (500 cm³ en Colombia).
- Toma muestras de fondo, tipos, draga y US-BMH.

Tabla 8-14. Características de instrumentos para medición de concentración y transporte de sedimentos.

Muestreadores de sedimentos en suspensión	Sedimentos en suspensión		Parámetro medido	Rango de medición (mg/l)	Tiempo de respuesta (s)	Período de muestreo (min)	Período mínimo del ciclo (min)	Precisión global	
	Limo (<50 µm)	Arena (<50 µm)						Limo	Arena
Instrumentos mecánicos									
Botella	Si	Si	Concentración	>1	-	1	5	100%	100%
Trampa	Si	Si	Concentración	>1	Instantáneo	Instantáneo	5	100%	100%
USP-61	Si	Si	Concentración-transporte	>1	-	1	5	100%	100%
Botella Delft	No	Si	Transporte	>10	-	5-30	10	-	50%
Bomba de filtro	No	Si	Concentración	>10	-	5-15	10	-	20%
Bomba de sedimentación	No	Si	Concentración	>50	-	5-15	15	-	20%
Bomba de botella	Si	Si	Concentración	>1	-	1-5	5	20%	20%
Instrumentos electrónicos									
OBS - óptico	Si	No	Concentración	10-100.000	<1	Libre	5	50%	-
LISST - óptico	Si	Si	Concentración-tamaño de partículas	10-500	<1	Libre	5	30%	30%
OBS de bomba	Si		Concentración	10-100.000	-	Libre	5	50%	-
ASTM de punto acústico	No	Si	Concentración-transporte	10-10.000	<1	Libre	5	-	50%
ABS de perfil acústico	No	Si	Concentración	10-10.000	<1	Libre	5	-	50%

Fuente: (Van Rijn, 2006).

• Muestreadores integradores en profundidad

Los muestreadores integradores de profundidad no poseen una válvula que controle el acceso del agua. Se utilizan para obtener muestras representativas de toda una vertical de medición, haciendo descender el

instrumento hasta el fondo y de vuelta a la superficie en una vertical de medición, de tal manera que recorra dicho vertical a una velocidad de tránsito constante que está en función de la velocidad de la corriente, de la profundidad y diámetro de la boquilla del muestrea-

dor. Durante este proceso de doble desplazamiento en la vertical se toma una muestra que representa la concentración media en la vertical.

Los muestreadores integradores en profundidad más utilizados son los tipos *USDH-48*, *USD-49* y *USDH-59*. Tienen forma hidrodinámica y su peso varía entre 2.28 y 11 kilogramos. Poseen una válvula reguladora de presión que permite la entrada del agua a la boquilla a la misma velocidad del flujo. Se utilizan boquillas de

diámetros de 1/4", 3/16" y 1/8", y botellas plásticas de 500 cm³ de capacidad.

Muestreador USDH-48: Es el más pequeño de todos y está construido para operarlo de forma manual por medio de una varilla en secciones en donde se afore caudal por el sistema de vadeo. En la parte inferior tiene una cavidad donde se aloja la botella, la cual se ajusta mediante un dispositivo que aprisiona la botella por medio de un resorte (Figura 8-71).

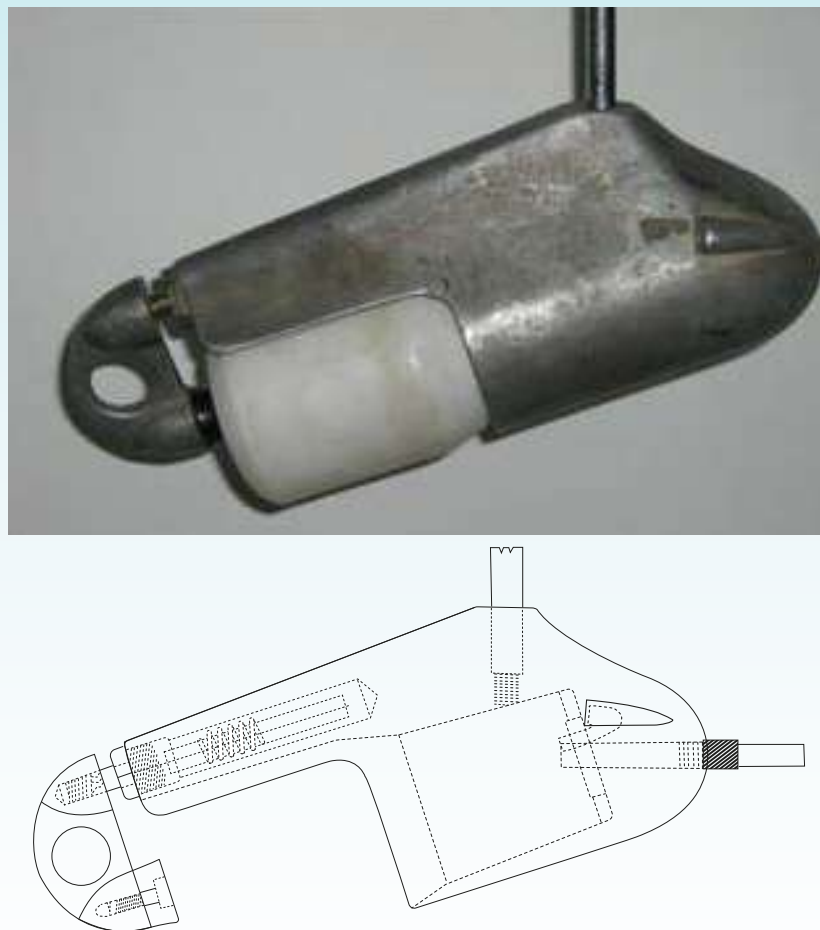
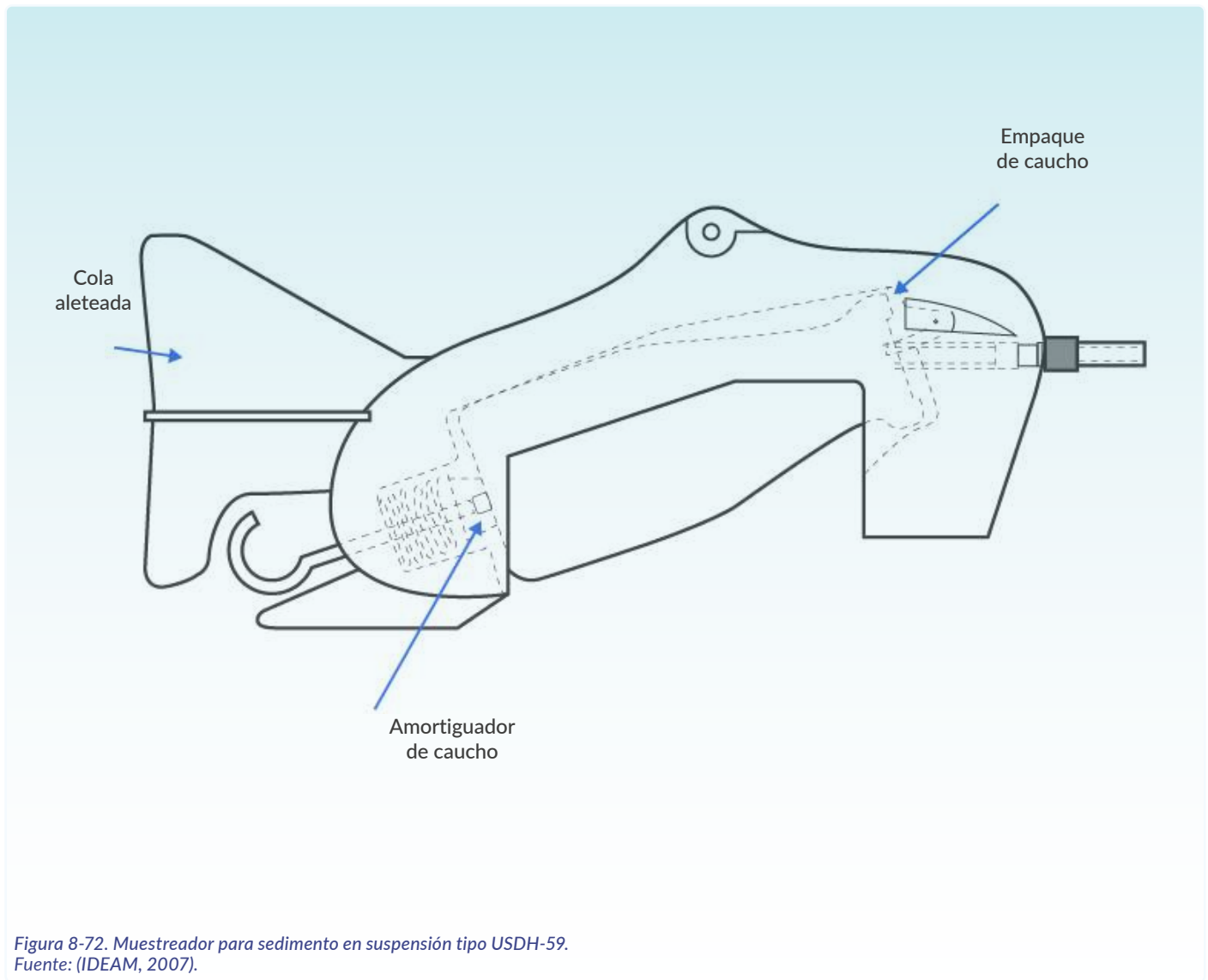


Figura 8-71. Muestreador para sedimentos en suspensión tipo USDH-48.
Fuente: (IDEAM, 2009).

Muestreador tipo USD-49: Se emplea para mediciones en profundidad hasta de 5 m y velocidades máximas de 2.0 y 1.5 m/s (Figura 8-73). El muestreador

USDH-59 (Figura 8-72), por su menor peso, debe utilizarse solamente cuando la velocidad de la corriente sea menor a 1 m/s.



Debido a la limitada capacidad de los recipientes de los muestreadores, hace que cuando la muestra presenta baja concentración y las partículas son de variado tamaño, puede resultar en un peso relativa-

mente mayor al real y distorsiona la distribución de los tamaños de diámetros a la carga medida, por lo cual puede ser necesario tomar varias muestras del mismo punto.

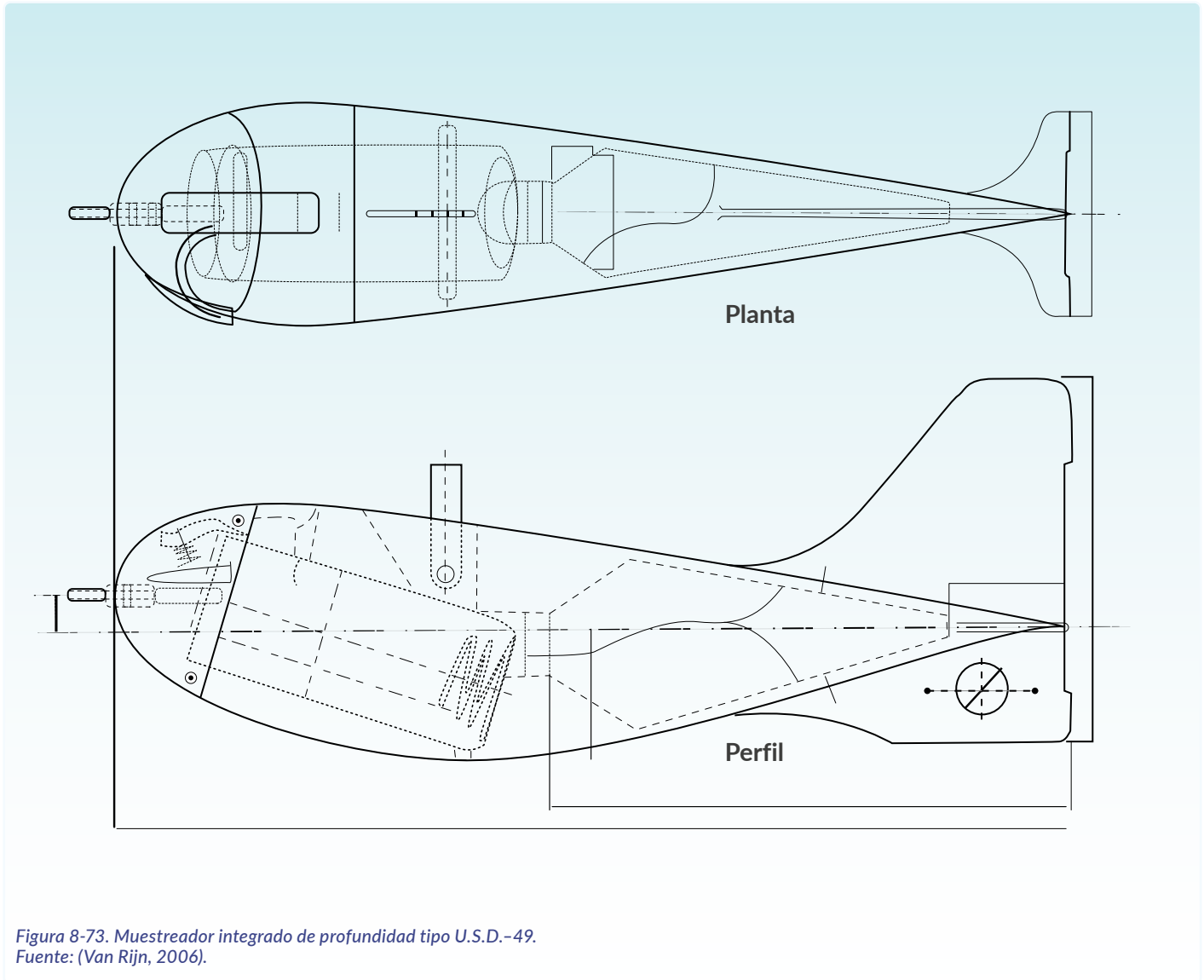


Figura 8-73. Muestreador integrado de profundidad tipo U.S.D.-49.
Fuente: (Van Rijn, 2006).

Para el uso de este tipo de muestreadores integrados es necesario calcular la velocidad con que se debe desplazar el instrumento en su recorrido de la superficie al fondo y regreso a la superficie, tal como se indica más adelante en la sección de procedimientos.

Muestreador para aforo con bolsa plegable:
Diseñado por el *Geological Survey* de los Estados

Unidos, se utiliza para recoger muestras integradas de sedimentos en suspensión en corrientes con profundidades mayores a 5 m, debido a su capacidad de volumen (2 a 4 l). Según experiencias, alcanza profundidades del orden de 75 m. También se utiliza en forma horizontal, para recoger muestras integradas de una sección, a una misma profundidad (Figura 8-74).



Figura 8-74. Uso del muestreador en aforo de bolsa plegable.
Fuente: (IDEAM, 2009).

La bolsa plegable consta de los siguientes elementos⁷:

- Canastilla: fundamentalmente se emplean dos tipos de canastillas, una para contener una botella de 3 o 4 litros (un galón), y otra para contener una botella de 7 u 8 litros (dos galones).
- Botellas o garrafas plásticas perforadas: se consiguen botellas plásticas de uno o dos galones con el cuello y la boca posicionados lateralmente. Los huecos liberan la presión a la que están sometidas cuando están sumergidas.
- Tapa plástica hidrodinámica: es una tapa adaptada a la botella plástica, diseñada para soportar la boquilla. La tapa original se utiliza mientras no se use la tapa con la boquilla, para evitar que se dañe la rosca de la botella.

⁷ Según IDEAM, Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá. 2007.

- **Boquillas:** se usan las mismas boquillas que suelen emplearse en los muestreadores del tipo USP o USDH y su material puede ser de aleación de bronce o teflón. Las boquillas de teflón se utilizan cuando se requieren muestras no contaminadas por un metal.

Los diámetros utilizados son:

- Boquilla No. 1: 1/8" o 3.18 mm
- Boquilla No. 2: 3/16" o 4.76 mm
- Boquilla No. 3: 1/4" o 6.35 mm
- Boquilla No. 4: 5/16" o 7.94 mm
- **Bolsas:** las bolsas de plástico o polietileno utilizadas tienen un calibre de 45 milésimas de milímetro. Para botellas de un galón se utilizan bolsas de 25 cm x 40 cm y para botellas de dos galones se utilizan bolsas de 35 cm x 50 cm.
- **Escandallo:** dependiendo de la profundidad y la velocidad de la corriente se usan las pesas hidrodinámicas o escandallos convencionales de 50, 75 o 100 Kg, con sus respectivas platinas para sujetarlos a la canastilla y al molinete.
- **Lastre:** se usa un lastre de 30 a 50 gramos que debe ser colocado dentro de la bolsa plástica con el objeto de mantenerla en el fondo de la botella; también puede emplearse una esfera de vidrio o bola de cristal de 2 cm de diámetro.
- **Correntómetro:** se utiliza cuando se va a medir la velocidad de la corriente paralelamente con la toma de la muestra.

Algunas ventajas de los muestreadores de este tipo son:

- Económicos.
- Sencillos en su construcción.
- Más livianos.
- Sus partes y elementos se consiguen fácilmente en el mercado nacional o se pueden fabricar, dada su sencillez.

- Recogen muestras integradas en un mismo vertical.
- Recogen muestras integradas de una sección a una misma profundidad.
- Recogen muestras de gran volumen.

Algunas desventajas son:

- Las muestras recogidas en la bolsa plegable siempre deben ser depositadas en otro recipiente para enviarlas al laboratorio.
- Como los muestreadores van acoplados al escandallo, existe una zona que queda sin muestrear debido a la distancia H entre el escandallo y la botella.
- Se deben usar tantos tamices como verticales tenga el aforo, para evitar que se retengan partículas de menor tamaño por la acumulación del sedimento una vez se ha pasado por el mismo tamiz varias muestras.
- **Toma de muestras diarias de sedimentos en suspensión**

Se realiza al utilizar una canastilla metálica manipulada con una cuerda desde la tarabita o puente (Figura 8-75). El método está basado en la correlación directa entre la concentración media del material sólido de las muestras superficiales y la concentración media de la sección transversal de la estación de cada aforo sólido realizado.



Río Cara Parana
 ■ Jorge Mario García



Figura 8-75. Canastilla de hierro soldado para botellas ½ l.
Fuente: (IDEAM, 2009).

En la actualidad se cuenta con *métodos no tradicionales utilizados para la medición de la carga de sedimentos en suspensión* que utilizan métodos en donde interviene la difracción de la luz, ondas de sonido, y tecnología nuclear (Wren & Kuhnle, 2003). En ellas se encuentran:

Retrodispersión óptica (OBS): Dispositivo que, por medio de luz infrarroja o visible, apunta hacia el volumen de muestra donde una porción de luz es retrodispersada por las partículas que se encuentran en suspensión, en el cual una serie de fotodiodos situados alrededor del emisor detectan la luz dispersada. Por medio de una calibración empírica se convierte la medida de retrodispersión en concentración. El volumen de medición varía dependiendo de la turbidez, este varía en orden

de cm^3 , los dispositivos OBS cuentan con un rango de funcionamiento de partículas entre 200-400 μm , y su rango de concentraciones se encuentra por encima de los 100 g/l (Black & Rosenberg, 1994).

Transmisión óptica: La luz es directamente introducida dentro del volumen de la muestra, donde una porción de esta es absorbida y/o reflejada. Un sensor localizado en el lado opuesto del lugar donde es emitida la luz mira la atenuación del haz de luz. La concentración de sedimentos es determinada utilizando la información de calibración obtenida de manera empírica. El tamaño de la muestra puede variar dependiendo de la geometría del dispositivo. Los dispositivos de transmisión óptica son relativamente baratos (Clifford et al., 1995).

Enfoque del haz de reflectancia: Un rayo láser enfocado a un punto muy pequeño ($<2\ \mu\text{m}$) en el volumen de la muestra es rotado rápidamente (muchas veces por segundo). Cuando esta se gira, el haz de luz encuentra partículas que son reflejadas en una porción. El tiempo de este evento de reflexión se utiliza para determinar el tamaño de las partículas en la trayectoria del láser. El rango de los tamaños de partículas que puede medir es $1\text{-}1000\ \mu\text{m}$ y de concentración va de $0.010\text{-}50\ \text{g/l}$. Muchas referencias de este tipo de dispositivo son encontradas en la literatura (Phillips & Walling, 1995).

Difracción láser: Un haz de luz es directamente apuntado en el volumen de la muestra donde una parte de esta es absorbida por las partículas en suspensión y otra es reflejada. La luz dispersada es recibida por un detector o por detectores dispuestos únicamente para medir el ángulo de dispersión del haz. El tamaño de la partícula es calculado a partir del ángulo de difracción de la luz. Entonces al basar las mediciones de concentración de tamaños de partículas medios, la dependencia del tamaño de partícula se elimina.

La longitud de trayectoria óptica es alrededor de $2.5\ \text{o}\ 5\ \text{cm}$, el rango de partículas medidas tiene un rango de $1.25\text{-}250\ \mu\text{m}$, $9\ \text{o}\ 2.5\text{-}500\ \mu\text{m}$, y la concentración puede tener un rango de $5\ \text{g/l}$. Estos dispositivos son relativamente costosos y se encuentran disponibles (Agrawal & Pottsmith, 1994).

Nuclear: Esta técnica está basada en la atenuación o retrodispersión de la radiación utilizando usualmente rayos X o gamma para partículas de sedimentos. Una calibración empírica es usada para convertir la retrodispersión. Los rangos de concentración son de aproximadamente $0.5\text{-}12\ \text{g/l}$,

el volumen de medición dependerá de la geometría del instrumento. Los dispositivos nucleares no se encuentran disponibles fácilmente (McHenry et al., 1967).

Reflectancia espectral: Esta técnica está basada en la relación entre la cantidad de radiación generalmente en los rangos en que la luz es visible, reflejada desde el cuerpo de agua y las propiedades del agua. La radiación generalmente es medida de antemano por un espectrómetro a satélite que funciona en aire libre. El tamaño del área medida es mayor que utilizando otros dispositivos, pues puede variar desde m^2 hasta km^2 de la superficie del cuerpo de agua. Esta técnica se adapta mejor a los ambientes marinos, donde existen grandes áreas bajo observación o en áreas de interés donde hallan variaciones de concentración (Novo et al., 1989).

Óptica digital: Un dispositivo de carga acoplada (CCD) graba la mezcla de agua-sedimento in situ. Estas grabaciones pueden ser analizadas por lo que el tamaño y la concentración de sedimentos en suspensión pueden ser determinados, así como también de la naturaleza del sedimento por medio visual. El tamaño del volumen de medición en este caso será dependiente de la penetración de la luz en el agua (Gooding, 2001).

Presión diferencial: Un transductor de presión diferencial puede usarse para determinar las diferencias en el peso específico del agua-sedimento frente a agua cerca de la superficie con concentraciones más bajas.

Esta diferencia de presión se puede utilizar para determinar la concentración media de sedimento suspendido entre las dos entradas del transductor de presión diferencial. El tamaño del volumen de

medición dependerá de la separación de las entradas de presión del transductor diferencial. El intervalo de concentración depende de la sensibilidad del transductor. El hardware para este dispositivo está fácilmente disponible y relativamente barato. Los cambios en el gradiente de temperatura, turbulencia, y la concentración de sólidos disueltos pueden afectar las mediciones (Lewis & Rasmussen, 1996).

Utilización de técnicas de teledetección: La determinación de la cantidad de sedimentos presente en el agua está basada en la reflectancia de la radiación en las regiones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Por lo general, la reflexión es una función no lineal de la concentración de sedimentos en suspensión, y la reflectancia máxima depende de la longitud de onda y de la concentración de sedimentos en suspensión. Dado que la turbidez y los sedimentos en suspensión están estrechamente vinculados en la mayoría de las masas de agua, es posible efectuar también estimaciones de la turbidez. Esta técnica presenta una limitación: la necesidad de obtener datos sobre el terreno para calibrar la relación entre los sedimentos en suspensión y la reflectancia. Además, pueden utilizarse datos del escáner sin datos de calibración para cartografiar las concentraciones de sedimentos en suspensión relativas en penachos fluviales y, seguidamente, extraer conclusiones sobre las pautas de deposición de sedimentos en lagos y estuarios. En el artículo de Dekker et al. (1995) se ofrece una recensión bastante completa de las aplicaciones de la teledetección

para la estimación de sedimentos en suspensión (OMM, 2011).

Adicionalmente, el maxímetro es un instrumento para la toma de muestras de sedimentos durante la ocurrencia de eventos extremos o máximos. Está compuesto por varios muestreadores de punto, ubicados en forma lineal, uno sobre otro, sobre un vástago o soporte vertical. A medida que va subiendo el nivel del río se van llenando las botellas superiores y de esta forma queda registrado el evento máximo, por lo que se analiza el sedimento de la botella superior.

Para cada muestreador puntual se utiliza una botella y dos tubos doblados. Los modelos comerciales utilizan tubos de cobre doblados, pero se puede utilizar un modelo más sencillo constituido por un tubo de plástico fijado a un marco rígido para que se mantenga en su sitio. La botella empieza a llenarse cuando la profundidad de la corriente alcanza el punto A y comienza el flujo de sifón a la botella; se para cuando la profundidad de la corriente se eleva al punto B que es la salida de la tubería que expulsa el aire. La amplitud de la toma de muestras se controla ajustando la distancia entre los puntos A y B. En su variante más sencilla los tubos de entrada y expulsión están curvados en forma de U; esto significa que la corriente en el muestreador está en ángulo recto con el curso de agua, lo cual puede obstaculizar la concentración de sedimentos; un modelo más perfeccionado tiene dos tubos con una segunda curva para dirigir las aguas arriba hacia la corriente, como en la Figura 8-76.



Caño Platanal, Cesar-ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM

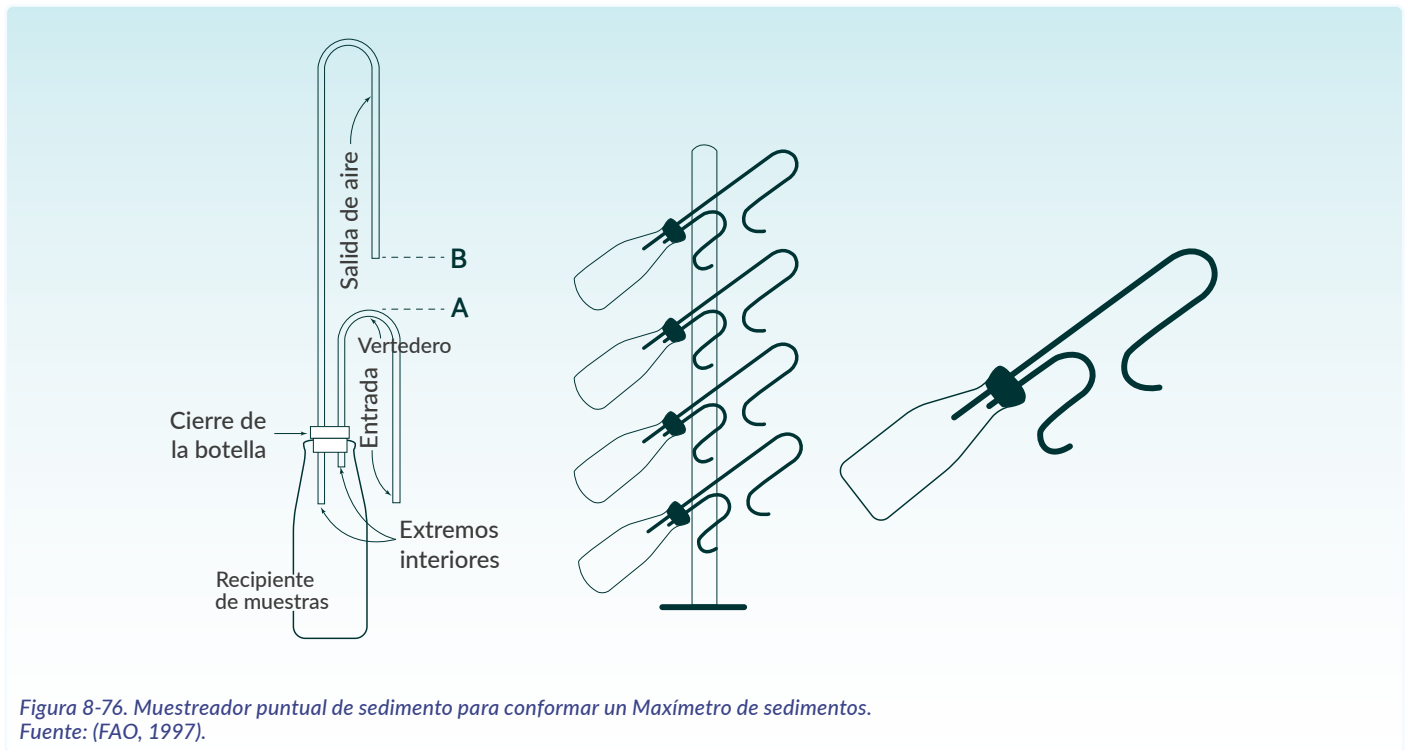


Figura 8-76. Muestreador puntual de sedimento para conformar un Máxímetro de sedimentos. Fuente: (FAO, 1997).

Se visita la estación provista de máxímetro, una vez ocurrido un evento máximo es posible estimar la concentración según las metodologías descritas para el sedimento suspendido, se retiran las botellas del máxímetro, se pone una doble tapa a la botella, se envían al laboratorio para que estimen su concentración y curva granulométrica y reemplazan las botellas por botellas vacías. En caso que la visita a la estación no coincida con un evento máximo reciente, las botellas se encontrarán secas, por efecto de la evaporación; se recomienda retirarlas, enviarlas al laboratorio con agua hasta el volumen correspondiente a las distancias A y B, que dependerá de cada estación. En todos los casos las botellas retiradas son reemplazadas por botellas limpias para dejar en funcionamiento el máxímetro.

Es importante destacar que el nivel del río es medido de forma conjunta y debe quedar etiquetado en las botellas del máxímetro con la elevación o nivel

de agua de la botella más alta con sedimento, de tal forma que sea posible correlacionar el nivel con el caudal sólido suspendido estimado con los máxímetros.

Instrumentos para medición del caudal de arrastre de fondo

La naturaleza estocástica del movimiento del sedimento de fondo y su producción en forma de ondas de fondo, dunas y barras, hacen muy difícil la medición sobre el terreno del caudal de arrastre de fondo. No hay un equipo completamente adecuado para retener las partículas de diferente tamaño con la misma eficiencia, que pueda permanecer en una posición estable y orientado hacia la corriente sobre el fondo del río, sin perturbar el flujo natural y el movimiento del sedimento.

Los muestreadores disponibles pueden ser clasificados en tres tipos: de cesta, de cazoleta y de diferencia de presión.

- **Muestreadores de cesta**

Están hechos, por lo general, de mallas y tienen una abertura en la parte orientada contra la corriente por la que se desliza la mezcla de agua y sedimento. La malla deja pasar el sedimento en suspensión, pero retiene el sedimento que se desliza a lo largo del lecho.

- **Muestreadores de tipo cazoleta**

Suelen ser de sección longitudinal en forma de cuña y se instalan de modo que la arista de la cuña corte la corriente; la cazoleta contiene deflectores o ranuras para retener los materiales en movimiento (Figura 8-77).

- **Muestreadores basados en el principio de la diferencia de presión**

Están diseñados para producir en la salida del instrumento un descenso de presión importante para contrarrestar las pérdidas de energía y asegurar así una velocidad de entrada igual a la de la corriente en condiciones normales. Un diafragma perforado dentro del instrumento obliga a la corriente a hacer

caer su sedimento en una cámara de retención y luego salir a través de una salida superior.

- **Muestreador del Instituto Delft**

Usado en el Nilo NDS (Figura 8-77) consiste de un muestreador de arrastre de fondo y de uno de sedimentos en suspensión, así como también de una cámara de video subacuática. Este muestreador de carga de fondo y de suspensión está unido a un bastidor de soporte, su peso es de 60 kg, el muestreador de carga en suspensión consta de siete boquillas de admisión con un diámetro interno de 0.003 m que están conectados a mangueras de plástico y son operados por bombas. El muestreador de carga de fondo cuenta con una boquilla, en la entrada tiene 0.096 m de ancho y 0.055 m de alto con una longitud de 0.085 m; en su parte trasera 0.105 m de ancho y 0.06 m de alto. Se encuentra conectado a una bolsa hecha de nylon cuyo tamaño de malla es de 150 o 250 μm que depende del tamaño del material.



Figura 8-77. Muestreador del Delta del Nilo para material de fondo.
Fuente: (Van Rijn, 2006).



Figura 8-78. Muestreador de material de fondo usado en IDEAM.
Fuente: (IDEAM, 2009).

Las incertidumbres en la realización del muestreo requieren determinar un coeficiente de eficiencia para cada tipo de muestreador. La calibración se realiza generalmente en un canal de laboratorio, donde el caudal de material de fondo puede ser medido de manera directa en un pozo en el extremo del canal, aunque las condiciones de transporte uniforme en la anchura y a lo largo del canal son difíciles de mantener. Incluso en condiciones favorables, los factores de eficiencia son difíciles de determinar porque varían según el tamaño de los

granos, el grado de llenado del muestreador, etc. En todo caso, una eficiencia del 60 al 70 % puede ser considerada como satisfactoria.

Para la medición de la carga de fondo se ha utilizado tradicionalmente el muestreador Helley Smith (Figura 8-79), el cual es un dispositivo de toma de muestras de diferencia de presión (Helley & Smith, 1971), que puede ser usado en corrientes naturales que transportan sedimentos gruesos y permite obtener datos comparables a las estimaciones hechas por el modelo de Meyer-Peter y Müller.

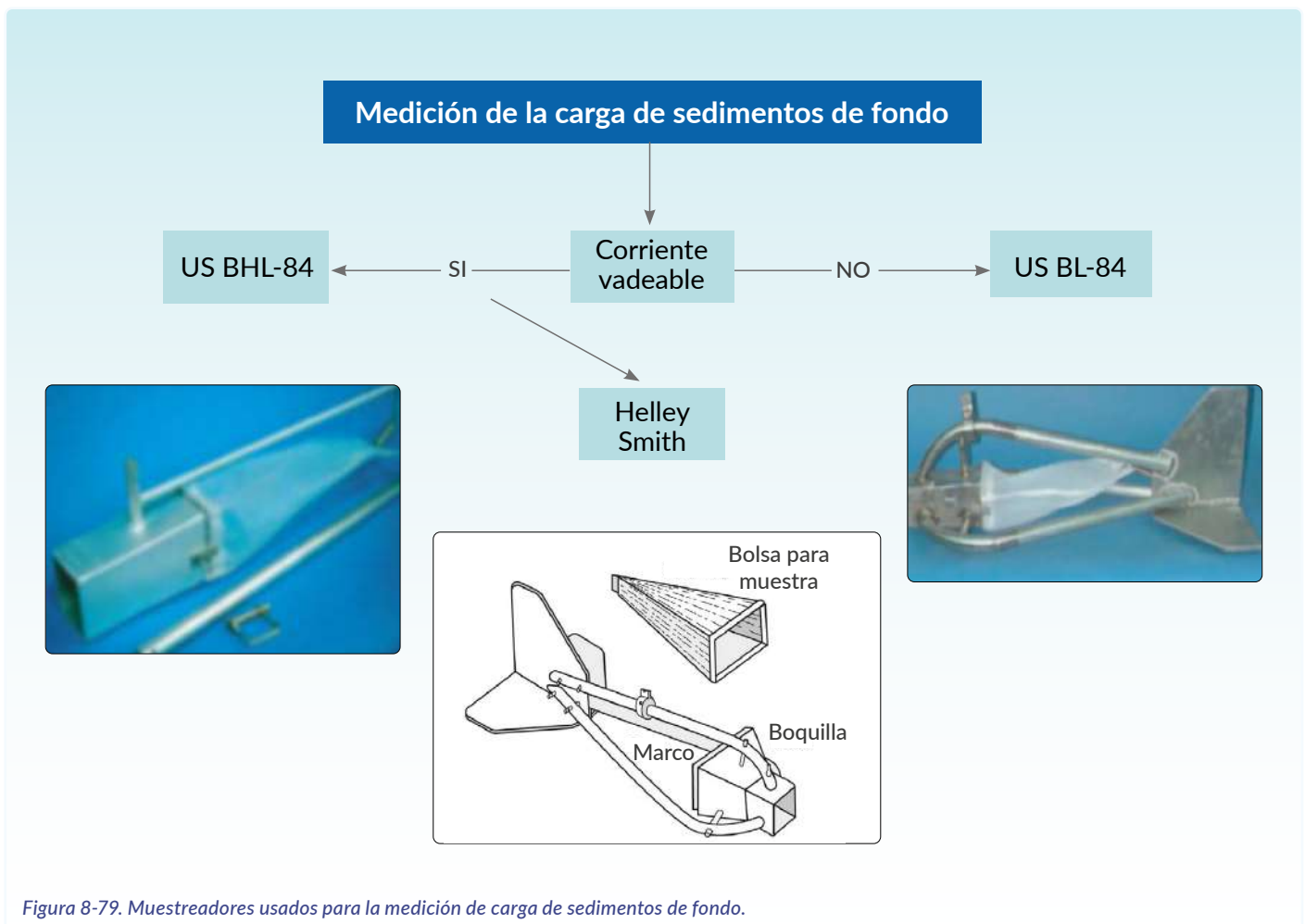


Figura 8-79. Muestreadores usados para la medición de carga de sedimentos de fondo.

Es importante resaltar que este muestreador tiene la habilidad de recopilar datos en la zona no medida por los muestreadores de sedimento en suspensión. El área expandida en la parte trasera de la boquilla de entrada, genera la diferencia de presión o la caída de velocidad necesaria para atrapar el sedimento en movimiento, la relación de áreas entre la entrada y la salida es de 3.22 (Edwards & Glysson, 1999). La bolsa para la muestra debe tener una longitud de 46 cm y ser constituida por una malla de poliéster monofilamento (ASTM) con una abertura de 0.20 mm.

Posteriormente, Emmett (1980) realizó una calibración de campo para las características de retención de sedimento del Helley Smith, concluye que para partículas de 0.5 a 16 mm, este muestreador tiene una eficiencia casi perfecta, invariante a cambios en la tasa de transporte. Para partículas de tamaños más grandes a 16 mm, el equipo tiene una eficiencia baja y se reduce a cero cuando las partículas exceden la abertura de la boquilla.

Más reciente, se desarrolló un muestreador con una boquilla similar a la del Helley Smith, pero con una relación de áreas de 1.4 que resulta en eficiencias bastante cercanas a 100 % para todas las tasas de transporte de sedimento y tamaños de partícula; este equipo fue aprobado en mayo de 1995 por el comité técnico sobre sedimentación como un muestreador estándar provisional para uso de las agencias federales de los Estados Unidos, que luego de unas modificaciones en el marco se designó como el muestreador US BL-84. La División de Recursos Hidráulicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos aprueba el uso de este muestreador, pero hasta cuando más investigaciones sean realizadas, se continúan aceptando los datos registrados con el Helley Smith (Edwards & Glysson, 1999).

- **EI US BL-84**

Se usa para corrientes no vadeables, al ser suspendido desde un puente o tarabita por un sistema de cable de acero y malacate. Las muestras que son retenidas varían entre 0.25 y 38 mm, en corrientes con velocidades de hasta 9 pies/s (2.7 m/s). La entrada es rectangular de 3"x3", es construido en aluminio, con un peso de 32 lb y mide 36". Además, está provisto de aletas para orientar el equipo en la dirección del flujo.

- **EI US BHL-84**

Es idéntico al US BL-84, pero para uso manual en corrientes vadeables y consiste de una bolsa para muestra y conjunto de varilla de vadeo, pesa 10 lb y mide 28"; el sedimento llega a una malla de polyester con una abertura de 0.25 mm, donde es recogido para su posterior análisis en el laboratorio. Al igual que en el Helley Smith, el tiempo de muestreo es de un minuto.

- **Sedimentos de fondo**

Para la medición de los sedimentos de fondo Van Rijn (2006) sugiere metodologías directas en las cuales se utilizan muestreadores mecánicos tipo trampa, muchas versiones de los muestreadores tipo trampa son usados y se obtienen resultados convincentes; las dificultades que presenta la medición con este tipo de muestreador en alguno de los casos son la precisión en los tiempos de inmersión para la toma de muestras. El principio básico de este método de muestreo es la interceptación de las partículas de sedimentos que están siendo transportadas cerca del lecho, sobre un incremento de longitud en lecho del canal; muchas de las partículas que se encuentran en el lecho del cauce son transportadas, pero el muestreador solo recoge una pequeña parte de la carga de mayor tamaño que se encuentra en el lecho. Los métodos de muestreo directos para carga de fondo son:

Transportímetro de carga de fondo Arnhem (BTMA): Este instrumento está basado en la recolección de partículas de sedimentos por medio de un muestreador tipo cesta, la cesta que consta de un alambre fino y montado en un marco, se baja e introduce en el lecho del cauce, y donde se presiona por medio de un resorte. La forma de la cesta provoca una reducción en la presión detrás del instrumento de tal manera que las partículas de agua y sedimentos entran en la cesta con la misma velocidad del flujo natural del río, cuando se cuente con el contenido necesario que es relativamente pequeño se retira. El tamaño de las partículas de la muestra tiene un rango de 0.3 mm (tamaño malla de la cesta) y 50 mm.

Las mediciones de transporte de fondo son muy difíciles y por tanto no existe un método estándar para su determinación. La medición precisa no es posible debido al movimiento de los materiales en el fondo, la naturaleza turbulenta del movimiento de las partículas individuales y a la dificultad de captar todas las fracciones de tamaño presentes (Montagnini & Amsler, 2007).

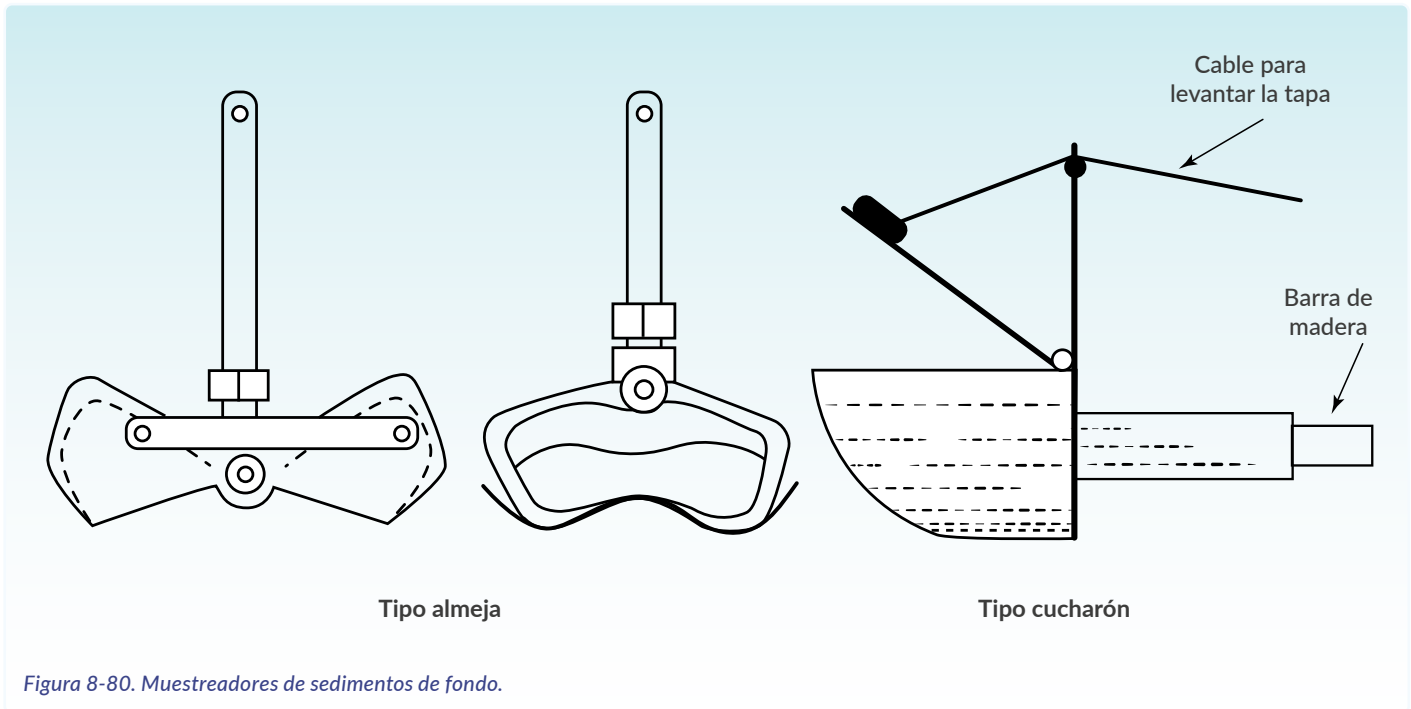
Las técnicas disponibles en general han sido diseñadas para los extremos (gruesos y finos), pero no para mezclas.

Los sitios de medición deben elegirse de tal manera que el sedimento obtenido sea representativo tanto de la cantidad como del tamaño de las partí-

culas. El mayor transporte de carga de fondo sucede durante la ocurrencia de las avenidas, por ello es importante realizar mediciones en dichos episodios. Sin embargo, realizar mediciones de carga de fondo de manera periódica es costoso y consume gran cantidad de recurso humano, por tal razón no se realizan con frecuencia. Para suplir esto, se suelen efectuar estimaciones, por ejemplo, tomar la carga de fondo como un porcentaje de la carga total. Este porcentaje puede variar de casi el 0 % en ríos de planicie hasta el 50 % en ríos de montaña.

Para estimar la capacidad de transporte de sedimento de una corriente aluvial, es posible emplear el muestreador Helley-Smith o el Arnhem, los cuales se colocan en el fondo del cauce, en los mismos verticales donde se introdujo el correntómetro, o donde se haya medido la velocidad para hacer el aforo líquido. Las muestras de sedimentos captadas se llevan al laboratorio y se prepara la curva granulométrica para cada vertical. Finalmente, las curvas se integran para obtener una muestra representativa de todo el lecho.

Existen muestreadores de fondo que funcionan como una draga, los hay tipo almeja o cucharón (Figura 8-80), que sirven para recoger material de fondo entre arenas gruesas y gravas, no siendo adecuado para arenas finas ni bolas de roca. Con estos equipos se pretende caracterizar el material del lecho mediante la obtención de su curva granulométrica en lechos aluviales.



También se utilizan métodos no tradicionales, para la medición de la carga de sedimentos de fondo se pueden categorizar según el tipo de sensor. Y los sensores a su vez pueden ser categorizados según su modo de operación en sensores activos o pasivos. Los sensores activos funcionan emitiendo señales y registrando las propiedades seleccionadas de la señal reflejada; los sonares ping-pong o los dispositivos láser son ejemplos de sensores activos. Las tecnologías que operan con sensores pasivos funcionan con un registro natural que genera seña-

les, por ejemplo, los hidrófonos, que se despliegan en el agua, o geófonos, que se montan en o cerca de un arroyo.

En la Tabla 8-15 se resumen las diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas para la medición de sedimentos según el tipo de sensor con el que operan:

- Facilidad de uso: 1 fácil; 5 difícil.
- Durabilidad: 1 durable; 5 frágil.
- Portabilidad: 1 portable; 5 no portable.
- Confiabilidad: 1 necesita poco mantenimiento; 5 necesita mantenimiento elevado.

Tabla 8-15. Características tecnológicas seleccionadas para el monitoreo de la carga de fondo.

Sensores activos (todos requieren calibración en campo)											
Tecnología	Descripción	Operación continua	Modo de operación	Tipo de sedimentos	Etapas de desarrollo	Facilidad de uso	Durabilidad	Portabilidad	Confiablez	Cobertura espacial	Costo
(ADCP) <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>	Principio del formulario. Dispositivo comercial disponible, utiliza sonar y los principios del efecto Doppler para determinar el perfil vertical de la velocidad. Además, este dispositivo también proporciona información sobre el movimiento de carga de fondo (velocidad).	Sí	Dispositivo estacionario ADCP - Sonar	Arena y grava	Moderadamente bien desarrollado. En uso preliminar.	2	4	2	1	Punto -Sección transversal	Elevado
Sonar: retro dispersión	Sonar tranceptor de alta frecuencia para medir las fluctuaciones espaciales y temporales en las concentraciones de sedimentos de arena en la forma del lecho.	Sí	Sonar estacionario	Arena	Principio del formulario. Necesita seguir trabajando para cuantificar las características espaciales y temporales de transporte de sedimentos en suspensión. Aplicaciones a pequeña escala. Etapa temprana de desarrollo.	4	4	2	3	Punto -Sección transversal	Bajo
Sonar: diferenciación del lecho	Principio del formulario. Las técnicas de diferenciación computacional a partir de levantamientos batimétricos temporalmente distintos de un arroyo-río alcanzan para determinar el flujo total de carga de fondo.	No	Sonar multifrecuencia montando en barco y su procesamiento posterior.	Arena	Principio del formulario. Moderadamente bien desarrollado. Se utiliza en los grandes ríos.	4	5	5	1	Extensión	Elevado
Radar	Principio del formulario. Las ondas electromagnéticas de pulsos cortos se transmiten en el flujo en canales abiertos. Las partículas se encuentran dispersas por las ondas en el transporte y se registran mediante la recepción de antenas.	No	Retorno de la onda electromagnética producida por la presencia de granos.	Gravas	Probado en el laboratorio, pero no en el campo. Etapa temprana de desarrollo.	4	4	3	4	Extensión	Moderado

Sensores activos (todos requieren calibración en campo)											
Tecnología	Descripción	Operación continua	Modo de operación	Tipo de sedimentos	Etapas de desarrollo	Facilidad de uso	Durabilidad	Portabilidad	Confiabilidad	Cobertura espacial	Costo
Trazadores inteligentes	Transmisores micro-radio, la identificación por radiofrecuencia y otros trazadores avanzados que se utilizan para realizar un seguimiento de las partículas a través del canal o de las cuencas hidrográficas.	Sí	Coloque el trazador en el sistema y se debe monitorear la ubicación a través de diversas técnicas.	Gravas	Pruebas de laboratorio y de campo completas. Útil para aplicaciones específicas. Los sistemas son asequibles, pero puede ser delicado para operar.	4	3	2	3	Extensión	Moderado
Sensores pasivos (todos requieren calibración en campo)											
Tubos de impacto	Tubería instalada dentro de cauce con sensor pasivo (geófonos o hidrófonos) grabación de impactos de granos en el tubo lleno de aire.	Sí	Señal producida por impacto de grano en la tubería.	Gravas > 4mm	Moderadamente bien desarrollado. Pruebas en laboratorio y campo. Requiere calibración local.	2	2	4	2	Sección transversal	Bajo
Placas de impacto	Principio del formulario. Placa de acero instalado en cauce del río con sensor pasivo (geófonos o hidrófonos) grabación de impactos de granos en las placas.	Sí	Principio del formulario. Señal producida por el contacto del grano en la placa.	Gravas >10 mm	Moderadamente bien desarrollado. Pruebas en laboratorio y campo. Requiere calibración local.	2	2	4	2	Sección transversal	Bajo
Columnas de impacto	Principio del formulario. Sensor de transporte de grava (GTS)-sensor de vibración piezoeléctrico o un sensor de movimiento.	Sí	Principio del formulario. Señal producida por el contacto del grano en la columna.	10 a 128 mm	Principio del formulario. Desarrollo temprano solo con las pruebas de laboratorio hasta la fecha. Requiere calibración local.	3	3	2	2	Sección transversal	Moderado
Trazadores magnéticos: Registro de bobina	Técnica del trazador que utiliza imanes naturalmente magnéticos o incrustados en partículas naturales para realizar un seguimiento del flujo y la trayectoria de las partículas de la carga de fondo. Se colocan en paralelo "Inductores" en el lecho del canal para medir el paso de partículas magnéticas.	Sí	Señal producida por el paso de grano sobre inductor.	Gravas magnéticas	Temprano a moderado desarrollo. La tecnología es de aplicación específica y los sitios específicos donde se encuentran las partículas magnéticas.	3	3	4	4	Sección transversal	Bajo

Sensores pasivos (todos requieren calibración en campo)											
Tecnología	Descripción	Operación continua	Modo de operación	Tipo de sedimentos	Etapas de desarrollo	Facilidad de uso	Durabilidad	Portabilidad	Confiabilidad	Cobertura espacial	Costo
Trazadores magnéticos: detector de movimiento para carga de fondo	Técnica del trazador que utiliza imanes naturalmente magnéticos o incrustados en partículas naturales para rastrear el flujo y la trayectoria de las partículas de la carga de fondo. El detector de movimiento de carga de fondo tiene un aproximado de 1 cm. El "inductor" detecta el movimiento de las partículas magnéticas.	Sí	Contables-Hora	8 a 90 mm piedras artificiales.	Desarrollo temprano realizado en el laboratorio. La tecnología es de aplicación específica donde se encuentran las partículas magnéticas.	2	2	2	3	Punto-Sección transversal	Bajo
Hidroacústicos pasivos	Grabación de sonido natural generado por las colisiones de roca a roca durante el transporte de carga sólida en los canales que utilizan un sistema de adquisición de hidrófono y los datos.	Sí	Señal producida por el impacto de los granos unos con otros.	Grava	Necesita trabajo adicional para ser una técnica de control operativo.	2	3	1	3	Extensión	Bajo

Fuente: (Gray J. et al., 2010).

Las tecnologías de sensores activos incluyen dispositivos, ya sea por luz o por sonido, además se debe conocer las características del cauce para lograr estimaciones del movimiento de sedimentos en el mismo. Se han desarrollado un sinnúmero de dispositivos que funcionan con sensores activos para su uso en la medición de la carga de fondo. Estos incluyen dispositivos Doppler (ADCP), sonar, radar, y trazadores "inteligentes". A continuación, se describe cada uno de estos:

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP): En las últimas dos décadas, el ADCP se ha convertido en una tecnología estándar para medir el flujo del agua en canales marinos, estuarios y ambientes de agua dulce

como se puede ver en la Figura 8-81. Son comercialmente disponibles, con el propósito principal de medir la distribución de velocidades y la profundidad en un canal; el fin es calcular el caudal del cauce. Los ADCP tienen una característica integrada de seguimiento que fue pensada originalmente para su uso en la corrección computacional del movimiento de la embarcación, pero ahora también puede ser explotada para producir estimaciones de las velocidades aparentes en el fondo y en última instancia para inferir las tasas de carga de fondo de transporte.

El ADCP está montado típicamente en una moto acuática y orientado casi vertical para emitir pulsos de sonido cortos a partir de sus transductores de sonar

hacia el fondo. Las mediciones de velocidad en el agua se basan en el desplazamiento de ecos (Doppler) reflejados sobre las partículas que se desplazan dentro de la columna de agua. Las mediciones de la velocidad del agua se corrigen para la velocidad de la embarcación a través de la medición de la velocidad del barco mediante el desplazamiento del Doppler desde el lecho del río. Cuando la velocidad del ADCP hace referencia al fondo, se produce un sesgo negativo sistemático en las mediciones de descarga que son atribuibles al movimiento o presencia de carga de fondo y cerca del lecho a la carga de sedimentos en suspensión, se conoce como un error de lecho móvil (Mueller & Wagner, 2006).

Las mediciones físicas de transporte de carga de fondo se pueden correlacionar con la velocidad de fondo aparente determinada en la región ADCP-sondeada del fondo, lo que proporciona una medida de base empírica de la tasa de carga de fondo-transporte.

Las investigaciones sugieren que los dispositivos ADCP tienen más éxito en los sistemas con lechos conformados por arena que en los conformados por grava (Gray J. et al., 2010).



Figura 8-81. ADCP.
Fuente: (Gray J. et al., 2010).

Las metodologías sugieren la calibración del ADCP, proceso que requiere la toma simultánea de muestras de sedimento suspendido y material del lecho para realizar el respectivo ajuste. Una vez se tengan suficientes datos representativos es posible realizar el proceso de calibración. Para la calibración entre la señal de retorno del ADCP y concentración de sedimento suspendido C_{ss} se adopta la metodología presentada por Wright et al. (2010).

El ADCP se instala con disposición vertical (haces orientados hacia el fondo del cauce) para obtener la señal o backscatter a distintas profundidades y luego realizar la integración en la vertical para el proceso de calibración.

Durante las mediciones el ADCP se configura en modo 1 (Teledyne RD Instruments, 2008) y se trabaja con celdas de 0.2 m de altura e intervalos de medición de aproximadamente 0.5 s. La captura simultánea de señal acústica y muestra de agua, con embarcación anclada por cada punto de muestra, se realiza durante siete minutos en cada punto para garantizar representatividad de los datos (Szupiany et al., 2007), con el fin de establecer una relación entre la señal corregida del instrumento acústico y la muestra para la medida de la concentración de sedimentos en suspensión.

Para el análisis de las muestras de sedimento de fondo se aplica el método de tamizado. Las muestras de sedimento en suspensión son procesadas, en primer lugar, separando el material correspondiente a la carga de lavado (limos y arcillas) y del fondo (arenas) por tamizado húmedo para luego realizar, previa evaporación y secado, el cálculo de las concentraciones en el volumen de muestra tomado. Por último, se realizan mediciones con ADCP (plataforma móvil) en cinco secciones transversales. En donde paralelamente se

realizan aforos sólidos por método tradicionales a fin de comparar ambos resultados.

Urlick (1983) relaciona la señal de retorno del ADCP (Backscatter) con el logaritmo de la concentración de sedimentos, según la Ecuación 8-40:

$$\text{Log}_{10}(C_{ss})=0.1 \times (RL+2TL)+KT$$

Ecuación 8-40

Donde,

C_{ss}: Concentración de sedimento suspendido.
RL: Señal de retorno o valores crudos del ADCP.
2TL: Corrección por pérdidas de transmisión.

Contempla la pérdida de señal debido a la absorción y dispersión cuando se propaga a través del agua, esto es, el eco del sonido emitido es recibido con menor intensidad en el ADCP. Siendo *RL+2TL* la señal corregida o backscatter, también denominado SCS, *KT* es la constante que engloba los parámetros característicos del instrumento. Los valores de *RL*

están dados en unidades propias del instrumento y se requieren en decibeles (*dB*), por lo que se deben multiplicar por valores específicos para cada haz, propios de cada modelo y marca del instrumento que son suministrados por el fabricante.

La corrección de la señal por dichas pérdidas se describe según la Ecuación 8-41:

$$2TL=20\text{Log}_{10}(\psi r)+2 \alpha f r + 2 \alpha s r$$

Ecuación 8-41

Donde,

20 Log₁₀ (ψ r): Pérdidas debidas a la dispersión del “beam” acústico.
2 α f r: Pérdidas debidas a la absorción del sonido por el fluido.
2 α s r: Pérdidas debidas a la atenuación por el sedimento en suspensión.
Ψ: Corrección por el campo cercano del transductor.
r: Distancia oblicua desde la cara del transductor al centro de la celda.
α f: Coeficiente de absorción acústica por el agua.
α s: Coeficiente de atenuación por sedimento.

La calibración que permite estimar posteriormente la concentración de sedimento en una

vertical a través de la siguiente Ecuación 8-42:

$$C_{SS} = 10^{(0.1 * SCS + KT)}$$

Ecuación 8-42

Una vez obtenida la calibración, la estimación de concentración del sedimento (G_{ss}) obtenida a partir de las mediciones del ADCP, consisten en recorrer una sección transversal del cauce a fin de obtener para cada celda de medición los valores de velocidad y señal de retorno. Luego, previa corrección de la señal, se aplica la calibración lograda en cada celda para obtener C_{ss} . La afectación de este valor por el caudal

líquido medido resuelve el transporte de sedimento, tal como se aprecia en la Figura 8-82. La sumatoria del caudal sólido en cada celda da el transporte total en la zona medida por el instrumento. Cabe aclarar que las muestras de sedimento, de forma intencional, no cubren la zona no medida por el ADCP en las cercanías del fondo, con el fin de obtener resultados comparables entre ambos métodos.

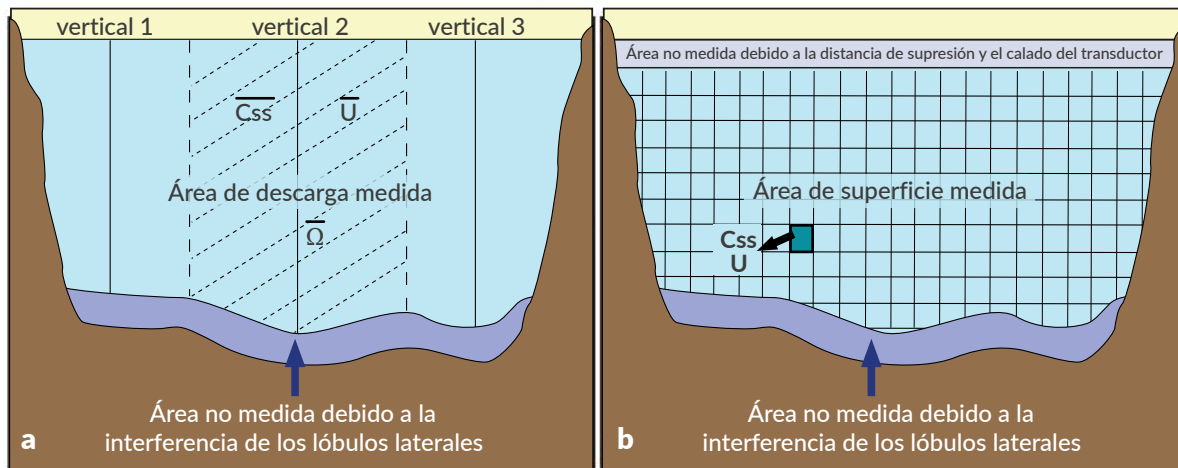


Figura 8-82. Representación esquemática de aforo, a) método tradicional, y b) con ADCP. Fuente: (Latosinski et al., 2011).

Szupiany et al. (2007), proponen el método dinámico para la estimación del transporte a partir de las mediciones del ADCP, y consiste en recorrer cuatro veces, de margen a margen, una transecta del cauce. Luego, un promedio de los cuatro recorridos se utiliza para aplicar la calibración en cada celda de medición

del instrumento y obtener la concentración de sedimento de fondo y en suspensión. La afectación de este valor de C_{ss} por la velocidad del flujo medida en la celda y por el área de la celda (área transversal) resuelve el transporte de sedimento en la misma. La sumatoria del caudal sólido así obtenido en cada

celda de medición del ADCP dará el transporte total en la zona medida por el instrumento (G_{ssmi}). Luego, sumando a G_{ssmi} , el correspondiente a las zonas no medidas por el ADCP en superficie (obtenido por extrapolación), se obtiene el valor de G_{ssmi} .

Los ADCP miden la velocidad del agua relativa al instrumento. Si el instrumento se halla montado sobre una plataforma móvil, como un bote, las velocidades son corregidas para obtener mediciones absolutas. La velocidad del bote se determina tanto por el sistema BT o mediante el uso de un DGPS. Cuando el fondo del río es móvil, la señal de BT es desviada por el sedimento en movimiento. En esta situación, la velocidad aparente del sedimento del fondo puede determinarse si la velocidad actual del bote es conocida, tanto por DGPS como manteniendo el ADCP perfectamente quieto (Rennie et al., 2002).

Rennie et al. (2002) citan el modelo cinemático de Haschenburger y Church (1988), para el cálculo de la tasa de transporte de la carga de fondo local por unidad de ancho, cuando se conocen los valores de la velocidad actual promedio de la carga de fondo (v_B), espesor de la capa de fondo en movimiento (d_a), porosidad (λ_a) de la capa activa de transporte y la densidad de las partículas de sedimento (ρ_s) (Ecuación 8-43):

$$g_b = v_B d_a (1 - \lambda_a) \rho_s$$

Ecuación 8-43

Si se asume que la velocidad aparente del fondo es una medición correcta de la velocidad real del fondo (v_B), y adicional, la profundidad y porosidad de la capa móvil del fondo no han sido medidas explícitamente, se sabe que ambos parámetros, así como la densidad

del sedimento, no experimentan gran variabilidad. De este modo, al utilizar la velocidad del fondo obtenida por *bottomtrack* y valores de tasas de transporte de fondo obtenidas por métodos tradicionales (por ejemplo, muestras físicas o método de seguimiento de dunas) pueden plantearse regresiones entre ambas variables, así como expresiones para la profundidad de la capa de fondo.

Sonar: El sonar se utiliza hace tiempo como una herramienta de medición en cuerpos de agua; para la localización de objetos en columnas de agua y para la medición de la batimetría y la estratigrafía. El principio de medición del sonar se basa en el tiempo de viaje de una corta ráfaga de sonido. La distancia al objeto reflectante se puede calcular con base en la velocidad del sonido en las condiciones ambientales de agua. El sonar se ha utilizado para recoger datos batimétricos en los cuerpos de agua lénticos y lóticos. Los recientes avances en las tecnologías de sonar y capacidades de procesamiento posterior han dado lugar a nuevas técnicas de monitoreo de carga de fondo. El uso de la sonda para el control del transporte de sedimentos es un área prometedora de investigación. Hay dos tipos de sonar, ambos se basan en los mismos principios fundamentales, sin embargo, difieren en la escala espacial de medición.

Trazadores inteligentes: Los avances en la electrónica y los microprocesadores se han traducido en el desarrollo de microsensores susceptibles para uso en sistemas fluviales para el seguimiento de partículas. Estos “trazadores inteligentes” permiten la investigación en temas relacionados con las características de transporte de partículas; tal movimiento espacial y temporal de las partículas es aplicado a escala de cuencas hidrográficas o a escala transporte y alma-

cenamiento de granos. Etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) y transmisores de micro radio son ejemplos de estos trazadores inteligentes. Los RFID son sensores de forma cilíndrica, de aproximadamente 2 mm de diámetro y 25 mm de longitud, que se puede insertar en un agujero perforado en una placa o en (hormigón) roca. Los RFID, no requieren una fuente de alimentación, se utilizan en combinación con las antenas de detección. Cuando un RFID pasa a través del campo electromagnético generado por las antenas, la RFID se activa y emite una señal con un número de identificación único, que es detectado por una matriz de antenas de recepción y se registra en un almacenador de datos.

Un transmisor de micro radio funciona de forma similar, pero tiene una fuente de alimentación incorporada. La ubicación de las partículas se determina mediante la triangulación de la posición de las partículas a través de una matriz de recepción georreferenciada. Ambas tecnologías son ideales para la adquisición de datos sobre grandes escalas espaciales para la comprensión del movimiento de las partículas a través de ríos, así como información estadística sobre el almacenamiento en canales y la liberación de sedimentos.

Las **tecnologías de sensores pasivos** se basan en señales naturales para producir estimaciones del movimiento de sedimentos. La ventaja de los sensores pasivos es que el sistema de monitoreo hace uso de la naturaleza activa de transporte de carga sólida para reportar las variables desconocidas de manera que se puede lograr un registro de forma fácil. Estos sensores se utilizan ya sea en modo autónomo, tal como un hidrófono para grabación de la energía acús-

tica de las colisiones de roca o en combinación con un dispositivo de impacto, similar a un tubo lleno de aire o placa en el lecho del río.

Tubos de impacto: Cuando los sensores acústicos están unidos a un cuerpo durable colocado en el lecho del río, las magnitudes de frecuencia y acústicas de los impactos de los sedimentos fluviales con ese cuerpo pueden ser registrados y procesados, con la calibración de la carga de fondo de transporte sobre el terreno apropiado, son utilizados para inferir los flujos de carga de fondo y posiblemente los tamaños de grano. Los geófonos detectan ondas acústicas generadas a partir de choques transferidos a través de las tuberías y traducen el número de choques, o frecuencias de choque, en tasas de carga de fondo de transporte.

Las pruebas con los tubos de impacto han demostrado que el movimiento de las partículas gruesas se puede seguir de forma continua sin perturbación significativa al flujo. Froehlich (2003) y Mizuyama et al. (2003) encontraron que la intensidad del sonido aumenta con la velocidad de transporte, y la frecuencia de un impacto es inversamente proporcional al diámetro de la partícula en movimiento usando mezclas de granos de tamaño único. Estas características han sido utilizadas de forma provisional para inferir las tasas de carga de fondo de transporte a partir de datos de impacto.

El tubo de impacto requiere el despliegue en una parte del lecho estable, como por ejemplo una presa, de por lo menos la mitad de una docena de geófonos, por ejemplo, en los Alpes japoneses se han desplegado unos geófonos como lo podemos observar en la Figura 8-83:



PNN El Cocuy
📷 Francisco Rojas



Figura 8-83. Geófono de tubería ubicado en una superficie estable del lecho de una presa en el río Joganzi, Japón. El flujo es de derecha a izquierda.
Fuente: (Gray J. et al., 2010).

Placas de impacto: Las placas de impacto funcionan de manera similar a los tubos de impacto antes descritos, pero los dispositivos acústicos en este caso están unidos a la parte inferior de una placa de acero que está montada a ras con el lecho del río. El sonido producido por los impactos de las gravas en cada placa es medido y procesado para dar una indicación de flujo y del tamaño del grano de los sedimentos en movimiento como carga de fondo. La instalación ha sido recientemente mejorada con una tina de carga de fondo de acumulación de sedimentos ubicada inmediatamente aguas abajo de las placas (Figura 8-84, Figura 8-85).



Figura 8-84. Placa de Impacto para medir el transporte de carga sólida en la corriente Erlenbach, Suiza (vista aguas abajo, con placas visibles en primer plano).
Fuente: (Gray J. et al., 2010).

La mejor ubicación de las placas de impacto es en la cresta del vertedero o en otro lugar donde el flujo es suficientemente rápido para evitar la acumulación del material del lecho. Dependiendo de las condiciones hidráulicas, el espesor de la placa de acero, y de las propiedades acústicas integradas a la infraestructura de la placa de impacto experimental, el tamaño mínimo de sedimento que se requiere para producir una señal acústica mensurable es de entre 1 y 2 cm. Los componentes de los sistemas de placa de impacto son relativamente baratos en comparación con muchas otras opciones disponibles. La mayor parte del costo de estos sistemas se asocia con la construcción del sitio y la instalación, la experiencia para el montaje de los equipos y el análisis de los programas de recolección de datos. Mediante la captura de la señal acústica todo puede ser posible para conocer los tamaños de partícula y la carga de fondo.

Columnas de impacto: El sensor transporte de gravas (GTS) es una columna de impacto que está montado verticalmente desde el lecho del río en la columna vertical de agua (Figura 8-86). Se compone de una placa de presión de acero cubierto con una película de fluoruro de polivinilideno. Cuando la grava golpea la columna, se genera una carga eléctrica, la magnitud de la fuerza de impacto y el impulso de la partícula son los indicadores. El número de impactos dividido por el tamaño de la fracción de grano ponderado es una indicación de transporte masivo de carga de fondo.

Las partículas que se mueven rápidas tienden a registrar con mayor precisión con el GTS, por lo que pueden ser muestreados preferentemente. En estudios de laboratorio, las partículas más grandes son preferentes ya que las partículas más pequeñas tienden a fluir alrededor del cilindro.



Figura 8-85. Placa de impacto para medir el transporte de carga sólida en la corriente Erlenbach, Suiza (vista lateral de la sección de aguas abajo, con placas visibles en la parte superior derecha y el agua que cae en un tipo de tina). Fuente: (Gray J. et al., 2010).

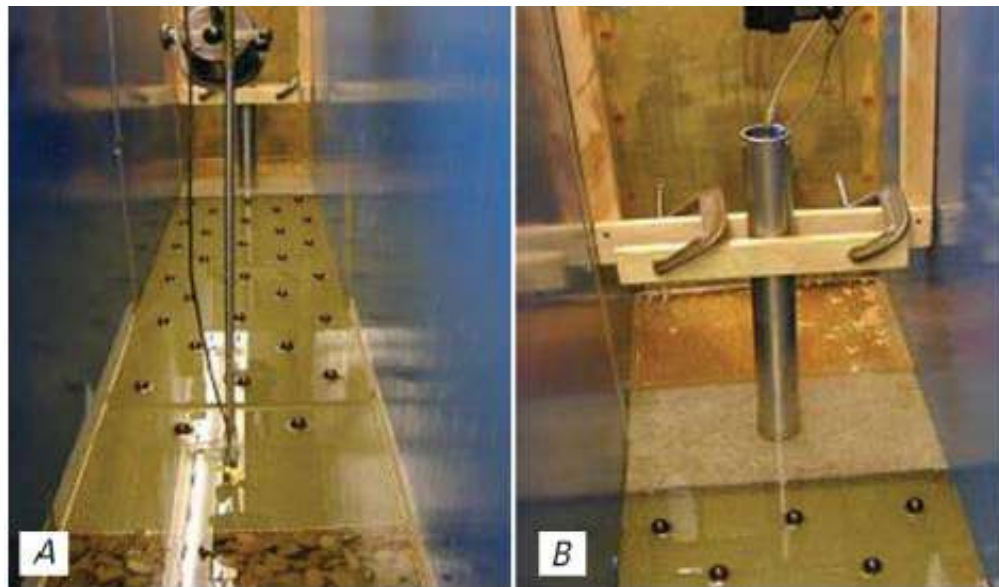
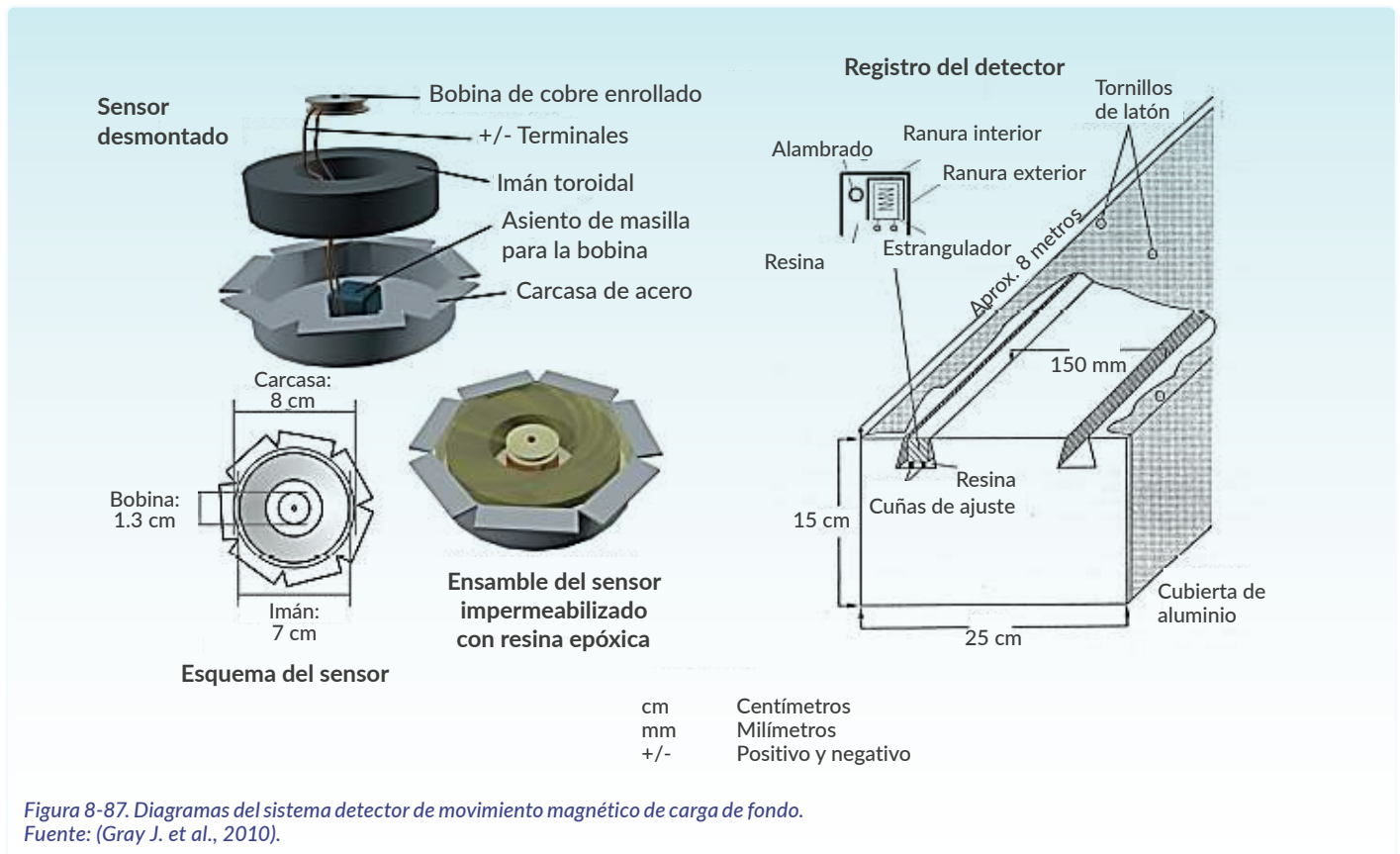


Figura 8-86. Sensor de transporte de gravas (SMT) experimental. Fuente: (Gray J. et al., 2010).

Detección mediante trazadores magnéticos: Las técnicas de trazadores magnéticos para el control de carga sólida incluyen el uso de clastos naturalmente magnéticos y clastos naturales con imanes incrustados para estudiar el flujo y la trayectoria de las partículas de carga de fondo. Una partícula magnética que pasa sobre un inductor induce un pico de tensión que se puede medir y se utiliza para contar las partículas magnéticas. Este sistema se conoce generalmente como

un detector de movimiento de carga sólida (Figura 8-87). Diversas configuraciones pueden ser usadas para adquirir información. El sistema comprende varias unidades individuales implantadas en el lecho del río; incluye un registro de detección con dos inductores paralelos que abarcan todo el ancho de la corriente y están separados por una longitud conocida que puede detectar la duración de movimiento de las partículas a través del sistema.



Un sistema bien diseñado tiene el potencial de proporcionar datos a largo plazo de series de tiempo sobre las tasas de carga de fondo de transporte relativos a un determinado sitio con partículas magnéticas de forma natural. Los sistemas más an-

tiguos requieren ajustes manuales frecuentes para reducir el ruido y la interferencia electrónica. Al igual que otras tecnologías de sustitución que emplean grandes piezas de equipo, la técnica del marcador magnético requiere acceso de vehículos, así como

una fuente de alimentación externa. La calibración de campo con grandes muestras de carga de fondo mostró que el sistema tiende a subestimar la carga de fondo a altos flujos.

Hidrófonos: Dispositivos acústicos pasivos que son similares a los utilizados en conjunción con tubos o placas de impacto (Figura 8-88), pero en lugar de grabar el sonido del sedimento al chocar con un cuerpo

rígido, este dispositivo registra la energía acústica que producen las partículas de sedimento al colisionar con otras partículas en el lecho del río. Los hidrófonos son también sensibles a otras señales acústicas, predominantemente aquellos asociados con la turbulencia del flujo. Los dispositivos se pueden montar desde un trípode, o se pueden implementar en un recipiente tal como una cápsula, por ejemplo, un tubo de PVC.



Figura 8-88. Un hidrófono (A) en poder de un marco fijo en el Torrent de Saint-Pierre, Francia, y (B) en el marco antes de la inmersión. Fuente: (Gray J. et al., 2010).

Este dispositivo acústico presenta una media ponderada espacial del transporte debido a la dependencia de la proximidad del sensor a los impactos entre granos. El método de medición requiere calibración periódica y puede ser utilizado para tomar medidas en zonas de difícil alcance. El ruido de fondo, si está presente, por ejemplo, de la turbulencia, la cavitación, los bancos, o de fuentes aéreas deben tenerse fuera del cálculo de flujo. Esta tecnología se limita a la grava y a granos de tamaños grandes. Los hidrófonos se pueden implementar de manera efectiva en regiones de ríos amplios con lechos de grava.

La ventaja más importante de los hidrófonos, en comparación con los geófonos es que los hidrófonos no son colocados sobre el lecho del arroyo, pero se suspenden en la columna vertical de agua y, por tanto, el costo de instalación de los hidrófonos tiende a ser sustancialmente menor que el de los geófonos de placas (Gray J. et al., 2010).

8.1.4.5 Procedimientos de medición de sedimentos

Antes de describir los métodos de observación, es necesario tener en cuenta los procesos que intervienen en el monitoreo de sedimentos, tal como se resumen en la Figura 8-89.

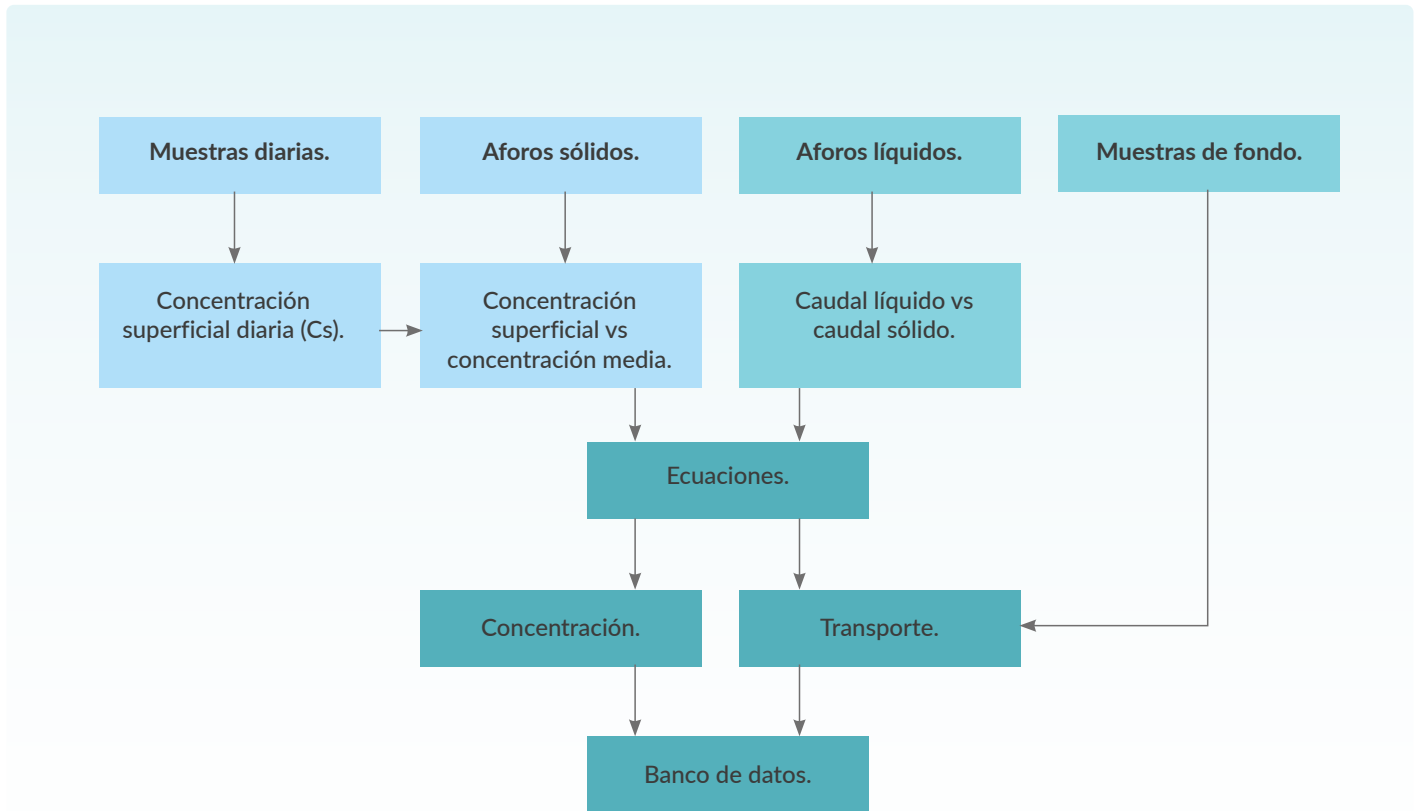


Figura 8-89. Procesos en el monitoreo de sedimentos.
Fuente: (IDEAM, 2009).

- Diariamente se toman muestras superficiales de agua, de las cuales se realizan determinaciones de concentración superficial de sedimentos.
- Periódicamente se realizan aforos sólidos, que permiten determinar la concentración media de sedimentos en suspensión en la sección de aforos, así como la concentración superficial. Con base en los aforos sólidos se determina la relación entre caudal líquido y caudal sólido, y se establece la relación entre concentración superficial y media de los aforos. Con esa relación y la serie de concentraciones superficiales diarias, se genera la serie de concentraciones medias diarias. Con esta serie y con la serie de caudales líquidos se determina el

transporte diario de sedimentos en suspensión. La relación entre caudal líquido y caudal sólido también permite determinar el transporte diario.

- Para conocer el transporte total de sedimentos de una corriente, es necesario, además del muestreo de sedimentos en suspensión, realizar el muestreo de material de arrastre de fondo, cuyas muestras también requieren un proceso especial de laboratorio (granulometría).

Para la determinación de las concentraciones, el proceso general incluye una interfase de laboratorio, que involucra los procedimientos indicados en la Figura 8-90.

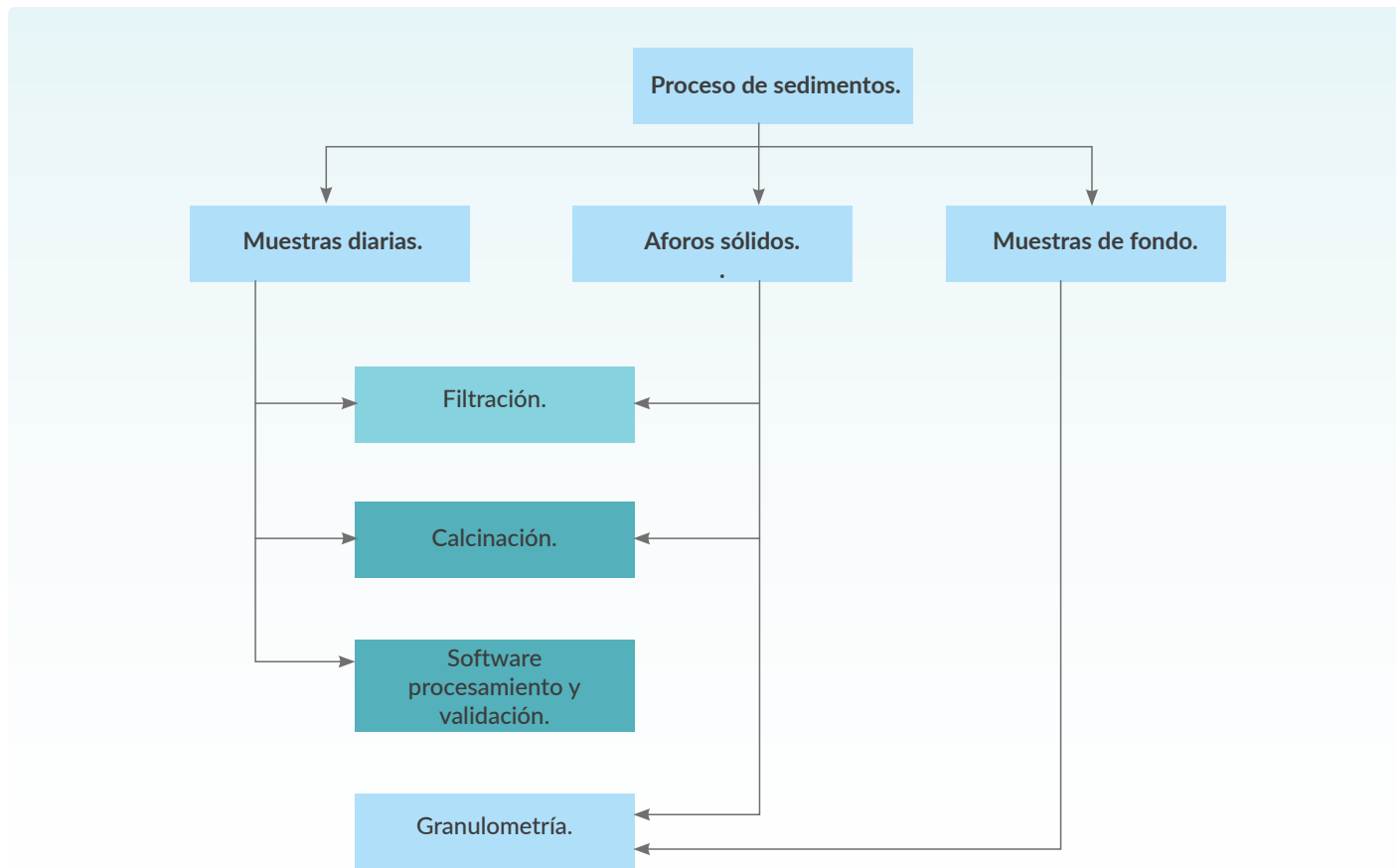


Figura 8-90. Procedimiento de muestra de sedimentos en el laboratorio. Fuente: (IDEAM, 2009).

8.1.4.6 Muestreo diario de sedimentos en suspensión

Para determinar la concentración de sedimentos, se toman muestras superficiales a, 1/4, 1/2 y 3/4 del ancho de la sección transversal, en botellas plásticas especiales de 500 ml, para luego tomar los volúmenes de muestra y registrarlos en formatos adecuados en el sitio de muestreo. El tamaño óptimo debe fluctuar entre el 60 y el 90 %, como se muestra en la Figura 8-91.

Las botellas se deben marcar de acuerdo con la localización de la muestra en la sección, y luego se introducen en la canastilla de muestreo. La toma de muestras se realiza desde puentes o estructuras (tarabitas), como se muestra en la Figura 8-92.

En el proceso de toma de la muestra se debe evitar que, si la muestra sale por debajo del óptimo (Figura 8-91), se introduzca de nuevo la misma muestra para completarla. En tal caso, se debe desechar la muestra y volverla a tomar.

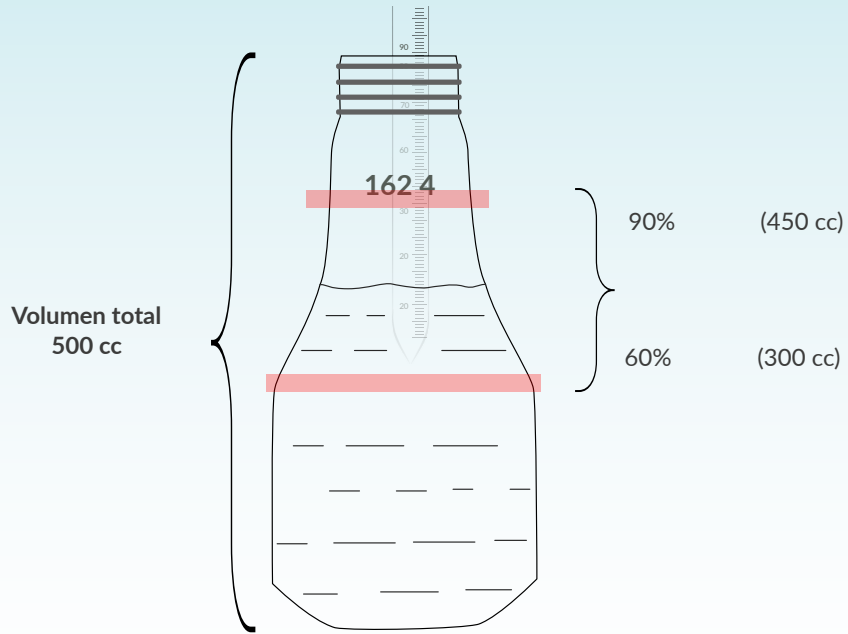


Figura 8-91. Tamaño óptimo de la muestra diaria.
Fuente: (IDEAM, 2009).



Figura 8-92. Botellas plásticas de 500 cm³ y proceso de toma de muestras.
Fuente: (IDEAM, 2009).

Una vez tomada la muestra, es necesario medir el volumen exacto muestreado, para lo cual se puede utilizar una pipeta y una tabla de conversión, como se indica en la Figura 8-93 y la Tabla 8-16 respectivamente.

Los resultados de campo se anotan en el *formato de captura de muestras diarias de sedimentos (z)*, el cual debe contener como mínimo la siguiente información:

- Identificación de la estación.
- Año y mes de muestreo.
- Día y hora de la muestra.

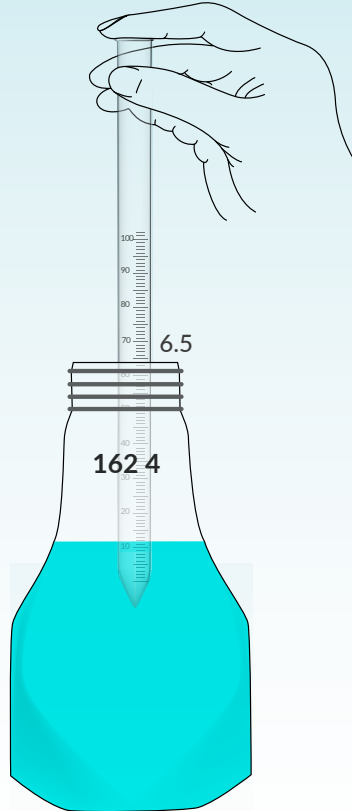


Figura 8-93. Medición del volumen muestreado con pipeta.
Fuente: (IDEAM, 2009).

Tabla 8-16. Tabla de conversión, medición del volumen.

		Divisiones decimales									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Divisiones enteras	0	119.0	121.5	124.0	129.0	131.5	134.2	139.0	141.5	146.5	149.5
	1	151.5	156.5	161.5	164.0	169.0	174.0	176.5	181.5	186.5	189.5
	2	193.0	199.0	204.0	209.0	211.1	216.5	221.5	226.5	231.5	239.5
	3	241.5	246.5	251.5	259.0	261.5	266.5	271.5	276.5	281.5	289.5
	4	294.5	299.0	304.0	309.0	314.0	321.5	326.5	331.5	336.5	341.5
	5	346.5	349.0	354.0	356.5	361.5	364.0	369.0	371.5	376.5	379.0
	6	381.5	384.0	389.0	391.5	394.5	396.5	399.0	401.5	404.0	406.5
	7	409.0	411.5	414.0	416.5	419.0	421.5	424.5	425.2	426.5	429.0
	8	432.7	431.5	434.0	436.5	439.0	441.5	442.7	444.0	446.5	449.0

Fuente: (IDEAM, 2009).

Para el filtrado de la muestra en campo se sigue el procedimiento genérico que se describe a continuación:

1. Se dispone de los equipos y materiales necesarios (embudos, filtros secos y limpios, cajas de madera para manipulación de filtros, probeta graduada en mililitros para medir el filtrado, formatos, cinta pegante, bolsas y esfero).
 2. Se selecciona el filtro, se humedece y se coloca en el fondo del embudo en forma horizontal.
 3. Se agita la botella vigorosamente para que el sedimento que se haya sedimentado quede en el fondo, sin medir, y se vierte el volumen de la muestra en la probeta. Se mide luego el volumen de la muestra, colocando la probeta en tal forma que la superficie del agua dentro de la misma quede a la altura de los ojos (para evitar la paralaje).
 4. Se anota el volumen de la muestra por filtrar en el *formato de muestras diarias*.
 5. Se vierte luego el contenido de la probeta correspondiente a la muestra sobre el filtro previamente colocado en el fondo del embudo. Este vertido debe hacerse lentamente, para evitar que el filtro se levante del fondo del embudo, lo cual haría que parte de la muestra pasara sin filtrar. Este proceso se repite para todas las muestras del día (a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la orilla).
 6. Los filtros se recogen al día siguiente teniendo cuidado de no perder el sedimento. Para ello se debe evitar tocar los filtros con las manos o dedos húmedos para que el sedimento no se pegue. Tampoco se debe colocar el filtro con la cara superior (la que recibe el sedimento) hacia abajo, para que el sedimento no se caiga.
 7. Luego se procede a marcar y doblar el filtro con la muestra hacia adentro, así: primer dobléz por la mitad y segundo dobléz por el cuarto, dejando ver la identificación de la muestra. Los dobleces siempre se deben hacer con los bordes hacia arriba, para evitar que los sedimentos resbalen y caigan. Se anota el número del filtro en el formulario de registro de muestras diarias.
 8. Una vez doblados, los filtros se empacan cada uno en una bolsa plástica. La bolsa se sella con cinta pegante (1 a 2 cm), para evitar que el sedimento que pueda escapar del filtro en el viaje salga de la bolsa. En este caso, en el laboratorio se debe recoger el sedimento contenido en la bolsa por fuera del filtro, para tenerlo en cuenta en el proceso.
 9. Finalmente, una vez sellados, los filtros se empacan en la bolsa del mes (Figura 8-94).
 10. Se debe tener cuidado que los resultados de todo el proceso de muestreo y filtración queden anotados en forma legible en el *formato de registro de muestras diarias de sedimentos* (Anexo 8-7), el cual debe contener como mínimo la siguiente información (Figura 8-94):
 - ♦ Identificación de la estación.
 - ♦ Año y mes de muestreo.
 - ♦ Día y hora de la muestra.
 - ♦ Lectura de la mira o limnómetro.
 - ♦ Distancia de la muestra desde la orilla ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$).
 - ♦ Número de la muestra o del filtro.
 - ♦ Volumen de la muestra.
- Las demás casillas se deben dejar para el laboratorio.



Campaña monitoreo Cesar, afluente río Tucuy-ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM



Figura 8-94. Marcado y empaque de los filtros en una bolsa plástica para su envío o entrega.
Fuente: (IDEAM, 2009).

8.1.4.7 Aforos sólidos

El aforo sólido consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforo, a lo ancho y en profundidad. Con base en el aforo líquido se determinan el número de verticales donde se tomarán tres muestras integradas, además de las tres muestras superficiales a 1/4, 1/2 y 3/4 del ancho de la corriente.

Dependiendo de la profundidad, se realizan aforos puntuales, destinados a conocer la distribución de la concentración de sedimentos en suspensión a lo largo de una vertical, desde la superficie hasta el fondo, o se realizan aforos integrados, mediante los cuales se toma una sola muestra representativa de toda la vertical.

Aforo puntual

Este tipo de aforo se utiliza en secciones profundas mayores de 5 m. Los muestreadores de tipo puntual están diseñados para que la entrada del flujo por la boquilla hacia el recipiente esté controlada por una válvula que se puede abrir o cerrar eléctricamente desde la superficie. El equipo más utilizado para esta clase de mediciones es el USP-61.

Para la medición de los sedimentos en suspensión en la vertical con el método puntual existen varias formas de selección de puntos de muestreo:

- ♦ Una muestra tomada desde la superficie a una distancia igual al 60 % de la profundidad.

- ♦ Dos muestras, una al 20 % y otra al 80 % de la profundidad con igual factor de ponderación.
- ♦ Tres muestras tomadas al 20, 60 y 80 % de la profundidad desde la superficie con igual factor de ponderación.
- ♦ Varias muestras tomadas en diferentes puntos para establecer la distribución de la concentración en la vertical con el grado de precisión requerida. Generalmente se toman muestras cada 10 % de la profundidad.

Las mediciones que se realizan por verticales no muestrean la totalidad de los sedimentos debido a que el instrumento no llega hasta el lecho mismo de la corriente. La magnitud de esta distancia, entre el lecho y el instrumento, dependerá de la forma y tamaño del equipo, del método de operación, de la consistencia o firmeza del fondo y de la presencia de formas del lecho. Como consecuencia, no todos los sedimentos de la vertical tienen la posibilidad de ser captados por el muestreador.

Dadas las variaciones en la distribución de los sedimentos finos y de las arenas a lo largo de una vertical, las concentraciones y volúmenes de transporte calculados por medio de muestras puntuales deberán determinarse tanto para la concentración total como para la concentración de arena.

En un aforo puntual es crítica la determinación del tiempo de llenado de la botella, el cual depende de la velocidad de la corriente en el punto de muestreo y del diámetro de la boquilla utilizada. En el protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), disponible en la página web del IDEAM, se describe en detalle la forma de calcular el tiempo de llenado.

• **Aforo puntual con muestreador USP-61**

El muestreador USP-61 se utiliza para aforo a profundidades no mayores de 15 m. Para un aforo normal se toma un mínimo de cinco puntos en la ver-

tical (superficial a 0.2, 0.6, 0.8 y fondo), para un aforo detallado se toman 10 puntos (cada 10 %) especialmente para caudales altos. Exige utilizar un malacate de 75 kg de capacidad y boquillas de 1/4", 1/8" y 3/16".

En el aforo puntual se debe tener en cuenta la distribución de la concentración tanto en la vertical como a lo ancho de la sección. La medición del aforo de caudal debe ser simultánea o previa a la medición del aforo sólido. El procedimiento general para el aforo sólido puntual se presenta en el flujograma de la Figura 8-95.

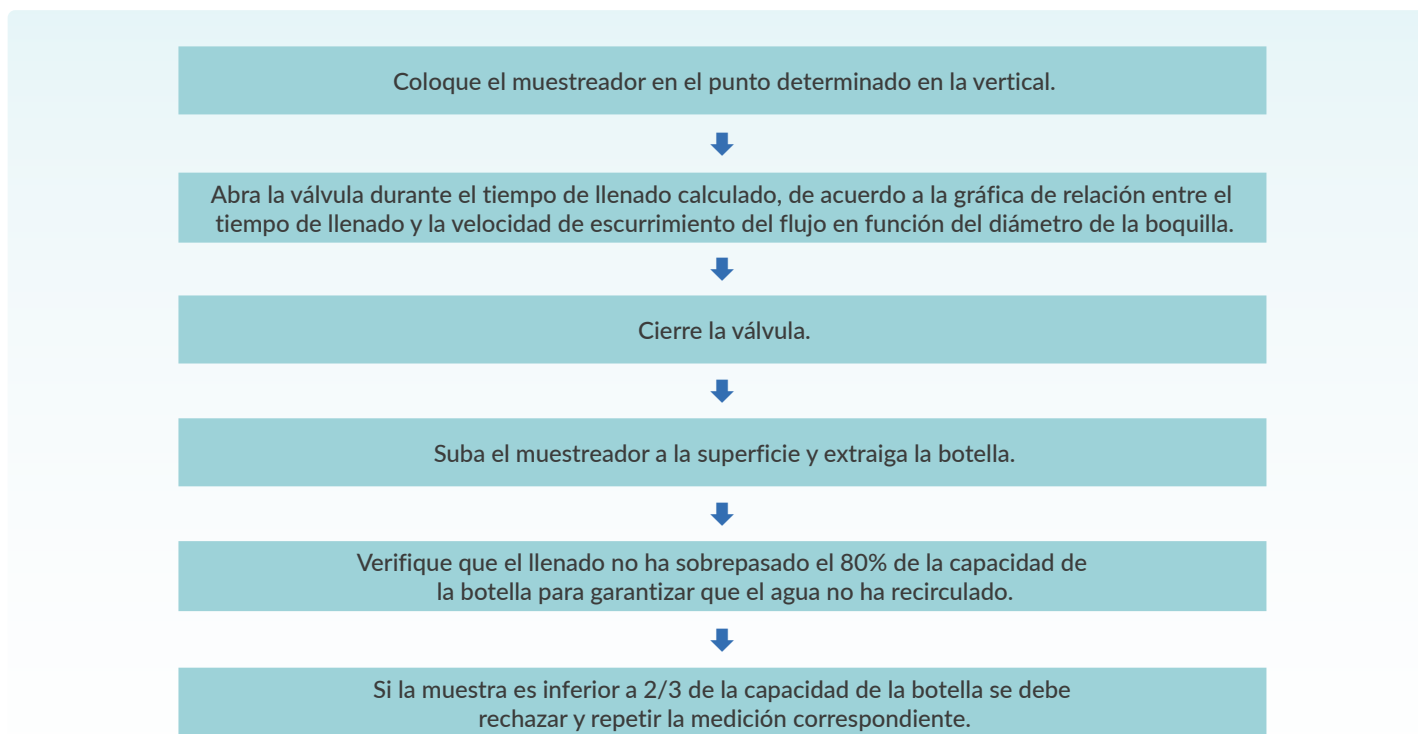


Figura 8-95. Procedimiento para realizar el aforo sólido puntual.

Aforo integrado

En este tipo de aforo el muestreador recorre la vertical en ambas direcciones (superficie-fondo-superficie), de tal manera que durante el doble desplazamiento en la vertical se tome una muestra que representa la

concentración media en la vertical. Los equipos utilizados para este tipo de muestreo son los integradores USDH-49 y USDH-59, los cuales no deben emplearse en profundidades mayores a 5.0 m por la poca capacidad del recipiente. Para este tipo de aforo es necesario

calcular la velocidad de tránsito constante con que el instrumento debe recorrer la vertical y el tiempo de muestreo, en función de la velocidad de la corriente (tomada del aforo líquido), de la profundidad y del diámetro de la boquilla, de tal manera que no vaya a existir posibilidad de recirculación del agua dentro de la botella. En el protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007), que se puede bajar de la página web del IDEAM, se describe en detalle la forma de calcular la velocidad de tránsito y el tiempo de muestreo.

Para aforos realizados con estos muestreadores se requiere un malacate de mínimo 30 kg de capacidad y suficientes botellas para el muestreo. El número de verticales no debe ser menor de seis y se deben tomar por lo menos tres muestras integradas en cada vertical. La boquilla se selecciona de acuerdo con las velocidades del flujo y se coloca la botella correspondiente en el instrumento. La sección de la boquilla debe ser normal a las líneas de flujo, y la velocidad de acceso en la boquilla del instrumento debe ser igual a la velocidad del flujo en el punto de muestreo. El procedimiento para el aforo sólido integrado se presenta en la Figura 18. Detalles específicos del método de muestreo pueden ser consultados en el protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007) mencionado.

El *formato de aforo de sedimentos en suspensión* (Anexo 8-10) debe contener como mínimo la siguiente información:

- ♦ Identificación y localización de la estación.
- ♦ Fecha.
- ♦ Hora inicial y hora final del aforo.
- ♦ Equipo utilizado.
- ♦ Tipo de aforo.
- ♦ Nivel inicial y nivel final.
- ♦ Caudal.
- ♦ Distancia al punto de referencia (por muestra).
- ♦ Profundidad total y profundidad puntual (por muestra).
- ♦ Velocidad (por muestra).
- ♦ Número de muestra.
- ♦ Volumen en cm^3 (por muestra).
- ♦ Datos de laboratorio: fecha, método empleado (calcinación, filtrado, evaporación), y crisol, tara y peso de cada muestra.

- **Aforo integrado con muestreador USDH-487**

El muestreador tipo USDH está construido para operarlo con la mano por medio de una varilla de 1/2" de diámetro colocada en la parte superior del instrumento, la cual es normal al eje horizontal de la boquilla. El muestreador está calibrado para una boquilla de 1/4"; sin embargo, se puede utilizar con una boquilla de 3/16".

El procedimiento para operar el muestreador se describe en la Figura 8-96. La operación de descenso y ascenso se realiza con la mano a una velocidad de tránsito y a un tiempo determinado para obtener una muestra adecuada (Figura 8-97).



PNN El Cocuy
📍 Jorge Luis Ceballos

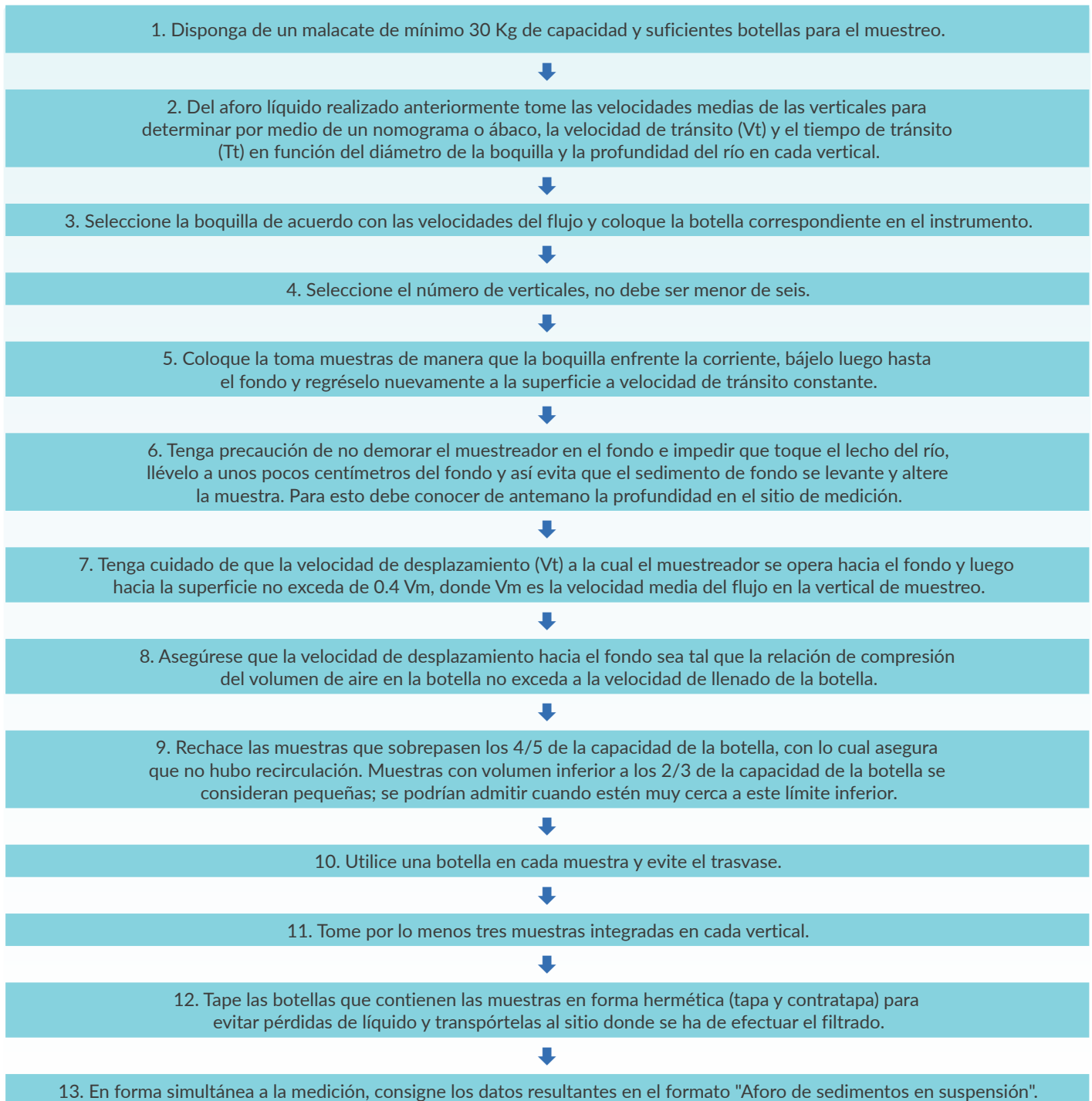


Figura 8-96. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado.
Fuente: (IDEAM, 2009).



Figura 8-97. Aforo sólido con muestreador de sedimentos en suspensión USDH-49.
Fuente: (IDEAM, 2009).

- **Aforo integrado con muestreador USP-61**

Para profundidades hasta de 5 m se puede utilizar el muestreador USP-61 como integrador, realizando el descenso y el ascenso con la válvula abierta. Para profundidades mayores a 5 m y menores a 10 m, el muestreador se lleva cerrado hasta el fondo, donde se abre la válvula y se inicia el recorrido hasta la superficie. Para profundidades mayores a 10 m se pueden tomar dos muestras integradas, una desde el fondo a la mitad de la vertical y otra desde la mitad hasta la superficie del agua. La muestra integrada sobre toda la vertical será la combinación de ambas muestras.

Las boquillas se ajustan internas y externas al muestreador, de tal manera que la velocidad de entrada del agua a la misma esté dentro del 8 % de la velocidad de la corriente cuando esta es mayor que 0.30 m/s. Se ha encontrado que una diferencia entre estas dos velocidades origina un error en la concentración de la muestra, tal como se muestra en la Figura 8-98, en especial para partículas de diámetro mayor a 0.062 mm (arenas). Por ejemplo, para velocidades de entrada de 0.75 la de la corriente, el error en la concentración para partículas

de 0.45 mm de diámetro puede ser del orden del 10 % (*Federal Inter-Agency Sedimentation Project, 1941* en Edwards y Glysson, 1999). Por estas razones y dado que, en general, cada boquilla es diseñada para una serie particular de muestreadores, no se debe usar una boquilla para una serie diferente (excepto los muestreadores P-61, P-63 y P-72, que pueden usar la misma boquilla, al igual que D-49 y D74, que pueden intercambiar la boquilla), aunque la boquilla ajuste bien con el muestreador. Estas diferencias entre boquillas se deben a que la longitud de las líneas de flujo es diferente para agua y aire, lo cual causa divergencias en la resistencia al flujo, y a que el diferencial de presión entre la entrada a la boquilla y el aire del exhosto son disímiles. Por esta razón, cuando cualquier parte de un muestreador se daña, el instrumento debe enviarse a laboratorio para su reparación y recalibración total. Como ya se anotó, existen boquillas de 1/4", 3/16" y 1/8" de diámetro para muestreadores integrados de profundidad, excepto para DH-48, DH-75, D-77 y muestreadores integradores puntuales. El D-77 es el único que usa una boquilla de 5/16". Para evitar confusiones las boquillas vienen en

diferentes colores que deben coincidir con una marca de color en la cola del muestreador.

Los tamaños diferentes de las boquillas se deben a que las velocidades y profundidades de la corriente ocasionan un sobrellenado de la botella de muestreo para una tasa de tránsito específica cuando se usan las boquillas más grandes. Así, para muestreadores integradores en profundidad con una botella de pintura, las profundidades teóricas máximas de muestreo para un recorrido redondo de integración son de cerca de nueve pies para 1/4" y 15 pies para las boquillas de 3/16" y 1/8". Para reducir la cantidad de muestra que entra a la botella a profundidades mayores de nueve pies, se usa una boquilla de diámetro interior más

pequeño en conjunto con una botella de pintura. Para una situación dada, las boquillas más grandes deben ser usadas para reducir la posibilidad de excluir las partículas más grandes de arena que pueden estar en suspensión. Los posibles errores causados por el uso de boquillas demasiado pequeñas son generalmente menores para partículas finas (<0.062 mm), pero tienden a aumentar su importancia con el incremento en el tamaño de las partículas. Las boquillas pequeñas también son más adecuadas que las grandes para muestreo con material orgánico, sedimentos y partículas de hielo. Esto significa que los problemas con las boquillas pueden presentarse aún en corrientes con material fino dominante.

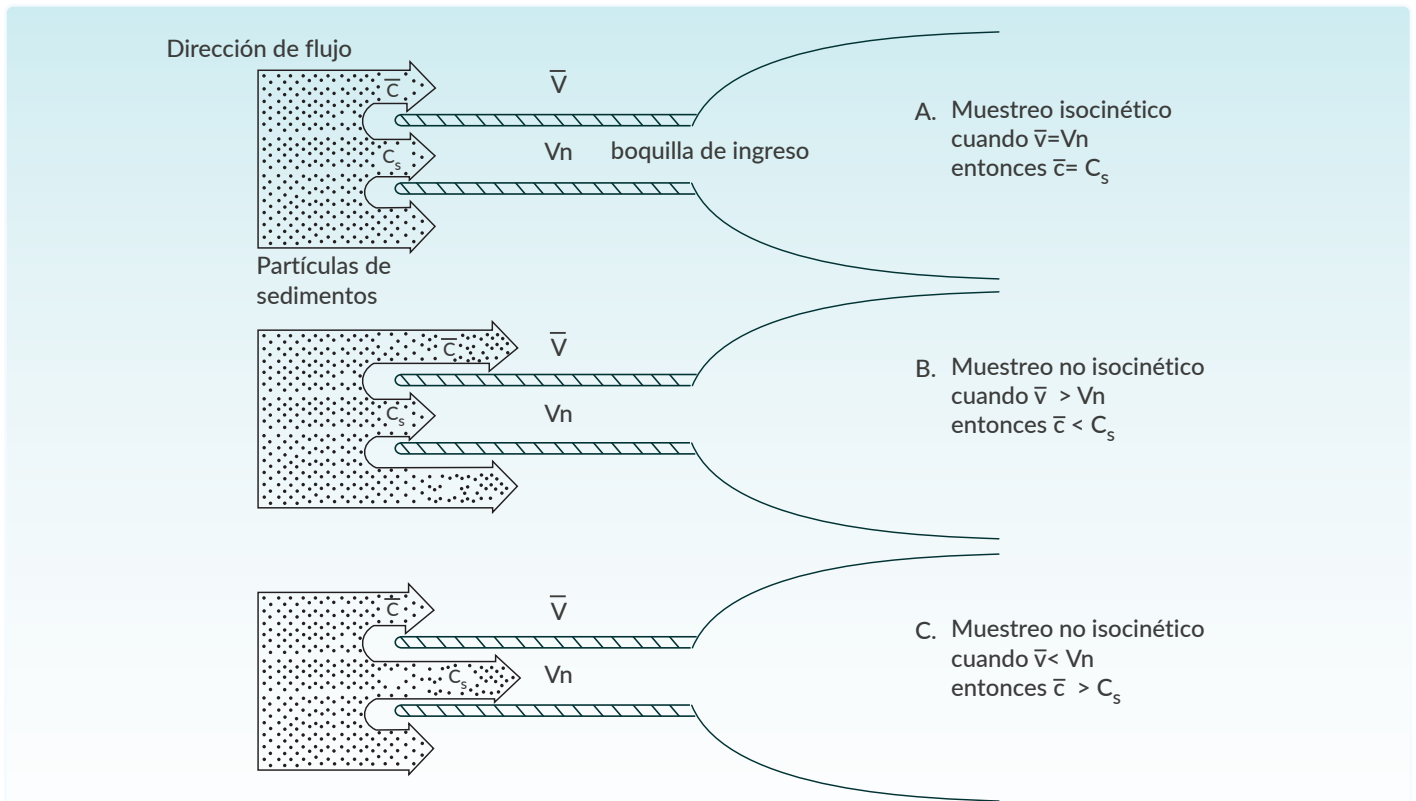


Figura 8-98. Relación entre la velocidad de ingreso y la concentración de la muestra para muestreo isocinético y no isocinético de partículas mayores de 0.062 mm. Con V = velocidad media de la corriente, V_n = velocidad en la boquilla del muestreador, C = concentración media de sedimentos en la corriente, y C_s = concentración de sedimentos en la muestra.
Fuente: (Edwards & Glysson, 1999).

Los muestreadores integradores puntuales son suministrados solo con una boquilla de 3/16" que hace juego con la abertura a través del mecanismo de válvula.

Cuando la velocidad de una corriente es muy alta (durante las crecidas, por ejemplo) y/o transporta escombros y troncos, que no permiten realizar un muestreo integrado puntual o en profundidad, se puede realizar un muestreo superficial o subsuperficial, que puede ser altamente representativo de la concentración media de sedimentos en suspensión, debido a que en tales condiciones todas las partículas, excepto las más grandes, están completamente mezcladas en el flujo. No obstante, estas concentraciones superficiales deben ser correlacionadas después con las concentraciones halladas con muestreos regulares integrados puntuales o en profundidad, en los cuales, para fines de comparación y ajustes posteriores, se debe contemplar también una muestra superficial. El muestreo superficial se puede tomar en o cerca de la superficie del agua, con o sin un muestreador estándar.

Si bien una muestra integrada en profundidad puede representar la concentración media de sedimentos en suspensión en una vertical para un caudal líquido dado, para conocer la concentración de sedimentos en toda la sección transversal es necesario realizar el **muestreo en un número determinado de verticales**. Para este efecto, el USGS (Edwards & Glysson, 1999) utiliza dos métodos: el primero basado en iguales incrementos del caudal de agua (EDI, por sus siglas en inglés *Equal Discharge Increment Method*), y el segundo basado en iguales incrementos de anchura de la corriente (*EWI*, por sus siglas en inglés *Equal Width Increment Method*).

Con el EDI las muestras se toman en los centroides de igual incremento de caudal (Figura 8-99), asumiendo que las muestras tomadas en estos puntos representan la concentración media de la subsección, y se requiere por tanto conocer previamente la distribución del flujo en la sección transversal, basado en un buen período de aforos. Si este conocimiento existe, este método es el más favorable en tiempo y costos, toda vez que requiere un menor número de verticales (Hubbellet et al., 1956 en Edwards y Glysson, 1999).

Cuando no se tiene este conocimiento se mide primero el caudal de la corriente y se determina la distribución del flujo a través de la sección transversal antes del muestreo. El método exige la determinación de los incrementos de igual caudal y los centroides en los que se deben tomar las muestras. Por ejemplo, si el caudal es de 4.7 m³/s y se ha determinado previamente que el número de verticales debe ser de cinco, el incremento igual de caudal es de $4.7/5 = 0.94$ m³/s. El primer vertical (A) se localiza en el centroide del EDI inicial o en el punto donde el caudal acumulado desde el extremo izquierdo del cauce (LEW) es 1/2 del EDI, o sea $0.94/2 = 0.47$ m³/s. Los restantes centroides se localizan agregando el incremento de caudal al caudal del anterior centroide. Por ejemplo, si $A = 0.47$ m³/s, $B = A + 0.94$ m³/s, $C = B + 0.94$ m³/s, etc. Por tanto, las muestras se toman en los puntos donde el caudal acumulado con respecto a LEW es 0.47 – 1.41 – 2.35 – 3.29 y 4.23 m³/s. El número de verticales puede variar entre 4 y 9 con el EDI. Para ubicar los centroides se parte del formato de campo del aforo líquido y, con base en la distribución de los caudales entre las diversas subsecciones, se agrega o genera una columna de caudal acumulado y sobre

esta se interpolan los caudales correspondientes a cada centroide para determinar el punto correspondiente en términos de distancia a partir del punto inicial de referencia del aforo. La localización final de las verticales puede ser del tipo mostrado en la Figura 8-100.

El método EWI requiere un volumen de muestra proporcional al caudal de cada uno de los espacios limitados por verticales equidistantes en la sección transversal. El muestreo a una rata de tránsito igual en todas las verticales produce un volumen total de muestra proporcional al flujo total de la corriente,

conservando una boquilla del mismo diámetro en todos los muestreos. Es un método usado principalmente en cauces pequeños y vadeables y/o con lecho arenoso, en donde la distribución del caudal en la sección transversal no es estable. También se usa en corrientes donde el flujo de un tributario no está aún suficientemente mezclado con el flujo de la corriente principal. El número de verticales depende de la distribución del caudal y de la concentración a través de la sección en el momento del muestreo, y de la precisión deseada.

Explicación

W: Anchura entre verticales (no iguales).
 Q: Descarga o gasto en cada incremento (iguales, EDI).

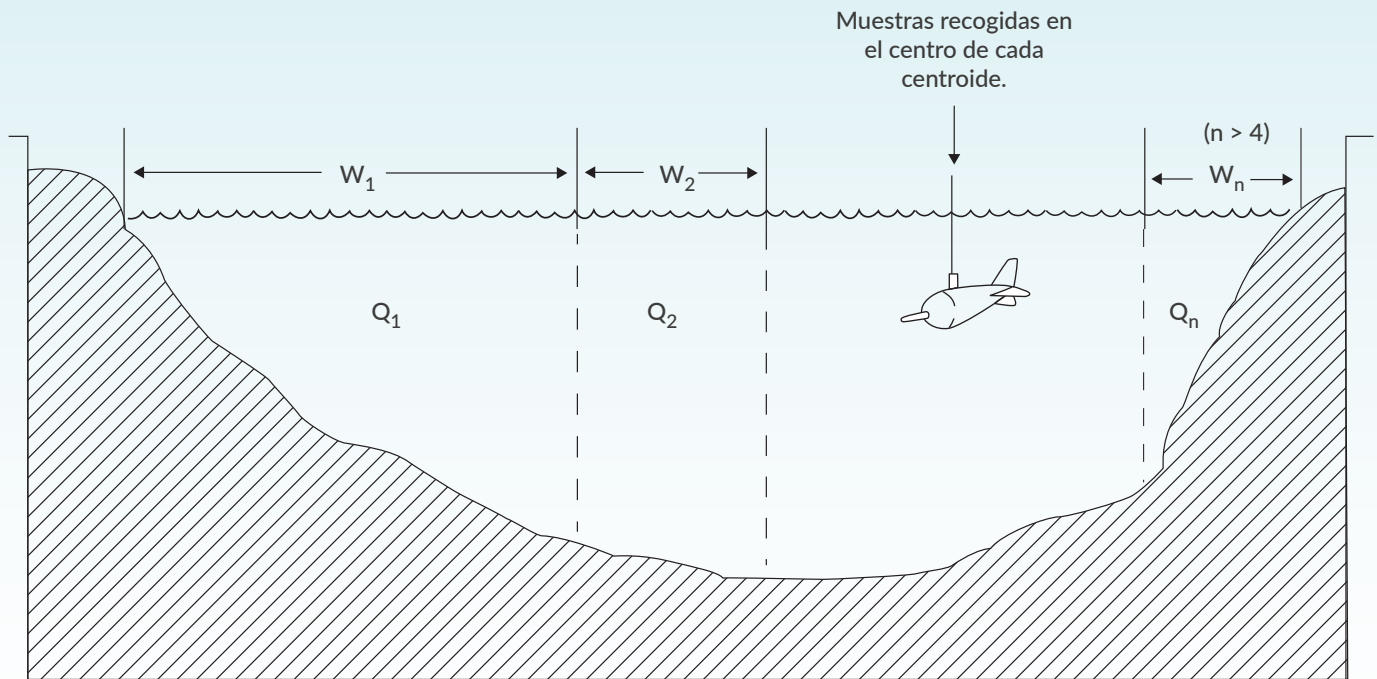
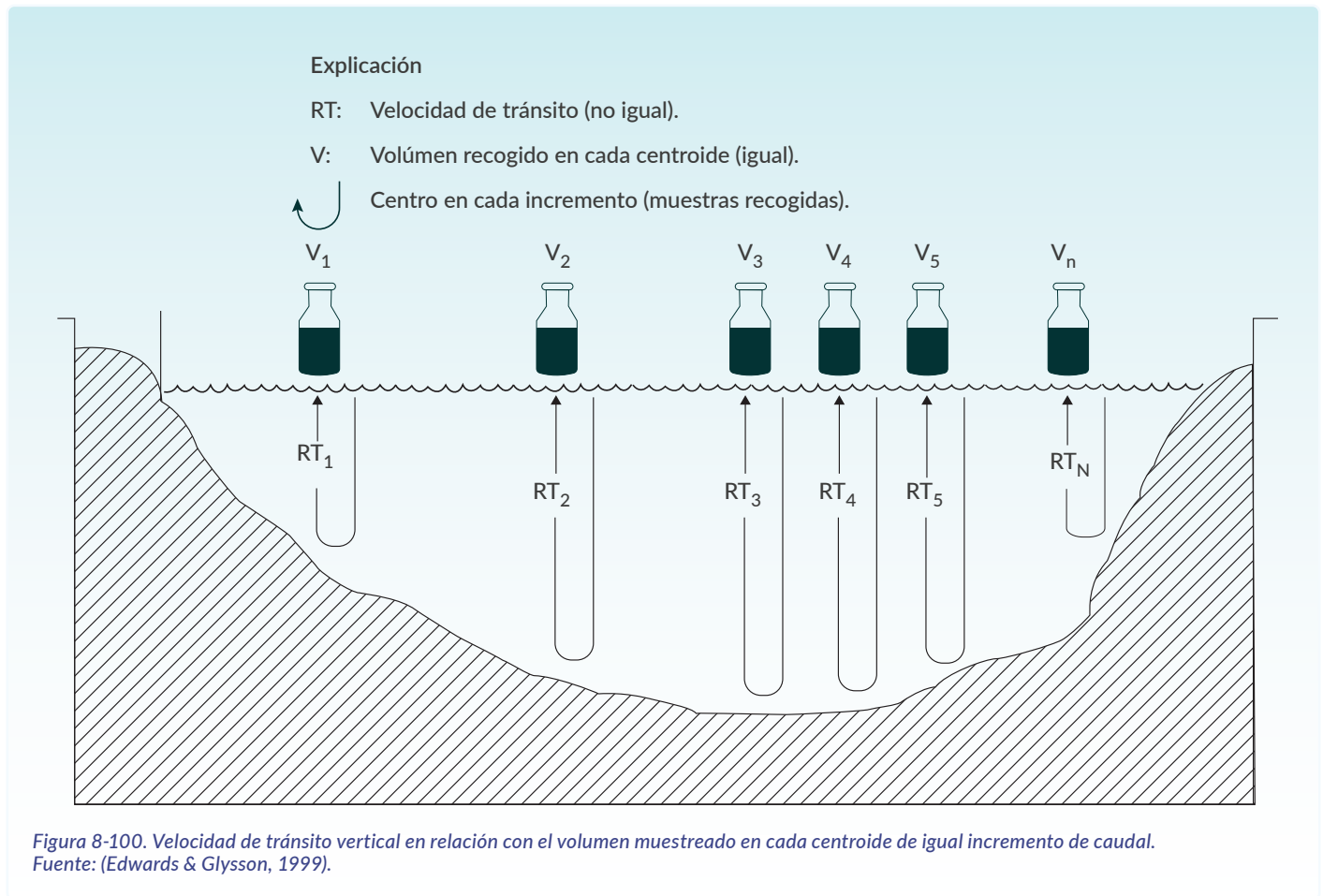


Figura 8-99. Método de muestreo de iguales incrementos de caudal (EDI): las muestras son tomadas en los centroides del flujo de cada incremento. Fuente: (Edwards & Glysson, 1999).



Cuando no se conoce bien esta distribución, el número de verticales debe ser tan alto como sea necesario, aunque se recomienda siempre que el número de verticales no sea menor de 10 en corrientes de más de 1.5 m de ancho. Para corrientes menores, el espaciamiento entre verticales no debiera ser menor de 7.6 cm (tres pulgadas), (Edwards & Glysson, 1999). No obstante, la experiencia y conocimiento del cauce y de cauces similares debe permitir el nivel de precisión deseado, si bien, para todos los propósitos el número de verticales no debiera ser mayor a 20.

La distancia entre las verticales se obtiene de dividir el ancho total del cauce por el número de verticales

necesarias. El sitio de muestra entre dos verticales se ubica a la mitad de la distancia entre las mismas ($w/2$), empezando por el punto medio más próximo a la orilla de inicio en la medición del ancho total. Por ejemplo, si al ancho del cauce es de 40 m y el número de verticales es de 10, la distancia entre verticales debe ser de 4 m y la localización de los puntos de muestreo sería de 2-6-10-14-18-22-26-30-34 y 38 m a partir de la orilla (si el ancho resulta fraccionario, se puede aproximar al número entero más próximo). La tasa de tránsito se debe establecer para la vertical más profunda y rápida de la sección y debe ser la misma para el ascenso y descenso del muestreador

en todas las verticales. Usando esta misma tasa con un muestreador integrador puntual o en profundidad en cada vertical, se obtiene un volumen de muestra proporcional al caudal en cada vertical, como se observa en la Figura 8-101 y Figura 8-102.

La máxima tasa de tránsito no debe exceder $0.4 v_m$, siendo v_m la velocidad media ambiente en la vertical muestreada, y la mínima debe ser lo suficientemente rápida para evitar el sobrellenado de la botella, por lo cual la tasa de tránsito común está condicionada por la vertical que contiene el mayor

caudal por unidad de ancho, para cuya determinación se debe realizar un aforo líquido, aunque se puede aproximar mediante un sondeo para conocer la profundidad y observar la velocidad relativa con un muestreador vacío o una varilla de vadeo. Esta tasa puede probarse llenando una botella hasta el máximo volumen de muestreo en la vertical de máximo caudal en un viaje redondo superficie-fondo. Otros aspectos para tener en cuenta en este tipo de muestreo pueden consultarse en el documento ya mencionado de Edwards y Glysson, (1999).

Explicación

- W: Ancho entre verticales (igual, EWI).
- Q: Descarga en cada incremento (no es igual).

Muestras recogidas en el centro de cada incremento

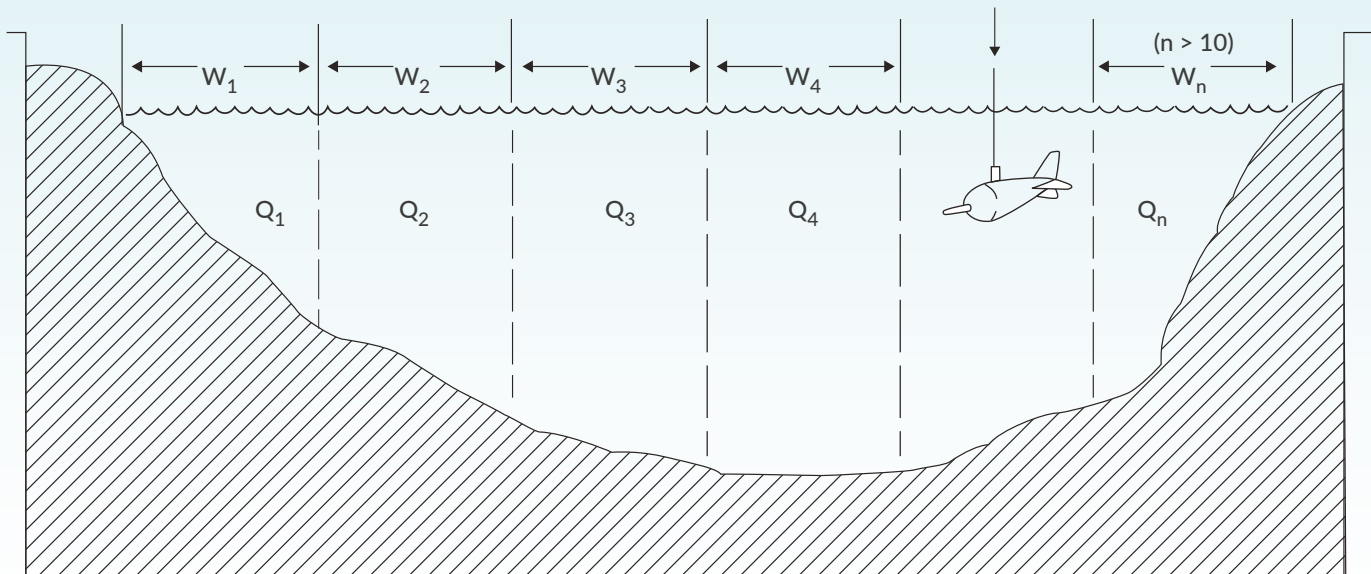
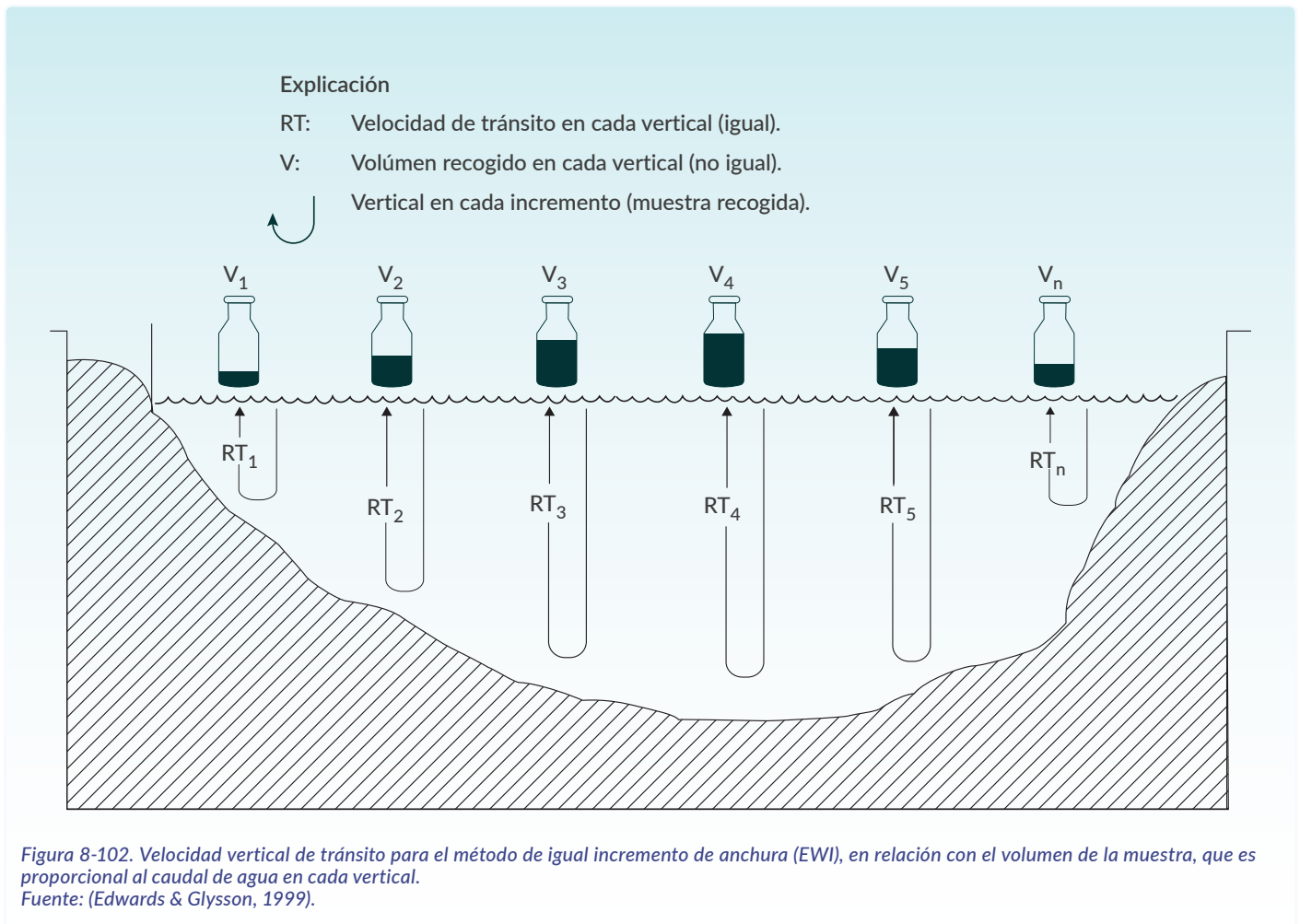


Figura 8-101. Método de igual incremento de anchura (EWI). Fuente: (Edwards & Glysson, 1999).



Como ya se anotó, el número de verticales necesarias para conocer la distribución de los sedimentos a través de la sección transversal de un río depende de la precisión deseada y de la variación sistemática de la concentración en diferentes verticales a través de la sección.

Los muestreadores de sedimentos en suspensión están diseñados para acumular una muestra que es directamente proporcional al caudal o velocidad de la corriente. Esta muestra acumulada puede ser a lo largo de una vertical entre la superficie y el fondo de

la corriente o a lo largo de un conjunto de verticales distribuidas a lo ancho de la sección transversal. Esta sección puede ser considerada representativa de algunos elementos del flujo a través de la sección, ya sea unos pocos pies cuadrados adyacentes al punto de muestreo, unos pocos pies cuadrados adyacentes a ambos lados de la vertical, o el área de todo el flujo sumado entre todas las líneas verticales. Por tanto, el número de verticales de muestreo debe ser adecuado para representar la sección transversal a muestrear. El número de botellas de muestras por tomar depende

del tipo de análisis para realizar en el laboratorio, y la localización de las verticales de muestreo depende de la concentración y de la distribución de tamaños del sedimento que se mueve a través de la sección transversal.

Tanto el método EDI como el EWI se basan en una muestra de caudal ponderado en cada vertical. La suma volumétrica de todas las verticales da un volumen de muestra proporcional al caudal de la corriente. Todas o casi todas las variaciones de concentración en diferentes verticales a través de la sección pueden ser el resultado de una distribución no uniforme del material arenoso y los sedimentos más finos son en

general más uniformemente distribuidos a través de la sección.

Si la sección es cercana a un tributario, la mezcla del caudal de la corriente principal y del tributario puede no ser completa. De ahí que la localización de secciones de muestreo aguas debajo de la confluencia de un tributario debe evitarse. (Colby, 1964 en Edwards y Glysson, 1999) demostró que la descarga de arena es casi proporcional al cubo de la velocidad media, a temperatura constante y una distribución dada de tamaños de partículas para un rango de velocidades entre 0.6 y 1.5 m/s y dentro de un rango razonable de profundidades (Ecuación 8-44):

$$Q_s = k_1 v^3$$

Ecuación 8-44

Donde,

Q_s : Descarga de arena por unidad de ancho.

k_1 : Constante para una profundidad dada, tamaño de partícula y temperatura.

v : Velocidad media.

Y la descarga de arena puede expresarse como la Ecuación 8-45:

$$Q_s = k_2 c v d$$

Ecuación 8-45

Donde,

k_2 : Constante.

c : Concentración ponderada con el caudal en la vertical muestreada.

d : Profundidad total muestreada.

Resolviendo para c , se obtiene (Ecuación 8-46):

$$C = \left(\frac{k_1}{k_2} \right) \left(\frac{v^2}{d} \right)$$

Ecuación 8-46

De esta manera, la variabilidad de la concentración en diferentes verticales de muestreo puede estar estrechamente relacionada con la variabilidad de v^2/d . Con el fin de tener un índice v^2/d útil para comparación entre corrientes, se sugiere utilizar la razón compuesta $(v^2/d(\text{máx.}) / (v^2/d))$, donde $v^2/d(\text{máx.})$ es la razón de la vertical con máximo valor de v^2/d , y v^2/d es la razón de la velocidad media al cuadrado y la profundidad media de la sección transversal com-

pleta. La velocidad media y la profundidad media son estimadas a partir de los aforos líquidos.

Con base en el concepto del índice de variabilidad v^2/d , usando datos de (Edwards & Glysson, 1999), (Hubbell et al., 1956), P. R. Jordan preparó el nomograma de la Figura 8-103 que muestra el número de verticales de muestreo requeridas para un error relativo estándar máximo aceptable (error de muestreo), basado en el porcentaje de arena y el índice v^2/d .

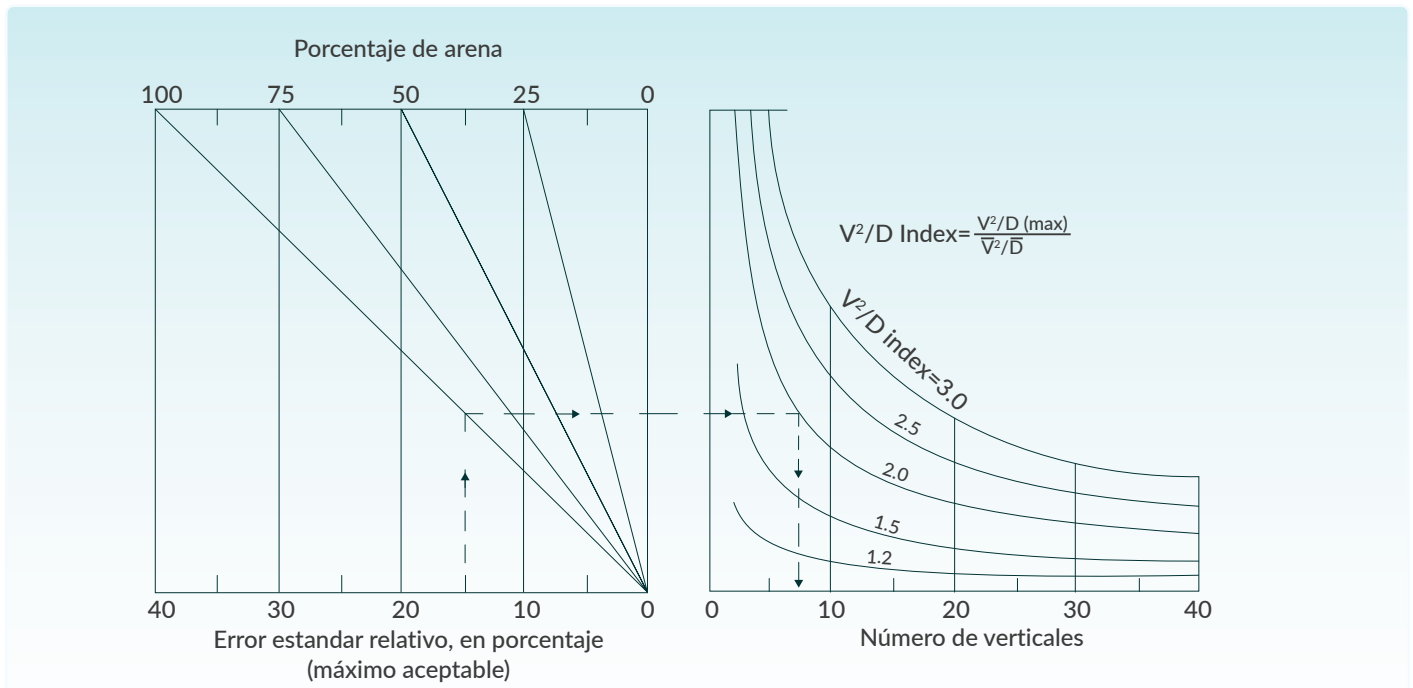


Figura 8-103. Nomograma para determinar el número de verticales de muestreo requeridas para obtener resultados dentro de un error relativo estándar aceptable. Fuente: (Edwards & Glysson, 1999).

En el ejemplo ilustrado en la Figura 8-103, el error estándar relativo aceptable es 15 %, la muestra tiene aprox. 100 % de arena, el índice v^2/d es 2.0 y el número requerido de verticales es siete. Nótese que, si el sedimento fuera 50 % de arena, se puede obtener el mismo resultado con tres verticales; o, si se usaran siete verticales con 50 % de arena, el error estándar relativo sería de 8 %. Cuando el transporte de partículas de arena es de interés primordial, la línea del 100 % puede usarse sin importar la cantidad de finos en la muestra.

- **Aforo integrado con bolsa plegable**

El montaje y uso de los equipos depende de los muestreos por realizar, es decir, si se requieren tomar muestras integradas se usa el muestreador y el escandallo; si adicionalmente se desea medir la velocidad de la corriente, se adiciona el correntómetro. El orden de colocación de los mismos depende de los medios y facilidades del sitio de trabajo, aunque se recomienda instalar de arriba hacia abajo, el muestreador, el correntómetro y el escandallo o como se facilite siempre y cuando el escandallo esté por debajo (Figura 8-104).

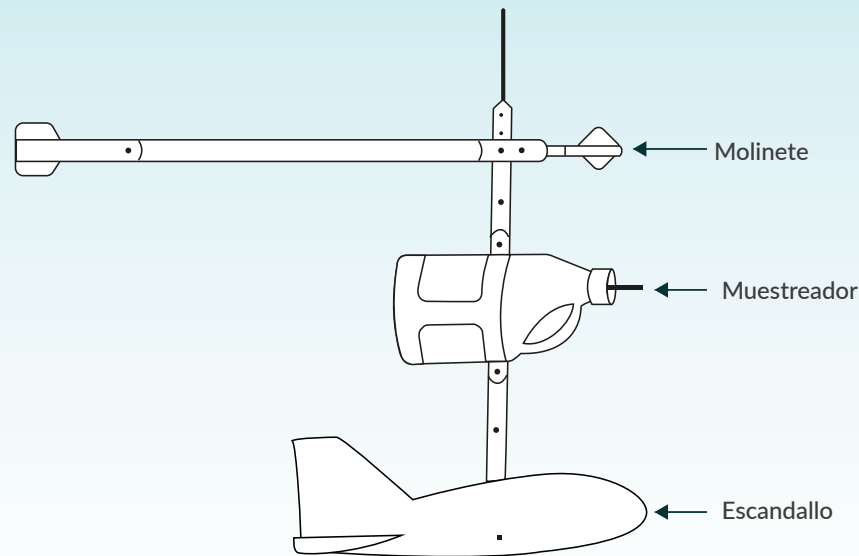


Figura 8-104. Disposición del muestreador.
Fuente: (IDEAM, 2007).

Definido el orden de colocación de los equipos, se introduce la bolsa dentro de la botella dejando 5 cm, los cuales se doblan sobre la boca del recipiente procurando que los pliegues queden uniformemente distribuidos al enroscar la tapa con la boquilla. A con-

tinuación, se coloca la botella dentro de la canastilla y se asegura con una cuerda, dando una vuelta completa alrededor del cuello. La Figura 8-105 describe el procedimiento para realizar el aforo integrado con bolsa plegable. En aforos con bolsa plegable, es necesario

determinar la tasa de tránsito y la calibración en campo. La metodología para el cálculo de estos parámetros, así como para la calibración y la determinación de la eficiencia de muestreo, pueden consultarse en el protocolo para el seguimiento y monitoreo del agua (IDEAM, 2007).

Si la eficiencia hidráulica está por debajo de 0.90, es necesario verificar si la boquilla tiene protuberancias o irregularidades a la entrada, ya que debe ser hidrodinámica y el orificio perfectamente uniforme. La calibración de campo debe mostrar una eficiencia promedio de 0.95 para velocidades entre 1 y 3 m/s.

Para manejar el problema de las numerosas botellas que se deben a llevar a campo y regresarlas al

laboratorio, se debe disponer por lo menos de los siguientes elementos y con el procedimiento descrito en la Figura 8-106:

- Dos baldes graduados con tapa para mezclar las muestras.
- Dos probetas graduadas de 500 o 1.000 ml.
- Dos frascos con atomizador.
- Dos embudos de 20 cm de diámetro superior para colocar el tamiz.
- Doce microtamices de 3" de diámetro con malla de 0.063 mm (63 micras) con base y tapa.
- Botellas plásticas de 100 y 500 ml para muestras y rótulos para identificar las muestras. Cada muestra se debe analizar por separado.

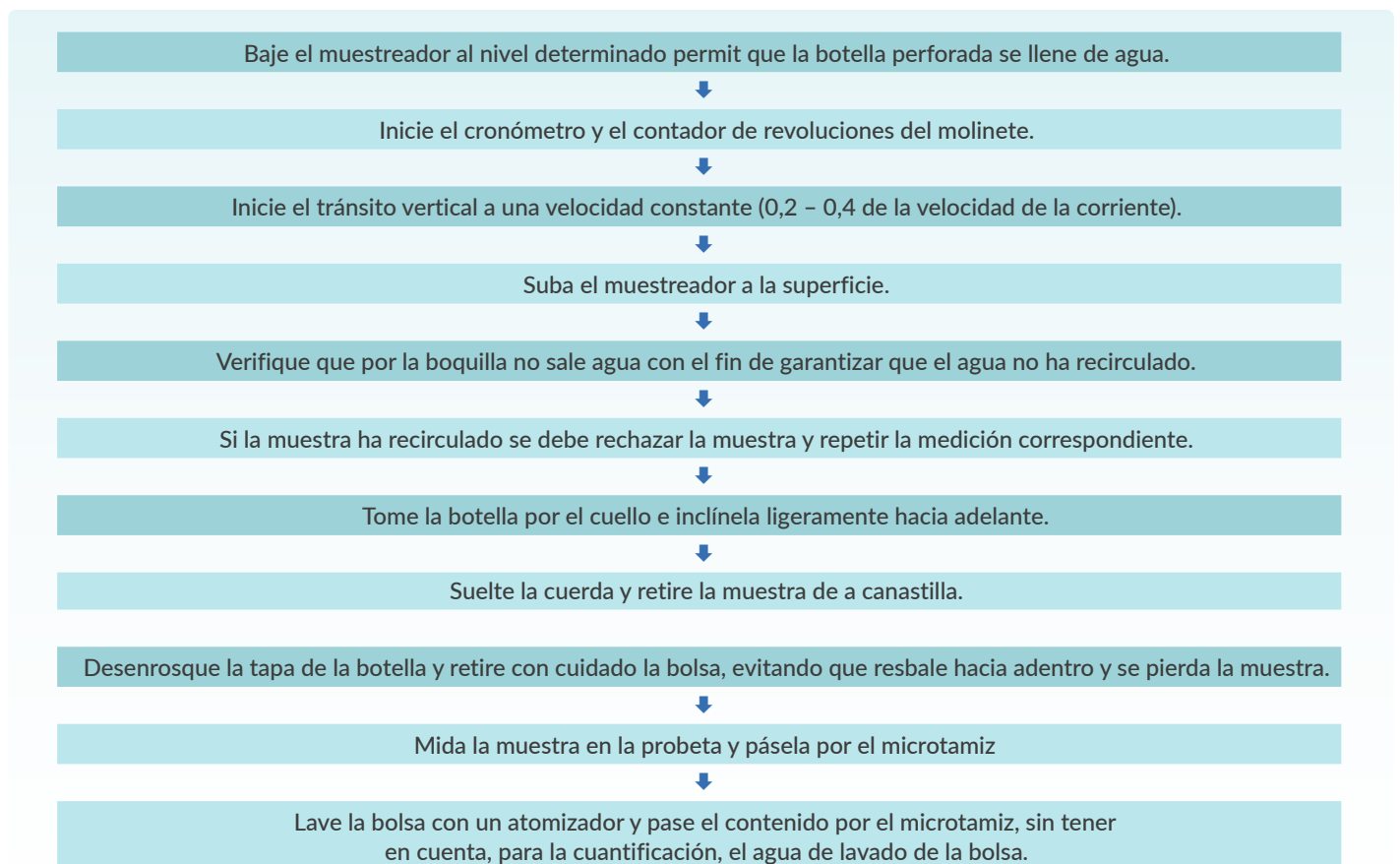


Figura 8-105. Procedimiento para realizar el aforo sólido integrado con bolsa plegable.

Cabe resaltar que tanto la bolsa plástica como los tamices deben ser lavados muy bien antes de su uso para la siguiente práctica. Las partículas que quedan adheridas deben ser lavadas con agua, me-

diante un atomizador. El contenido debe filtrarse nuevamente y el líquido obtenido se desecha ya que no hace parte del volumen aforado, mientras que el sedimento sí.



Figura 8-106. Procedimiento para procesamiento de muestra de bolsa plegable en el sitio.

8.1.4.8 Procedimiento para medir arrastre de fondo

El caudal de arrastre de fondo se determina a partir de la cantidad de sedimentos retenidos por unidad de tiempo en un muestreador colocado en uno o varios puntos del fondo del río.

Generalmente, se ponen de tres a diez puntos de medición en una sección transversal. En la determinación de la distribución de los puntos de muestreo se deben señalar las siguientes incertidumbres:

- Excepto durante las crecidas, el transporte del material de fondo se produce solamente en una parte

del río, por lo cual la inclusión de una medición cero en el cálculo del caudal de material de fondo, puede conducir a incertidumbres en el resultado, aun cuando el punto de muestreo pueda estar situado entre dos fajas móviles en el fondo del río. Las incertidumbres se pueden producir también si el transporte medido se extiende a un segmento de la sección transversal donde el sedimento se desplaza poco o nada.

- En ríos con lecho de grava, cuya mayor característica es el movimiento parcial del material del lecho, el uso de diferentes tipos de detectores acústicos puede ayudar a resolver este problema. Dichos detectores, sumergidos en las cercanías del lecho, captan el sonido del golpeteo de la grava en movimiento e indican el desplazamiento del material del lecho en ese punto particular; además, se puede relacionar cualitativamente la intensidad del sonido y el transporte del sedimento.
- Los muestreadores se bajan hasta el fondo y se mantienen en posición mediante una varilla o un alambre. La duración del período de muestreo es generalmente de pocos minutos, según las dimensiones del muestreador y la intensidad del transporte de sedimento. Para velocidades bajas de la corriente cerca del fondo, las fuerzas hacia aguas abajo son reducidas y el muestreador tiende a introducirse dentro de la corriente de fondo y excavar el material del fondo que no está siendo transportado. Esto también puede ocurrir durante un ascenso abrupto o no cauteloso del muestreador.
- Las mediciones se deben realizar en varios caudales del río para obtener una relación entre el caudal del río y el caudal del material del fondo. Debido a que el transporte del sedimento es un mecanismo muy complejo de naturaleza aleatoria y a los errores al tomar las muestras, una única muestra tomada en

un punto de medición puede proporcionar una estimación muy incierta del verdadero transporte del material del fondo.

- Por lo tanto, en cada punto se deben tomar varias muestras. El número de repeticiones depende de las circunstancias locales; sin embargo, análisis estadísticos realizados sobre datos del terreno con más de 100 repeticiones, demuestran que el caudal de arrastre de fondo solo puede medirse con una exactitud limitada, salvo que se tomen un número impracticable de muestras en cada punto.

8.1.4.9 Procedimientos de laboratorio

La Figura 8-107 muestra un flujograma general de los procedimientos de laboratorio destinados a determinar la concentración y transporte de sedimentos, teniendo en cuenta los métodos de aforo y/o muestreo empleados, a saber: aforo sólido puntual o integrado, muestreo diario superficial, muestreo en bolsa plegable y muestras de fondo.

En estos procesos es necesario tener en cuenta que la *tara* se refiere al peso del instrumento sin la muestra, mientras el *peso bruto* se refiere al peso del instrumento más la muestra.

La Figura 8-108 muestra los detalles de laboratorio de los procedimientos de medida del volumen y tarado de crisoles, filtración, evaporación, calcinación y pesado de la muestra y granulometría. Las figuras (Figura 8-109, Figura 8-110, Figura 8-111 y Figura 8-112) muestran algunos detalles de estos procedimientos.

Una vez terminada la calcinación, se toman todas las muestras de los crisoles correspondientes a un aforo, a excepción de las tres muestras superficiales, se recogen en un vaso de precipitados y se pesan. Si el peso es mayor a 0.5 g, se procede a efectuar el análisis granulométrico.



Embalse del Guavio - Cundinamarca
■ Germán Merchán

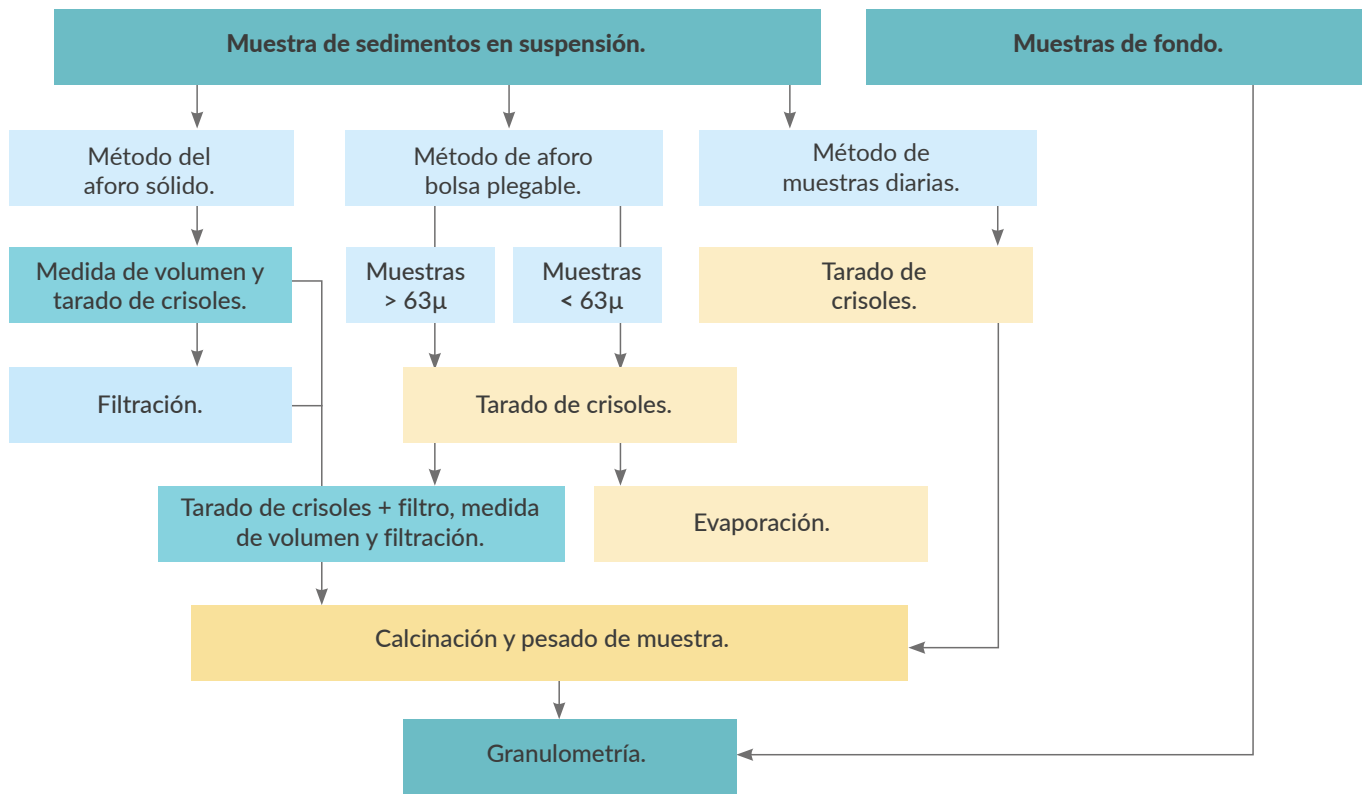


Figura 8-107. Proceso general de laboratorio de sedimentos.
Fuente: (IDEAM, 2009).



Caño Platana, Cesar-ANLA
Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM

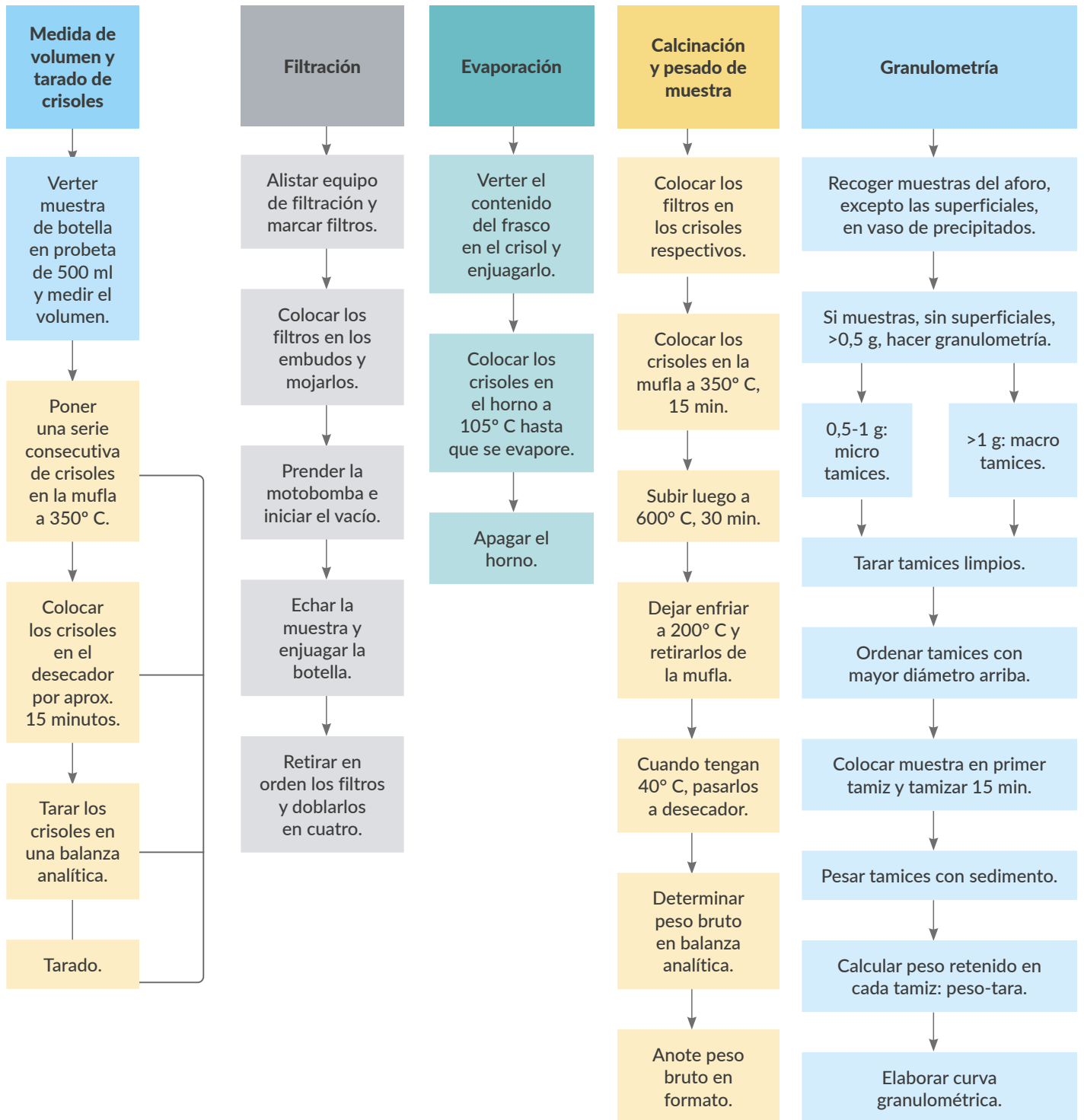


Figura 8-108. Detalles de los procesos de medida de volumen y tarado de crisoles, filtración, evaporación, calcinación y pesado de la muestra y granulometría. Fuente: (IDEAM, 2009).

Los procedimientos de laboratorio también se encuentran detallados en el protocolo de calidad del agua.

No obstante, de acuerdo con el desarrollo tecnológico y las disponibilidades presupuestales, es posible utilizar nuevos y más eficientes procedimientos; se recomienda, mediante pruebas interlaboratorios, ver capítulo 8.2 *Monitoreo de calidad*, comprobar la validez de los mismos. Los equipos e insumos básicos por emplear en un laboratorio de sedimentos son:

- Bomba de vacío.
- Embudos de fondo plano.
- Matraz.
- Probeta y pipeta graduadas.
- Horno de madera.
- Filtros.
- Atomizador.
- Sitio para almacenar botellas.
- Vaso de precipitados.
- Mufla.
- Balanza analítica.
- Desecador.
- Crisoles.
- Bandeja para crisoles.
- Equipo de seguridad (máscara, guantes, equipo contra incendio, etc.).
- Pinzas.
- Tamices (juego de micro y macro tamices).
- Tamizadora.



Figura 8-109. Aspectos del procedimiento de filtración. A: Vertido del contenido de las probetas en los embudos con bomba de vacío prendida. B, C: Revisión de que no haya quedado sedimento en embudo, botella y probeta. D, E: Retiro, doblado y almacenamiento de filtros en horno de madera. Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM.



Figura 8-110. Aspectos del procedimiento de calcinación. A: Numeración de los crisoles en base y al lado con cloruro férrico. B: Orden de filtros y crisoles C: Cargue de filtros en crisoles y bandejas. D: Cargue de crisoles en mufla por 30 min. E: Enfriamiento a 200 °C y retiro de crisoles. F: Enfriamiento a temperatura ambiente en desecador, antes del pesaje.
Fuente: (IDEAM, 2009).



Figura 8-111. Aspectos del procedimiento para la granulometría del material de fondo. A: Pesaje de las muestras del aforo. B: Si el pesaje es >0.5 g se pasan al análisis granulométrico. C: Colocación de la muestra en el primer tamiz y agitación de 15 min.
Fuente: (IDEAM, 2009).



Figura 8-112. Aspectos del procedimiento para la granulometría del material en suspensión. A: Cuarteo de la muestra seca y toma de dos diagonales para la determinación. B: Paso de la muestra por los tamices 6.350 y 4.760 micras. C: Paso a microtamices y a la tamizadora por 15 min. Fuente: (IDEAM, 2009).

8.1.4.10 Registro y procesamiento de datos

La captura o registro de los datos en campo se debe hacer en los formatos de campo normalizados por la entidad. En principio, es necesario disponer de formatos para el registro de los siguientes datos:

Muestras diarias de sedimentos

En el campo se deben anotar los siguientes datos generales (Anexo 8-7):

- ♦ Identificación y localización de la estación.
- ♦ Corriente.
- ♦ Mes.
- ♦ Año.

Además, para cada muestra se debe anotar:

- ♦ Día.
- ♦ Hora.
- ♦ Lectura de mira.
- ♦ Distancia desde punto de referencia PR.
- ♦ Número de muestra o filtro.
- ♦ Volumen filtrado.

Aforo de sedimentos en suspensión

En campo se debe anotar como mínimo los siguientes datos generales (Anexo 8-10):

- ♦ Identificación y localización de la estación.

- ♦ Corriente.
- ♦ Mes.
- ♦ Año.
- ♦ Método de aforo.
- ♦ Muestreador empleado.
- ♦ Nivel inicial.
- ♦ Nivel final.
- ♦ Nivel promedio.
- ♦ Caudal líquido (según aforo líquido).

Además, para cada muestra se debe anotar:

- ♦ Distancia al punto de referencia.
- ♦ Profundidad total.
- ♦ Profundidad puntual (en caso de aforos puntuales).
- ♦ Velocidad del agua.
- ♦ Número de muestra o filtro.
- ♦ Volumen de la muestra (o del filtrado, si este se hace en campo).

Para la captura y procesamiento de la información de sedimentos, se debe adoptar un programa o software especializado, que permita grabar interactivamente por pantalla:

- Los datos de identificación de la estación, mes y año por procesar.

- La información de muestras diarias de sedimentos previamente depurada en los formatos de campo normalizados.
- La información de los aforos sólidos.
 - ♦ Consiste en el registro en un archivo de computador de la cartera de campo de los aforos sólidos realizados en las estaciones hidrométricas. Los datos deben quedar almacenados en un directorio, identificados por el código de la estación y la fecha del aforo.
 - ♦ La validación de los datos debe conllevar como mínimo para cada aforo que el código sea de una estación hidrológica, que la estación se encuentre en el catálogo y que la fecha del aforo sea la correcta.
 - ♦ El programa debe estar en capacidad de generar un listado de mensajes de error que llevan a corregir o invalidar el aforo.
- La información del laboratorio.
 - ♦ Concentraciones de sedimentos en suspensión, por punto y/o vertical, según el método de aforo.
- El sistema debe permitir la captura inicial de las curvas de sedimentos para cada estación y para una vigencia. Estas se pueden ingresar y almacenar de dos maneras:
 - ♦ En forma tabulada: de los puntos de la curva de sedimentos (relación entre Q_s y Q_l) se extraen los puntos de la curva en forma de tabla, de tal manera que se puedan interpolar los puntos intermedios, lineal o exponencialmente, para la estimación de caudal sólido sin errores importantes.
 - ♦ En forma funcional, es decir: I) como ecuación teórica (o modificada) para una estructura de aforo, II) como función ajustada por computador a los puntos aforados, en vez del proceso manual

de ajuste de curvas, y III) como función ajustada a los puntos de una tabla.

- Posibilidad de corregir los datos grabados, utilizando para el efecto un editor de texto.

Los datos se deben grabar en las casillas respectivas con sus características y sus correspondientes símbolos, de acuerdo con las instrucciones de los formatos.

El flujograma de la Figura 8-115 muestra el procedimiento general del procesamiento de datos. El programa debe estar en capacidad de realizar los cálculos de los capítulos 8.1.4.11 *Cálculos del aforo sólido*, 8.1.4.12 *Caudales sólidos*, 8.1.4.13 *Transporte de fondo y transporte total*, para determinar la concentración y el transporte o caudal sólido del curso de agua.

8.1.4.11 Cálculos del aforo sólido

Para determinar la concentración de sedimentos, se toman muestras superficiales como se indicó en la sección 8.1.4.6 *Muestreo diario de sedimentos en suspensión*, en botellas plásticas especiales de 500 ml, para luego tomar los volúmenes de muestra y registrarlos en formatos adecuados en el sitio de muestreo. Los procedimientos en laboratorio son los indicados en las figuras (Figura 8-107, Figura 8-108).

De otro lado, el sistema debe estar en capacidad de efectuar el procesamiento de las carteras de campo grabadas, y de mostrar por pantalla todos los archivos disponibles para procesamiento. Al terminar el proceso, el programa automáticamente debe estar en capacidad de actualizar el archivo de resúmenes de aforos sólidos y crear un archivo de resultados en un directorio con el mismo nombre del archivo de cartera. Además, debe permitir la actualización interactiva de los resúmenes de aforos que no son generados por los procesos en línea. Como resultado, el programa debe

arrojar un listado de errores que permiten corregir el aforo o invalidarlo.

Cuando se han realizado suficientes aforos sólidos para representar la gama de variación de los caudales líquidos y/o niveles de una corriente, es posible definir *la curva de calibración de sedimentos de una estación*.

Curva de calibración de sedimentos de una estación

Esta curva en una estación hidrométrica es la expresión gráfica de la relación existente entre los caudales líquidos Q_l y los caudales sólidos aforados Q_s , generalmente en régimen permanente. La vigencia de la curva de calibración entre Q_s y Q_l estará condicionada por el tiempo en que se mantengan uniformes las condiciones geométricas de la sección.

La curva es casi parabólica, cuando su representación está en coordenadas lineales y con tendencia a recta cuando las coordenadas son logarítmicas. Los aforos sólidos que se utilizan para elaborar las curvas de calibración deben tener previamente un control de calidad descrito en capítulo 8.2 *Monitoreo de calidad*.

En las estaciones donde se hagan muestreos diarios superficiales (tres muestras diarias), se puede elaborar también la curva de calibración de concentraciones medias (resultantes de los aforos sólidos) entre concentraciones superficiales, a partir de la cual se calcula la concentración media diaria que permita la estimación de los caudales sólidos medios diarios.

El sistema debe permitir la actualización de las curvas de gastos para cada estación y para una vigencia, mediante la carga de los nuevos aforos y/o nuevos datos de concentraciones superficiales.

Datos de transporte y concentración de los sedimentos en suspensión

Para obtener los datos se procede de la siguiente manera:

- Primero se realiza el aforo o medición de caudal sólido, como quedó explicado anteriormente.
- En segundo lugar, se envían las muestras al laboratorio y se determinan las concentraciones de sedimentos en suspensión, sección 8.1.4.10 *Registro y procesamiento de datos*.
- De acuerdo con las frecuencias especificadas en la sección 8.1.4.2 *Frecuencia de monitoreo de sedimentos*. Los datos resultantes se organizan en el *formato de resumen de mediciones detalladas de materiales en suspensión* (Anexo 8-8).
- En tercer lugar, se debe disponer de la estadística de caudales líquidos medios diarios, de acuerdo con lo establecido en el protocolo de 8.1.1 *Niveles* y 8.1.2 *Caudales*.
- En cuarto lugar, se elabora(n) la(s) curva(s) de calibración de sedimentos o ecuaciones que establecen la relación entre caudal sólido Q_s y caudal líquido Q_l , y de la concentración media (C_m) en función de la concentración superficial (C_s), para los casos en que el observador tome diariamente muestras superficiales.
- Si la estación ya cuenta con estas curvas, el procedimiento se limita a plotear los resultados de los aforos sólidos sobre dichas curvas y analizar la dispersión o consistencia de los datos.

Curvas de calibración

Los pasos para elaborar las curvas de calibración son los siguientes:

- A partir del resumen de muestras diarias de sedimentos, se calcula la concentración media

superficial diaria como el promedio de las tres muestras (en caso de que se tomen tres muestras). En esta etapa el sistema puede tener un control de calidad que consiste en no permitir el ingreso de datos de muestras en donde el valor de la tara (peso del crisol) sea mayor que el peso total (peso del crisol + peso del sedimento), (ver sección 8.1.4.9 *Procedimientos de laboratorio y Formato de medición detallada de sedimentos en suspensión* Anexo 8-9).

b. Se toman los datos de caudal líquido y caudal sólido del resumen de aforos y se plotean en papel doble logarítmico, eliminando puntos muy dispersos de la tendencia central. Se debe tomar nota que los aforos sólidos y líquidos cubran estados altos, medios y mínimos de la corriente. Las ecuaciones de las curvas resultantes de la relación entre Q_s y Q_l , y C_m frente a C_s se pueden ajustar mediante mínimos cuadrados u otros métodos similares (ver ejemplo de curvas en figuras, Figura 8-113 y Figura 8-114).

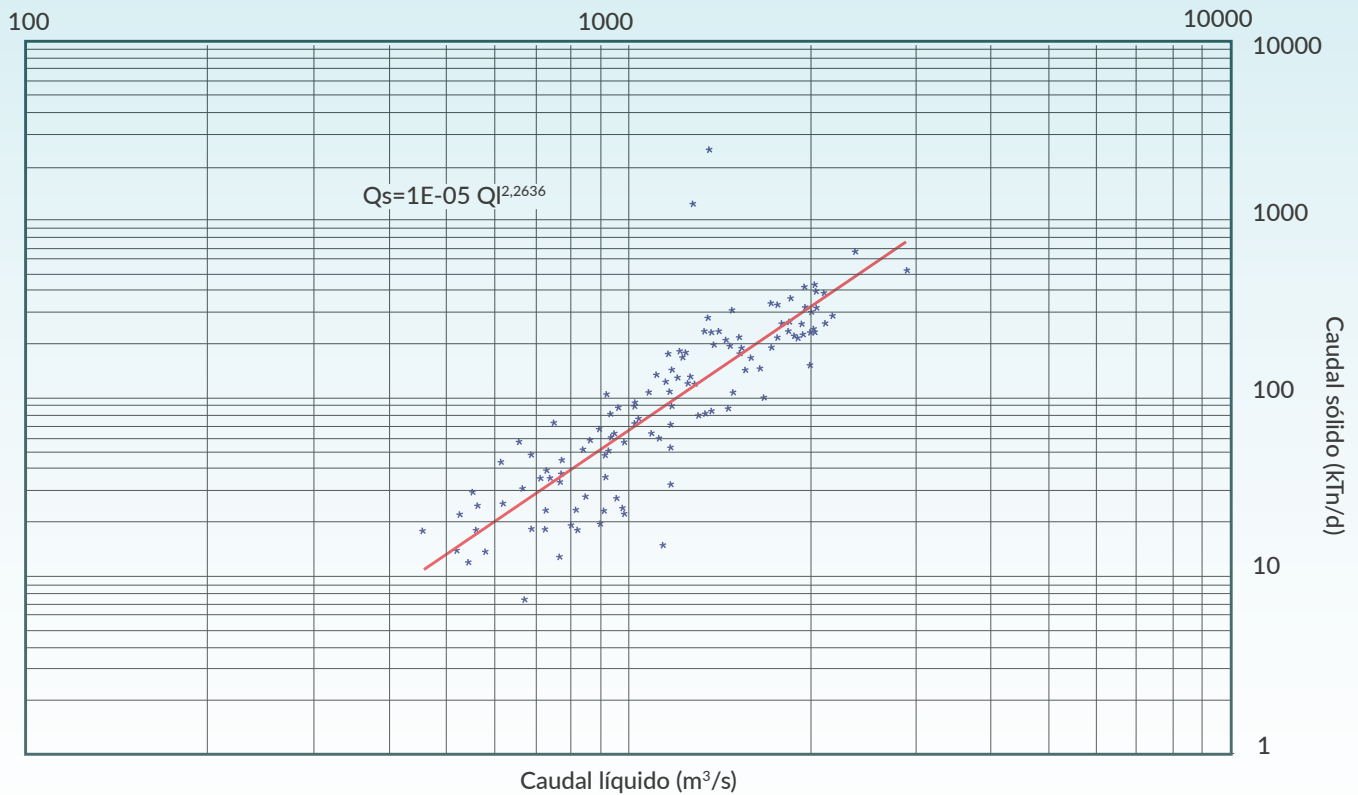


Figura 8-113. Ejemplo de la curva que relaciona el caudal sólido con el caudal líquido.
Fuente: (IDEAM, 2007).

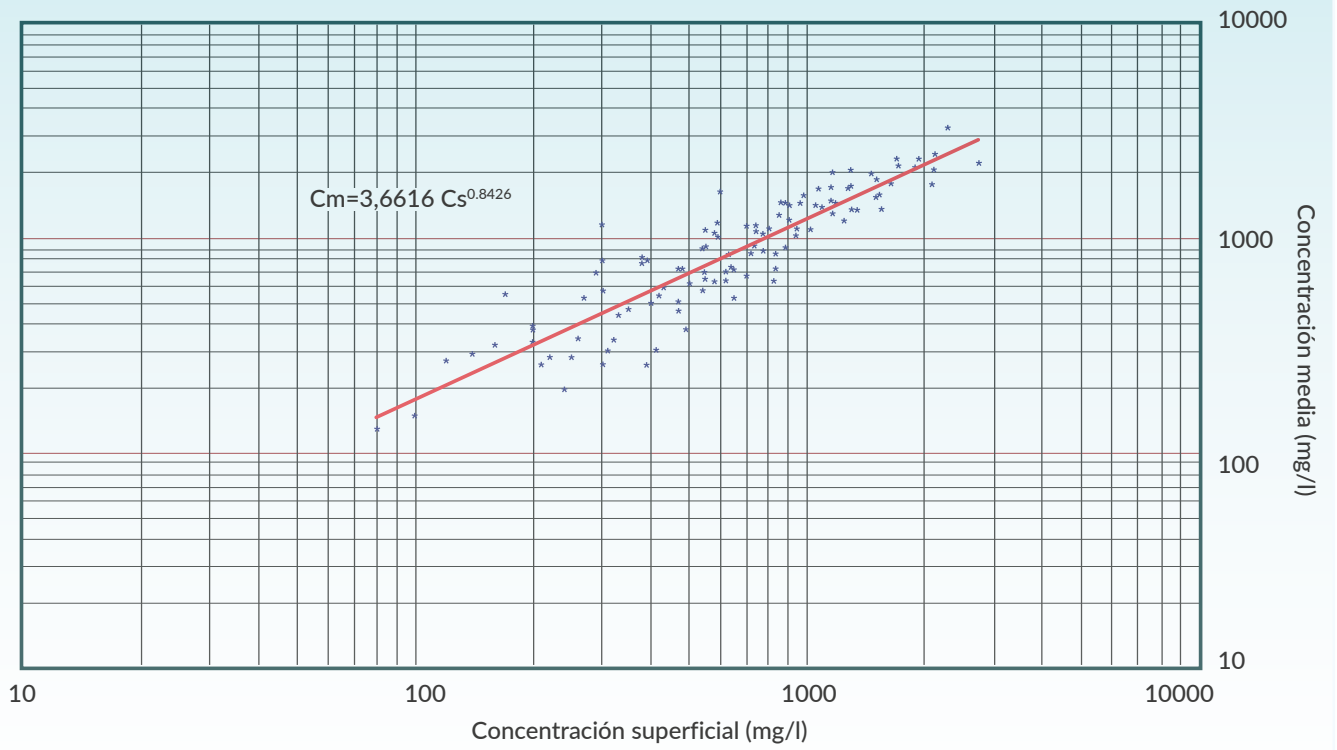
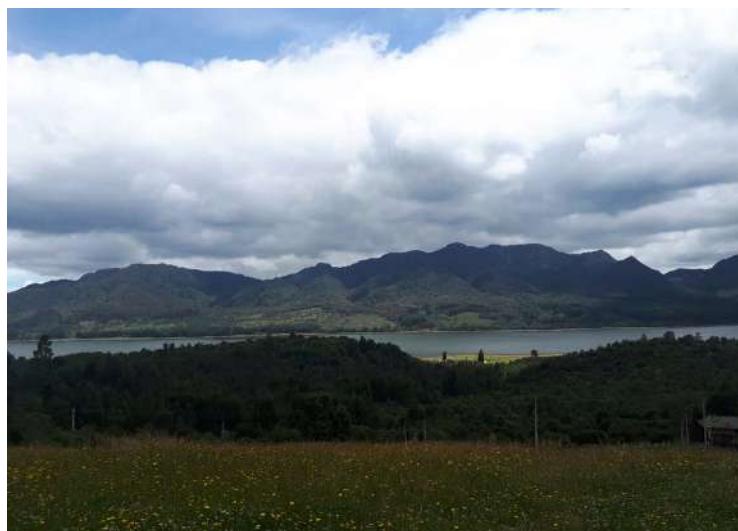


Figura 8-114. Ejemplo de relación entre concentración media y concentración superficial.
Fuente: (IDEAM, 2007).



Embalse del Neusa
📍 Ángela Vega

8.1.4.12 Caudales sólidos

Para el cálculo de los caudales sólidos deben estar

disponibles, en la base de datos, los siguientes datos e información (Figura 8-115):

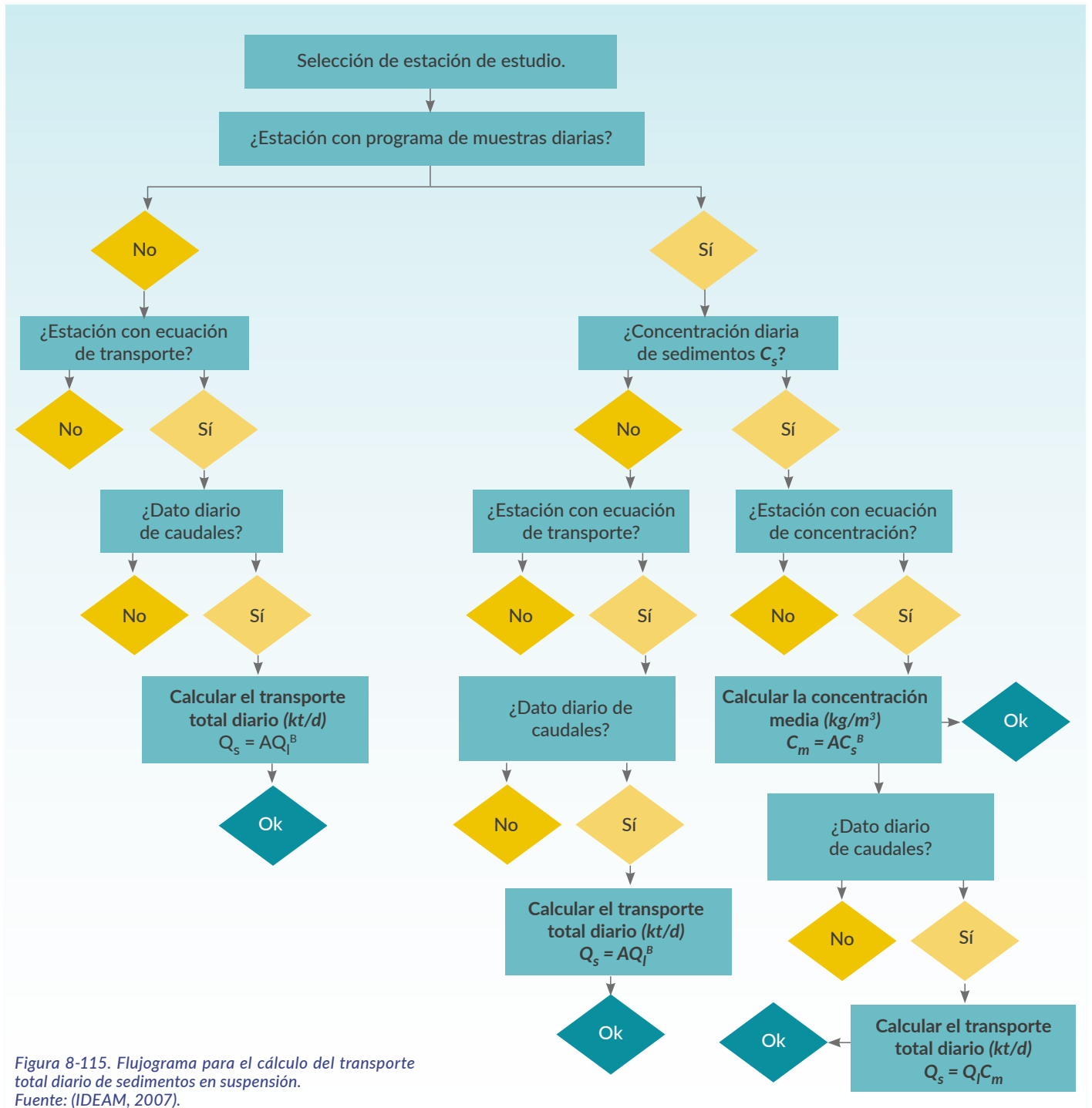


Figura 8-115. Flujograma para el cálculo del transporte total diario de sedimentos en suspensión. Fuente: (IDEAM, 2007).

1. Los caudales líquidos diarios definitivos, es decir verificados en cuanto a calidad y homogeneidad.
2. Las tablas o ecuaciones de las curvas de sedimentos, con los rangos de extrapolación que cubran toda la variación de caudales líquidos presentados durante la vigencia de la curva.

Los caudales líquidos se ingresan a la base de datos mediante digitalización o cálculo interno a partir de los niveles y de la curva de gastos y/o mediante transmisión de estaciones digitales y/o carga a partir de otros medios digitales.

La curva de calibración de sedimentos puede indexarse a la base de datos de dos formas, como ya se dijo: en forma tabulada, o en forma funcional (ecuación).

Una vez el sistema cuente con los datos requeridos, el mismo sistema debe identificar y aplicar la tabla o ecuación automáticamente de la curva de sedimentos a los caudales diarios, para obtener los valores de caudal sólido correspondientes. Para conseguir los promedios de caudal sólido, en la unidad de tiempo estándar requerida (día, mes,

año), se deben compilar las series cronológicas horarias o diarias de caudal líquido, generadas como se describe en el protocolo de niveles y caudales.

Cuando se tienen curvas de sedimentos múltiples dentro del período que se está procesando, se debe aplicar, para cada espacio de tiempo, la curva definida para el período correspondiente, lo cual se debe prever con anterioridad al analizar e identificar los cambios bruscos, especialmente después de las temporadas húmedas. En el caso de faltar datos de caudales líquidos, generalmente no más de un 10 % del total, ellos se pueden deducir indirectamente, a través de correlaciones con otras estaciones situadas en la misma corriente, cuenca o en sus cercanías, pero en condiciones de régimen hidrológico similar.

- Cuando se dispone de aforos sólidos y de muestras diarias de sedimentos, se calcula la concentración media diaria de sedimentos en suspensión C_m , mediante la Ecuación 8-47 (Figura 8-114 y Figura 8-115), luego se calcula el transporte total diario de sedimentos en suspensión:

$$C_m = a * C_s^b$$

Ecuación 8-47

Donde,

- Q_l : Caudal (m^3/s).
- Q_s : Caudal sólido (kg/s).
- C_s : Concentración superficial (kg/m^3).
- C_m : Concentración media (mg/l).
- a y b : Constantes.

Para el cálculo del caudal sólido (Ecuación 8-48):

$$Q_s = C_m * Q_l$$

Ecuación 8-48

- Cuando no se dispone de muestras diarias o no se tomen muestras diarias, el valor de la carga o transporte total diario de sedimentos en suspensión Q_s se calcula a partir de la ecuación de la curva de

calibración que relaciona el caudal sólido y el caudal líquido (Figura 8-113 y Figura 8-114), leyendo directamente de la base de datos los caudales líquidos diarios (Q_l) (Ecuación 8-49):

$$Q_s = a * Q_l^b$$

Ecuación 8-49

Donde,

Q_l : Caudal (m^3/s).

Q_s : Caudal sólido (Kg/s).

a y b : Constantes.

Es importante anotar el papel crucial que juegan, en la veracidad de estas ecuaciones, los márgenes de error de las mediciones de estas variables y de las estimaciones hidrológicas, aspecto en el cual se debe trabajar en el futuro cercano.

Este mismo procedimiento (b) se aplica para el cálculo de los caudales sólidos de arrastre fondo (Q_f),

en caso de que se tengan los aforos y curva de calibración correspondiente.

- El caudal o transporte sólido total resulta de la sumatoria de los caudales transportados en suspensión y por arrastre de fondo (Ecuación 8-50):

$$Q_t = Q_s + Q_f$$

Ecuación 8-50

8.1.4.13 Transporte de fondo y transporte total

El procedimiento para calcular el caudal de arrastre de fondo es el siguiente:

- Secar y pesar el sedimento recogido con el muestreador de arrastre de fondo.

- El peso seco, dividido por el tiempo empleado para la medición y por la anchura del muestreador, da el caudal del arrastre de fondo por unidad de anchura del río en el punto de medida qb y por unidad de tiempo.

- Con base en los datos obtenidos de los puntos donde se realizaron las muestras, se construye una curva que muestre la distribución de qb a lo ancho del río. La superficie comprendida entre dicha curva y la línea de la superficie del agua representa el caudal total diario del material de fondo para toda la sección transversal Qb . El valor de Qb se puede también calcular a partir de los datos de los qb medidos de la siguiente manera:
 - El valor de Qb es en toneladas/día, qb en kg/s. x , distancia en metros. La variable x representa la distancia entre los puntos en los cuales se extrae la muestra o entre un punto extremo o el borde de la superficie del agua, o el de la parte móvil del fondo del río. La existencia de presas que retienen la mayor parte de los sedimentos transportados por los tramos aguas arriba del río ofrece una posibilidad de estimar el caudal de sedimentos, anual o estacional, mediante la sucesiva inspección de perfiles convenientemente seleccionados del embalse y calcular el volumen ocupado por el sedimento retenido. Este método, combinado con tomas de muestras periódicas de Qb , y los sedimentos en suspensión aguas arriba y aguas abajo de la presa, puede proporcionar una estimación adecuada del caudal de arrastre.

Con base en el aforo del arrastre de fondo y en el caudal líquido diario, se puede estimar un registro continuo del caudal de arrastre de fondo, mediante una calibración entre caudal de arrastre y caudal líquido. Se puede admitir que esta relación es aproximadamente lineal para los caudales líquidos superiores al valor límite correspondiente al comienzo del movimiento del sedimento de fondo, debido a que la fuerza de tracción de la corriente aumenta en relación directa

con el incremento del caudal del río. El transporte de material de fondo es de gran interés en todas las investigaciones concernientes a las variaciones del lecho del río.

El transporte total está conformado por la sumatoria del transporte en suspensión más el transporte de fondo (kg/s).

Dadas las dificultades para tener datos confiables de carga de fondo, existen metodologías sintéticas para estimar tanto la carga de fondo como la carga total, que pueden ser empleadas en ausencia de datos de muestreos suficientes.

El sistema debe permitir la edición de los resúmenes de aforo sólido, con varias opciones, que incluyan: regional, corriente y período requerido, y luego generar un archivo conforme a lo solicitado, en especial sobre:

- Concentraciones diarias superficiales de sedimentos en suspensión en kg/m^3 .
- Concentraciones medias diarias de sedimentos en suspensión en kg/m^3 .
- Transporte diario de sedimentos en suspensión en kg/s .
- Caudal líquido medio diario en m^3/s .
- Relación entre el caudal sólido y el caudal líquido.
- Relación entre la concentración superficial y la concentración media.
- Con los datos de transporte medio diario se calcula el transporte medio mensual y el promedio, máximo y mínimos de los valores diarios de cada mes.
- A partir de los totales mensuales se construye el resumen anual para cada estación, y con base en él se calculan igualmente el caudal sólido medio anual para cada año, el caudal medio mensual multianual, el caudal medio anual multianual y el caudal máximo y mínimo mensual y anual multianuales.

En casos de estaciones de propiedad de autoridades ambientales regionales u otros organismos, estas podrán adoptar los formularios de salida que se acomoden a su software, a condición que reúnan los mismos datos como mínimo.

La actualización de los aforos sólidos debe permitir la actualización interactiva de los resúmenes de aforos sólidos que no fueron generados por los procesos en línea.

Los datos de resúmenes diarios, mensuales, anuales y multianuales de caudal sólido son los datos básicos para el usuario general, que deben estar disponibles en el banco de datos.

Desde el punto de vista de la determinación de la oferta hídrica a nivel de zona hidrográfica, el principal producto por generar mediante el procesamiento secundario de la información es el mapa de caudales sólidos, que a su vez permite estimar el caudal sólido medio de la cuenca en cualquier punto de la misma (o el volumen total anual de sedimentos en suspensión generados). Este mapa equivale al mapa de caudales líquidos del protocolo de niveles y caudales. El procesamiento secundario se puede completar mediante la elaboración de histogramas de caudales medios mensuales multianuales, indicadores del régimen de escorrentía superficial, los cuales deben actualizarse cada año (Figura 8-116).

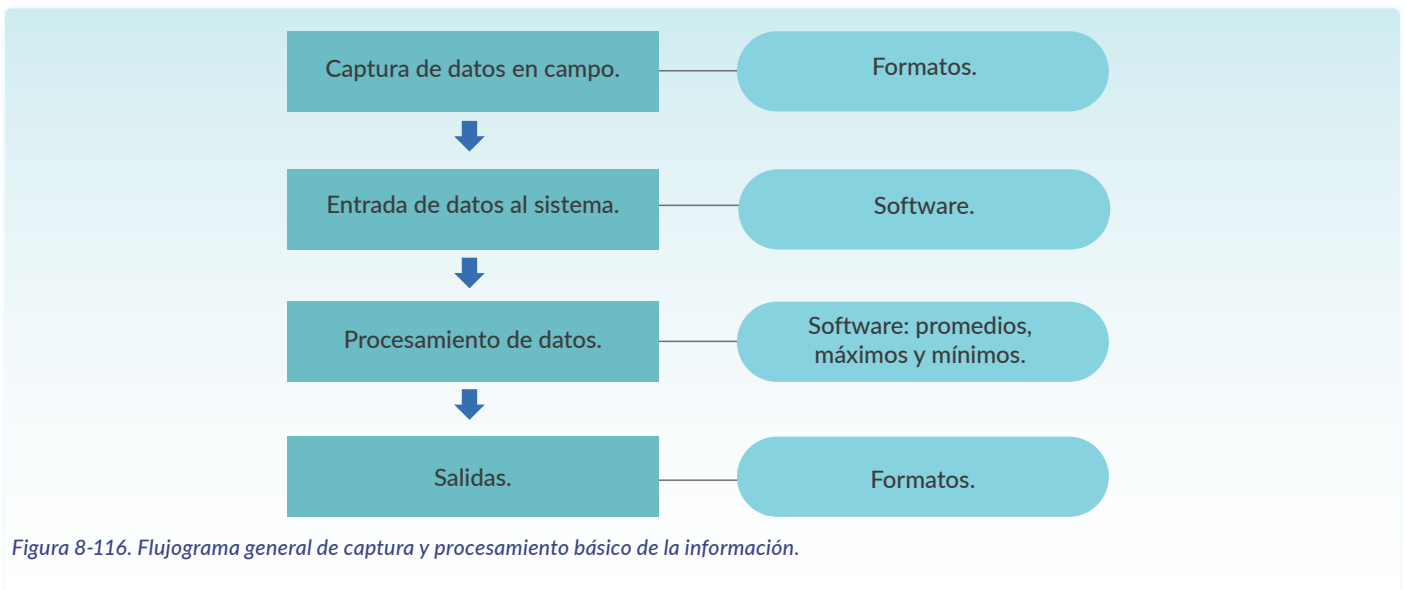


Figura 8-116. Flujograma general de captura y procesamiento básico de la información.

De igual manera, para caracterizar el régimen de caudal sólido se pueden calcular los siguientes índices para los valores mensuales y anuales de la serie, una vez validados los datos: desviación estándar, coeficiente de variación e índice de irregularidad interanual (IRA).

8.1.4.14 Validación de datos: control de calidad

La Tabla 8-17 muestra una relación de las fallas y/o errores más frecuentes en la medición de caudal sólido, de acuerdo con la experiencia del IDEAM. Es evidente que el control de calidad en la medición de sedimentos debe empezar con evitar la comisión de estos errores.



Lago de Tota
■ Germán Sopó

Tabla 8-17. Errores en la operación de instrumentos de muestreo de sedimentos.

Error	Descripción
Errores selección estación de aforo	<ul style="list-style-type: none"> • Sección de aforos inestable, que hace que las curvas de gastos cambien constantemente. • Difícil acceso. • Déficit de observadores. • La estación no es representativa de la corriente. • Soportes sin firmeza.
Errores del muestreo diario	<ul style="list-style-type: none"> • Botellas sucias. • Llenado incompleto de botellas. • Verter y agregar agua a la botella para completar el volumen de muestreo. • No agitar la botella antes de verter su contenido a la probeta. • Error de paralaje al leer la probeta. • Colocar mal el filtro en el embudo, o verter muy rápido el contenido de la probeta en el embudo Buchner, haciendo que el filtro se levante y se pierda parte del filtrado. • Retirar el filtro con las manos húmedas. • Poner el filtro con la cara del filtrado hacia abajo, lo que hace que parte del filtrado se caiga. • Marcar en forma ilegible el filtro. • Anotaciones ilegibles o dudosas en el formato de muestras diarias (Anexo 8-7). • Falta de papelería (libretas). • Libreta sin identificar (nombre y código estación, fechas).
Errores del aforo sólido	<ul style="list-style-type: none"> • Calibración inadecuada del muestreador. La velocidad de acceso en la boquilla del instrumento debe ser igual a la velocidad del flujo en el punto de muestreo. Los errores de medición que se producen cuando la velocidad del agua en la boquilla es diferente de la velocidad de la corriente, son inapreciables para partículas menores de 0.06 mm, para partículas mayores de 0.06 mm, el error es mayor mientras mayor sea el tamaño de partícula y la diferencia entre la velocidad de entrada y la de la corriente en el punto de muestreo. Cuando la velocidad en la boquilla es menor que la de la corriente, las muestras contienen un exceso de sedimentos; y cuando la velocidad de la boquilla es mayor las concentraciones son menores que las de la corriente. La magnitud de los errores en la concentración para diferentes relaciones de velocidad de toma varía entre 0.25, 0.50 y hasta 3.0 veces la velocidad de flujo, para diferentes tamaños de partícula de suspensión. A medida que dichas partículas son de inferior diámetro, la magnitud del error decrece. Usualmente, los fabricantes de estos equipos advierten que las boquillas están calibradas para cada instrumento individualmente. • Orientación incorrecta del equipo. La orientación inadecuada del muestreador con respecto a la dirección del flujo reduce la concentración de la muestra. En ensayos de laboratorios de hidráulica, se ha encontrado que el error es inapreciable para desviaciones menores de 20 grados, mientras que una desviación de 30 grados resulta en un error de - 7%. Por tanto, la sección de la boquilla debe ser normal a las líneas de flujo. • Influencia del lecho. La extrema aproximación del muestreador al lecho con la consecuente captación de partículas de arrastre o saltación altera el contenido de sólidos suspendidos de la muestra. • Tiempos de llenado inadecuados. La pérdida de representatividad de la muestra se da por rebosamiento y recirculación del contenido de la botella. Se recomienda que el llenado de la botella se realice de acuerdo con las instrucciones de muestreo en cuanto a tiempos de llenado con relación a la velocidad del flujo, de tal forma que se garantice un volumen no superior al 75% de la capacidad de la botella. • Tamaño óptimo de la muestra. La limitada capacidad de los recipientes de los muestreadores, especialmente de la serie "US", puede conducir a que cuando la muestra presenta baja concentración y las partículas son de variado tamaño, el peso sea relativamente mayor que el real, lo cual distorsiona la distribución de los tamaños de diámetros a la carga medida y hace necesaria la toma de varias muestras del mismo punto. Para obviar este problema se ha implementado el muestreador de la bolsa plegable, descrito anteriormente, el cual toma una muestra más grande. • Profundidad y eficiencia. Las mediciones que se realizan por verticales no muestrean la totalidad de los sedimentos debido a que el instrumento no llega hasta el lecho mismo de la corriente. La magnitud de la distancia entre el lecho y el instrumento depende de la forma y tamaño del equipo, del método de operación, de la consistencia o firmeza del fondo y de la presencia de formas del lecho. Como consecuencia, no todos los sedimentos de la vertical tienen la posibilidad de ser captados por el muestreador. Para analizar en forma teórica la cantidad de sedimentos no medida (Chien, 1952 en IDEAM, 2004, 2007), definió el concepto de eficiencia de una medición integrada en profundidad como la relación entre la cantidad de sedimentos representada en la muestra y la cantidad total de sedimentos en suspensión y de arrastre presentes en la vertical, para un cierto tamaño de partículas del material del lecho. Se deduce que cuanto menor es la profundidad, menor es la eficiencia del muestreo, dado que en la zona no medida es proporcionalmente mayor. • Otros. Datos de nivel mal leídos, curva de gastos desactualizada, instrumentos de nivel desnivelados (mitra o limnógrafo) y demás errores propios de las estaciones hidrométricas (ver protocolo de niveles y caudales).

Error	Descripción
Fallas de laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> • Error de paralaje al leer la probeta. • Colocar mal el filtro en el embudo, o verter muy rápido el contenido de la probeta en el embudo Buchner, haciendo que el filtro se levante y se pierda parte del filtrado. • Dejar sedimento en el fondo de la probeta o del filtro Buchner. • Retirar el filtro con las manos húmedas. • Poner el filtro con la cara del filtrado hacia abajo, lo que hace que parte del filtrado se caiga. • Marcar en forma ilegible el filtro. • Mufla descalibrada. • Balanza descalibrada y/o desnivelada. • Anotación incorrecta de los datos de volumen, tara y peso en el <i>formato de aforo de sedimentos en suspensión</i> (Anexo 8-10), <i>formato de control de filtración de aforos sólidos</i> (Anexo 8-14) y <i>formato de control de calcinación de aforos sólidos</i> (Anexo 8-15). • Marcado incorrecto o confusión de los filtros entre sí y/o de los crisoles. • Tamices sucios. • Tamizador desajustado.

Las series de caudales sólidos se derivan de las series de caudales líquidos, a partir de la relación dada por la curva de calibración entre el caudal sólido Q_s y el caudal líquido Q_l . Además, los caudales sólidos dependen del muestreo realizado durante el aforo sólido y de la determinación de las concentraciones de sedimentos en suspensión en esas muestras. Por tanto, los posibles errores en las series de caudales sólidos se pueden deber a errores en las series de caudales líquidos, a errores del muestreo de sedimentos y a errores en las curvas de calibración de caudales y concentraciones.

El sistema de control de calidad de sedimentos contempla tres etapas como mínimo: pre verificación en la estación, verificación en oficina sobre libretas y validación final postproceso, en el sistema, los cuales se describen a continuación (Figura 8-120):

Pre verificación de los datos en la estación

Esta pre verificación se lleva a cabo fundamentalmente sobre las muestras diarias de sedimentos superficiales en suspensión, que, como se dijo anteriormente, son tomadas y filtradas, y sus filtros almacenados por el observador.

La pre verificación en la estación se realiza durante las visitas de inspección por cada estación del inspector y su ayudante, con una frecuencia que depende del tipo de estación y de la estabilidad de la sección.

Dado que uno de los componentes del muestreo diario es el registro del nivel, del cual depende el caudal líquido diario, se aplica en este caso la inspección a la estación hidrométrica (limnimétrica, limnigráfica o automática), cuyos objetivos y procedimientos se pueden consultar en las secciones 8.1.1 Niveles y 8.1.2 Caudales.

Específicamente, los puntos más importantes para el muestreo diario de sedimentos, por verificar durante las visitas de inspección, son los siguientes:

Revisar las copias u originales de las libretas de muestreo diario de meses anteriores y comprobar:

- ♦ Que las libretas estén al día, sin adelantos ni retrasos. Si se hallan adelantadas, se revisan los días hacia atrás hasta encontrar desde cuándo se presentó la anomalía.
- ♦ Que la última anotación corresponda al día de la visita.
- ♦ Que los datos que identifican a la estación (código, nombre) y las fechas (día, mes, año) estén correctos.

- ♦ Que el número de días de cada mes sea el correcto (28, 29, 30 o 31).
- ♦ Que las copias de la libreta de muestras diarias sean legibles, y que los números de las lecturas anotadas sean legibles y estén puestos en las casillas que corresponda.
- ♦ Que se haya anotado en el formato el día, la hora, la lectura de mira, la distancia desde el punto de referencia, el número del filtro y el volumen del filtrado, para cada muestra tomada.
- ♦ Que se aclaren las lecturas ilegibles con el observador.
- ♦ Que los embudos, filtros, caja de filtros, probeta y pipeta estén en buen estado.
- ♦ Que la canastilla de muestreo y las botellas estén en buen estado.
- ♦ Que los filtros estén convenientemente empacados, sellados y almacenados, en tal forma que no se pierda sedimento.

Como resultado, se analizan con el observador los errores encontrados y se instruye en caso necesario (ver Tabla 8-17 sobre posibles fallas o errores).

Verificación de los datos en oficina

• Verificación de los datos de concentraciones diarias

Para la verificación de los datos de concentración de sedimentos en suspensión se parte de la curva que relaciona la concentración superficial con la

concentración media y de la ecuación correspondiente. Es posible encontrar dos tipos de distribución: homogénea y heterogénea (Figura 8-117 y Figura 8-118). Para cada curva se estima el coeficiente de correlación (R). Por lo general, una sección estable presenta una distribución homogénea de sus puntos a lo largo de la recta de tendencia central trazada en papel doble logarítmico y un coeficiente de correlación alto, mientras que una sección inestable presenta una alta dispersión y un coeficiente de correlación bajo, si bien pueden darse otros factores (incluso de muestreo y aforos líquidos) que influyen en la dispersión. El coeficiente de correlación permite determinar el rango de variación aceptable de los datos de concentración.

Para los datos de concentraciones diarias, el procedimiento de verificación de la validez de la muestra es el siguiente (Tabla 8-18):

- Se calcula la concentración de cada muestra dividiendo la diferencia del peso bruto y la tara por el volumen y convirtiendo a mg/l.
- Con las tres concentraciones superficiales diarias (C_1 , C_2 y C_3), se calcula el promedio diario (C_m).
- Se calcula luego el porcentaje de variación de cada muestra con respecto al promedio (Ecuación 851), así:

$$\% V = \frac{(C_1 - C_m) * 100}{C_m}$$

Ecuación 8-51

- El porcentaje de variación calculado para cada muestra se confronta con la máxima desviación permitida, representada por el complemento a 1 del coeficiente de correlación.
- Las muestras que presenten un porcentaje de variación, superiores al máximo permitido pasan a revisión antes de eliminarse (en rojo en la Tabla 8-18), para determinar la causa de la variación.

Tabla 8-18. Ejemplo de aplicación del método de verificación de las concentraciones.

Mes	Dia	Ancho a 1/4			Ancho a 1/2			Ancho a 3/4			Concentración (mg/l)				% Variación concentración			Cumplimiento			% Variación máximo*
		Volumen ml	Tara mg	Peso mg	Volumen ml	Tara mg	Peso mg	Volumen ml	Tara mg	Peso mg	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	cm	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	C1 (1/4)	C2 (1/2)	C3 (3/4)	
1	1	380	14.1604	14.6445	360	14.1138	14.4349	370	15.3975	15.6994	1.2739	0.8919	0.8159	0.9939	28.2	10.3	17.9	28.2	Cumple	Cumple	25
	2	330	16.8748	17.1017	310	16.5404	17.1263	350	14.2528	15.5621	0.6867	1.8900	3.7409	2.1061	67.4	10.3	77.6	67.4	Cumple	77.6	
	3	350	15.3573	15.3967	290	15.975	16.0058	240	16.3078	16.3529	0.1126	0.1062	0.1879	0.1356	17.0	21.7	38.6	Cumple	Cumple	38.6	

* % Variación = (1-R)*100=(1-0.75)*100 = 25%

Fuente: (IDEAM, 2009).

- Las causas de la variación por fuera del límite determinado con base en el coeficiente de correlación de la curva de calibración de concentraciones pueden ser múltiples. La Figura 8-119 muestra el proceso general de la verificación, junto con las causas posibles de la variación. Entre ellas se destacan:
 - ♦ Coeficiente de correlación de la relación caudal sólido y caudal líquido (transporte).
 - ♦ Coeficiente de correlación de la relación concentración superficial y concentración media.
 - ♦ Ancho variable de la sección.
 - ♦ Inestabilidad de la sección.
 - ♦ Cambios en la velocidad media.
- ♦ Errores del observador en la toma de muestras y/o en la anotación del volumen.
- ♦ Errores de transcripción de datos.
- ♦ Otros.
- La experiencia muestra que el 80 % de las altas variaciones detectadas en las concentraciones (Tabla 8-18) se deben a errores de transcripción de datos, cuando el proceso es manual; al automatizar el proceso estos errores deben desaparecer.
- Una vez que se detecte la causa de la variación se procede a corregirla, de ser el caso, y a reintegrarla a la base de datos, o a eliminarla definitivamente, si no se detecta una causa corregible.



Río Alto Patía
 Juan José Montoya

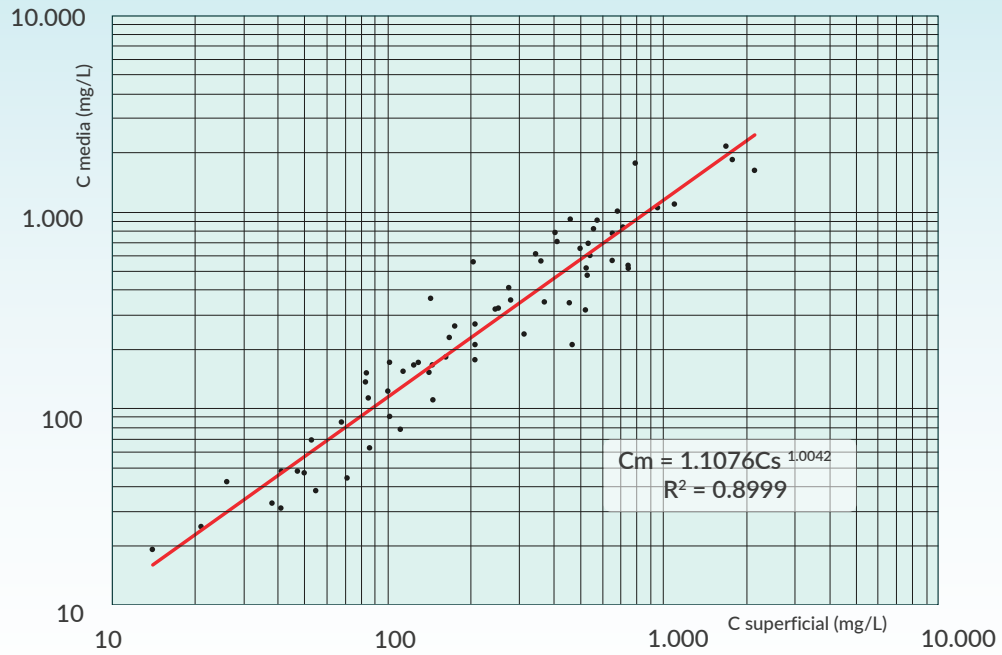


Figura 8-117. Distribución homogénea de concentración de sedimentos.
Fuente: (IDEAM, 2008).

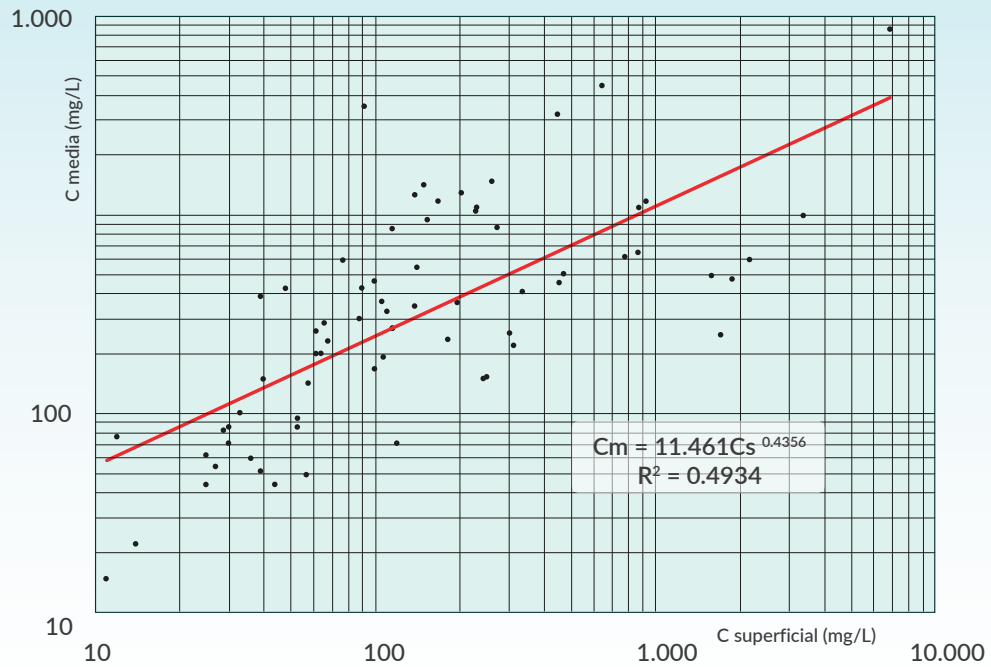


Figura 8-118. Distribución heterogénea de concentración de sedimentos.
Fuente: (IDEAM, 2008).

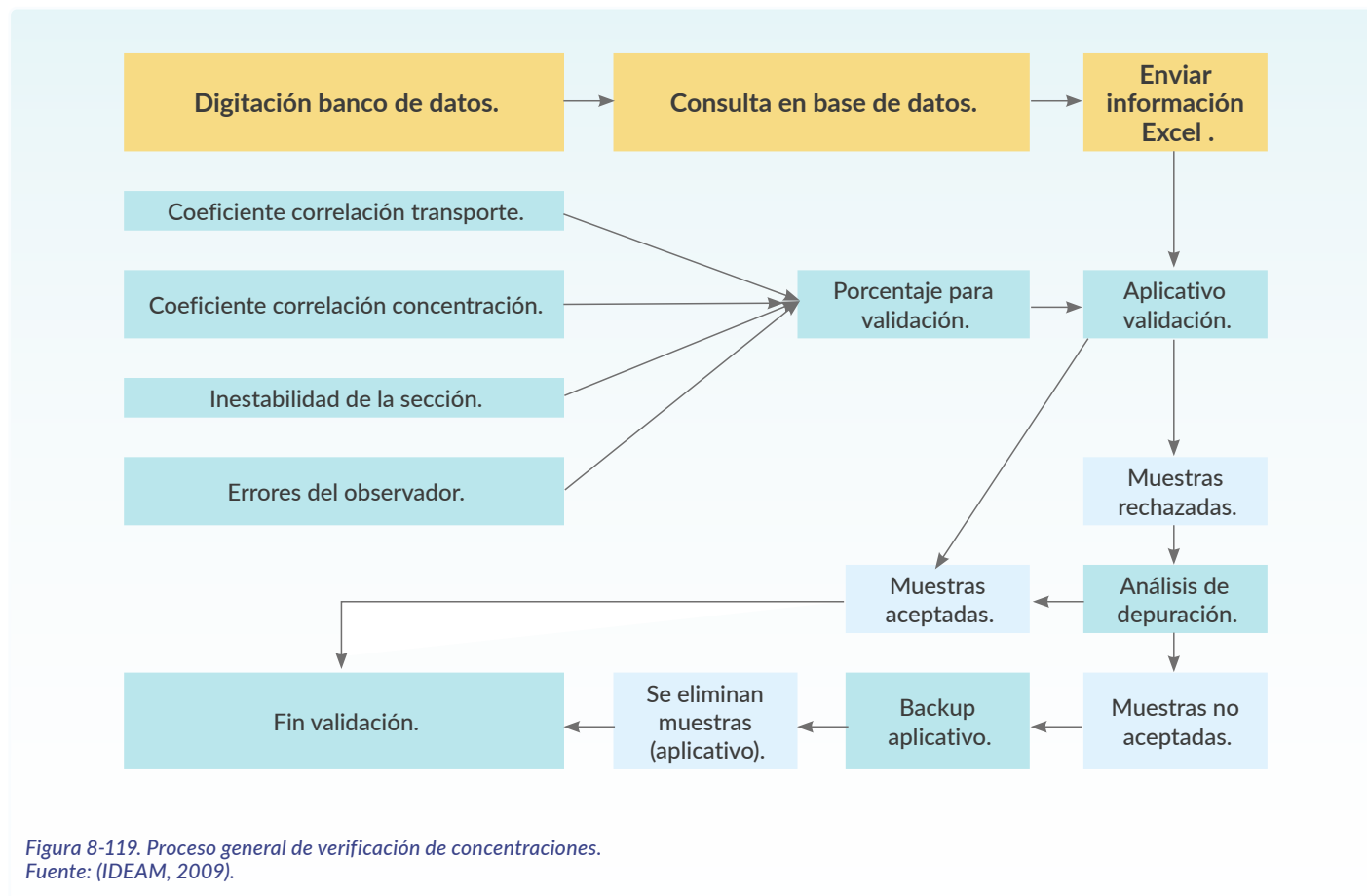


Figura 8-119. Proceso general de verificación de concentraciones. Fuente: (IDEAM, 2009).

Verificación de los datos de aforo sólido

La verificación del aforo sólido se lleva a cabo por el propio inspector a cargo, mediante la comprobación de que no han ocurrido los errores descritos en la Tabla 8-17, a saber:

- ♦ Calibración inadecuada del muestreador.
- ♦ Orientación incorrecta del equipo.
- ♦ Influencia del lecho.
- ♦ Tiempos de llenado inadecuados.
- ♦ Tamaño óptimo de la muestra.
- ♦ Profundidad y eficiencia.
- ♦ Otros ligados a la operación de la estación hidrométrica.

Verificación de los datos de laboratorio

La verificación del análisis de laboratorio sobre las muestras del aforo sólido se lleva a cabo por el revisor de laboratorio, mediante la comprobación de que no han ocurrido los errores descritos en la Tabla 8-17, relativos tanto a errores de proceso de la filtración, la calcinación y la granulometría, como al estado, calibración y/o nivelación de los instrumentos.

Validación final

Se lleva a cabo en el procesamiento, mediante la validación de los datos muy alejados de la línea de tendencia central de la curva de calibración entre Q_s y Q_l existente.

Para este efecto, los aforos de caudal sólido se transcriben sobre la gráfica de la curva de calibración existente, y se rechazan aquellos que queden muy alejados de la curva. Como en el caso de las concentraciones (Figura 8-119), estos aforos se revisan en forma detallada para identificar las posibles causas de la desviación encontrada, en especial: errores de cálculo, errores de transcripción, inestabilidad de

la sección u otros. Con base en esta depuración, el ingeniero a cargo debe decidir si acepta o elimina en forma definitiva el aforo. En caso de encontrarse una desviación sistemática de los aforos nuevos con respecto a la curva, se deberá analizar la necesidad de cambiar la curva, ya que, en tal caso, la desviación podría deberse a cambios en las características de la sección (Figura 8-120).

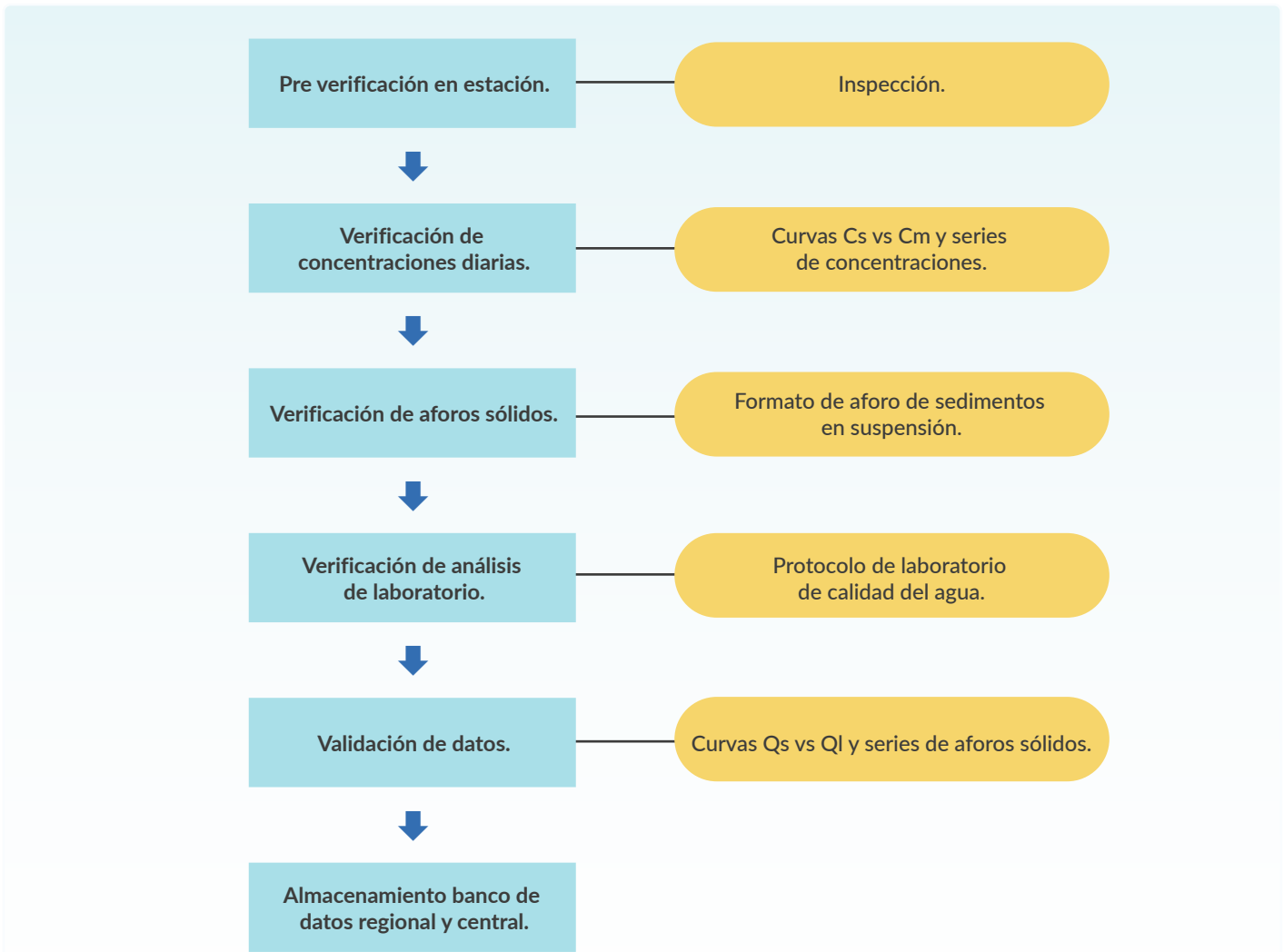


Figura 8-120. Flujograma general de la validación de la información.

De otro lado, dado que la incertidumbre de la curva de calibración que relaciona los niveles y caudales líquidos, se refleja en las series de caudales líquidos, y la incertidumbre de la curva de calibración entre caudales sólidos y caudales líquidos se refleja en las series estimadas de caudales sólidos, es importante controlar los errores de construcción de las series

de caudales sólidos, para lo cual, se recomienda no utilizar sino series de caudales diarios depuradas y homogeneizadas para la generación de caudales sólidos diarios. Los métodos para el control de calidad de las series diarias, mensuales y anuales de niveles y caudales líquidos se presentan en el protocolo de niveles y caudales.



Laguna del Otún
■ Juan José Montoya



Laguna Negra, PNN Los Nevados
📍 Jenny Marín

8.2 Monitoreo de calidad

El monitoreo de calidad del agua superficial, permite conocer el estado en que se encuentran los sistemas lénticos y lóticos a la altura de las estaciones o puntos de monitoreo. Esto se logra a través del análisis de diferentes variables fisicoquímicas e hidrobiológicas, las cuales son presentadas en informes de evaluación, seguimiento y control. Por ello, es necesario establecer un programa de monitoreo estructurado de manera estratégica que responda a objetivos claros (que pueden ser académicos, de control o para toma de decisiones con fines de gestión o planificación entre otros), estableciendo la ubicación de estaciones y variables, indicando las épocas de campaña y la frecuencia para la toma de muestras, adicionalmente, teniendo en cuenta las metodologías por utilizar y el costo económico de las campañas de monitoreo. La OMM recomienda realizar una evaluación durante la fase inicial de la implementación de un programa de monitoreo, con el fin de verificar que el programa esté entregando los resultados de acuerdo con los objetivos propuestos.

Es importante resaltar que la información de calidad del agua debe ser complementada con información de cantidad obtenida de manera simultánea mediante aforos líquidos, con el fin de obtener resultados más representativos asociados a los caudales que discurren por el punto de observación en el momento del muestreo.

En esta sección del protocolo se presentan los procedimientos para la toma de muestras fisicoquímicas e hidrobiológicas.

8.2.1 Muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos

El monitoreo fisicoquímico del agua, hace parte de la evaluación, seguimiento y control del estado de un cuerpo de agua (lótico o léntico) y toma como referencia una red establecida o puntos seleccionados.

En la sección correspondiente al monitoreo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, se encuentran los aspectos básicos para realizar el monitoreo en corrientes superficiales.

8.2.1.1 Selección de puntos

Actualmente en Colombia existen tres tipos de redes: nacional, regional y local o específica, de acuerdo con lo establecido en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, expedida por el Gobierno Nacional en el año 2010, las cuales tienen un objetivo particular (Figura 8-121). La red nacional es administrada por el IDEAM y corresponde a una red de referencia que evalúa las condiciones de la calidad del agua a nivel de zona hidrográfica. La red regional, administrada por corporaciones autónomas regionales, evalúa las condiciones de calidad del agua, realiza seguimiento y permite hacer control sobre usos y vertimientos a nivel de subzona hidrográfica; y la red local o específica administrada por las autoridades ambientales de grandes centros urbanos, municipios o empresas públicas o privadas que hacen seguimiento y control de acuerdo con las necesidades fijadas con los objetivos a nivel de cuenca o nivel subsiguiente.



Figura 8-121. Tipos y propósitos de las redes de monitoreo.

En caso de que existan estaciones de otras entidades, estas deben ser incorporadas a la red propuesta para reducir el costo de instalación y operación de estaciones adicionales. En este escenario, es necesario realizar actividades de intercalibración para asegurar la comparabilidad entre datos generados por diferentes entidades.

En el momento de seleccionar una estación, es importante destacar que las variaciones naturales de la calidad del agua están íntimamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales de los caudales, de la precipitación y de las características físicas de las cuencas hidrográficas.

Se recomienda desde el punto de vista hidrológico, conocer el tipo de cuerpo de agua por monitorear, teniendo en cuenta:

- La localización geográfica (latitud, longitud y altitud).
- La localización fisiográfica y/o tipo geomorfológico de curso o cuerpo de agua.
- El ecosistema al cual pertenece.
- Las variaciones espaciales de los caudales.
- Las variaciones temporales de los caudales.

Adicionalmente, la ubicación de una estación debe reflejar los factores siguientes:

- Problemas y condiciones hídricas existentes.
- Centros potenciales de crecimiento (industrial y municipal).
- Tendencias demográficas.
- Clima, geografía y geología.
- Accesibilidad.
- Disponibilidad de recursos humanos, fondos e instalaciones para el tratamiento de datos tanto sobre el terreno como en laboratorio.

- Consideraciones interjurisdiccionales.
- Tiempo de desplazamiento hasta el laboratorio (por si las muestras pudieran deteriorarse).
- Seguridad física del personal.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 8-122 y la Tabla 8-19 se relacionan posibles sitios de muestreo identificados, con la descripción de cada uno de ellos.

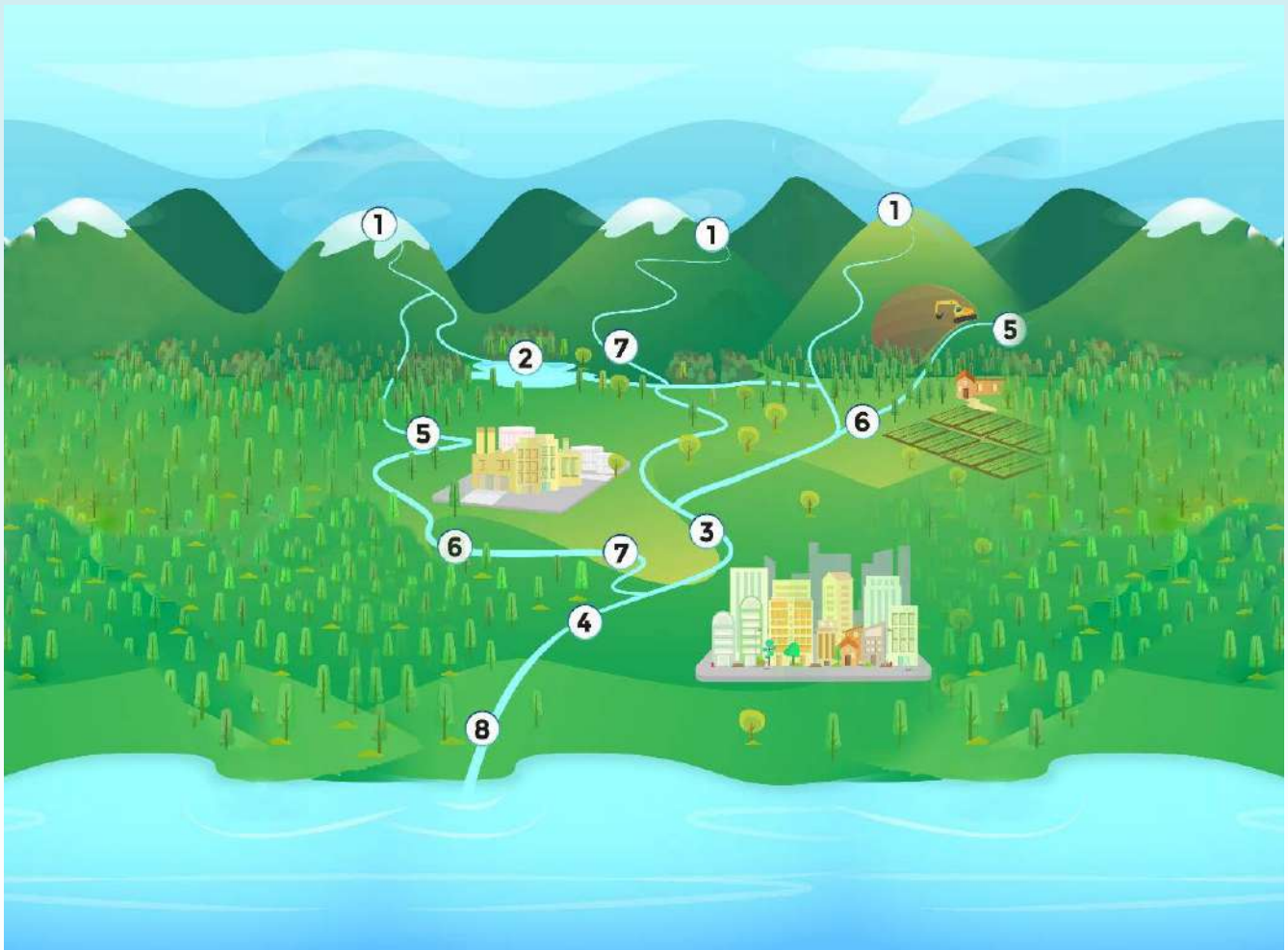


Figura 8-122 . Posibles sitios de monitoreo.
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2002.

Tabla 8-19. Descripción de los sitios de monitoreo.

Número de sitio de muestreo	Descripción del sitio de muestreo
1	Fuente superficial en cercanías al nacimiento del río.
2	Lago, laguna, embalse.
3	Fuente superficial aguas arriba de una ciudad.
4	Fuente superficial aguas abajo de una ciudad.
5	Fuente superficial aguas arriba de actividades económicas como: industria, minería, agricultura, entre otras.
6	Fuente superficial aguas abajo de actividades económicas como: industria, minería, agricultura, entre otras.
7	Sobre los principales tributarios antes de la desembocadura a la fuente superficial.
8	Fuente superficial aguas arriba de la desembocadura al mar.

Fuente: (IDEAM, 2002).

La Figura 8-122 ilustra los posibles sitios de muestreo para el monitoreo de calidad del agua asociados a tipos de fuente e impactos potenciales por actividades antrópicas.

En esta tabla asociada a la Figura 8-122 se definen puntos aguas arriba y aguas abajo de las posibles fuentes de afectación a la calidad del agua, así como los sitios antes de la entrega de tributarios a corrientes principales.

8.2.1.2 Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de monitoreo de calidad del agua, se establece de acuerdo con los objetivos planteados en las campañas o el programa de monitoreo de cada entidad. Lo recomendado, es realizar cuatro campañas en el año para parámetros básicos, teniendo en cuenta que por lo menos dos de estas correspondan a condiciones hidrológicas máximas y mínimas (caudales-niveles altos y bajos); las restantes deben ser distribuidas en los correspondientes periodos de

transición. Para otros parámetros como plaguicidas y metales pesados, se requieren mínimo dos muestreos al año en las estaciones seleccionadas para tal fin.

8.2.1.3 Tipo de muestra

Uno de los aspectos importantes para tener en cuenta al momento de programar la campaña de monitoreo de calidad del agua, es el tipo de muestra que se va a tomar, la cual puede ser puntual, compuesta o integrada.

Muestra puntual

Es la muestra tomada en un lugar específico, en un tiempo determinado. Representa condiciones y características de la composición de un cuerpo de agua, y es indicada para los casos en que el flujo y la composición del líquido (agua o aguas residuales) no difieren significativamente (en tiempo y/o espacio).

Muestra compuesta

Es la mezcla de varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados

y en periodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o proporcionales al caudal durante el muestreo. Son usadas generalmente para la caracterización de aguas residuales.

Este tipo de muestra se compone mezclando en un mismo recipiente las alícuotas de acuerdo con la Ecuación 8-52:

$$V_i = \frac{V * Q_i}{n * Q_p}$$

Ecuación 8-52

Donde,

V_i: Volumen de cada alícuota.

V: Volumen total a componer.

Q_i: Caudal instantáneo en el momento de la toma de la muestra.

Q_p: Caudal promedio durante el muestreo.

n: Número de muestras tomadas.

Muestra integrada

La muestra integrada es aquella formada por la mezcla de muestras puntuales tomadas en diversos puntos simultáneamente, con la finalidad de conocer las condiciones promedio de calidad en un cuerpo de agua. Un ejemplo de este tipo de muestra ocurre en un río o corriente que varía en composición a lo largo de la sección (varias muestras tomadas en diferentes puntos en una sección transversal de río) y la profundidad (muestras simples o compuestas tomadas a lo largo de la columna de agua) (Sierra, 2011).

8.2.1.4 Parámetros de calidad del agua

Los parámetros en una estación o punto de monitoreo, son seleccionados de acuerdo con los objetivos planteados en el programa de monitoreo, y en algunos casos teniendo en cuenta las características de la

corriente donde se encuentra ubicada la estación. Es importante resaltar que no en todo punto o estación, es necesaria la medición de todos los parámetros, en capacidad de análisis.

Los objetivos pueden estar definidos por la necesidad de contar con un conocimiento básico de la calidad del agua, o para apoyar un proyecto especial de aprovechamiento del recurso hídrico para riego, consumo humano, conservación de la fauna, recreación pasiva o activa u otro. En cada caso las variables y parámetros podrán ser distintos. En cuanto a las características del cuerpo o corriente de agua por monitorear condicionan no solo los parámetros sino las técnicas mismas de muestreo, pues es muy diferente muestrear un pequeño río, quebrada o arroyo de poca profundidad y apenas algunos metros de ancho, que un gran río como el Amazonas, o un lago o embalse.

Las características de la cuenca hidrográfica también ayudan a determinar la selección de los parámetros por monitorear. Estos podrán ser diferentes en el caso de un curso de agua que drena una cuenca densamente poblada, que un curso que drena un área boscosa de alta montaña.

En la Tabla 8-20, se presentan los parámetros básicos para tener en cuenta de acuerdo con el objetivo de la campaña de monitoreo y de las características del cuerpo o de la corriente por monitorear.

Tabla 8-20. Parámetros básicos recomendados para el monitoreo de calidad del agua.

Variables in situ	Temperatura (C°), conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, caudal, nivel.
Físicos	Sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, turbidez.
Nutrientes	Nitrato, nitrito, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitrógeno orgánico, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo total.
Materia orgánica	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico.
Microbiológicos	Coliformes termotolerantes (antes fecales), coliformes totales, Escherichia coli.
Metales	Aluminio, arsénico, boro, cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio, zinc.
Iones principales, sales disueltas	Calcio, sulfato, magnesio, sodio, potasio, cloro, alcalinidad.

Fuente: (OMM, 2011).

Para un nivel espacial de mayor resolución, podrán ser necesarios otros parámetros, pero en tal caso, su monitoreo pasa a la responsabilidad de las entidades regionales y locales, o de los proyectos específicos de aprovechamiento. En estudios de impacto ambiental,

por ejemplo, la autoridad ambiental podrá exigir parámetros adicionales específicos al tipo de proyecto y a la composición proyectada de sus efluentes. En la Tabla 8-21 se propone el monitoreo de diferentes variables según uso del recurso hídrico.

Tabla 8-21. Parámetros para exigir por autoridades ambientales según uso del recurso (listado no exhaustivo).

Parámetro	CH ^t	R	P	RA	RP	E	FF	I ⁴	ALL ⁵	AS ⁵
Parámetros físico-químicos										
Alcalinidad	X	X								X
Aluminio		X	X							
Amoníaco	X						X			
Arsénico	X	X	X				X			
Bario	X						X			
Berilio		X					X			
Boro		X	X							
Cadmio	X	X	X				X			
Carbonato de sodio residual		X								
Cianuro	X						X			
Cinc	X	X	X				X			
Cloro total residual							X			
Clorofenoles							X			
Cloruros	X									
Cobalto		X								
Cobre	X	X	X				X			
Coliformes totales	X	X		X	X			X		
Coliformes fecales	X	X		X						X
Color	X									
Compuestos fenólicos	X			X						
Conductividad eléctrica		X							X	X

Parámetro	CH ^t	R	P	RA	RP	E	FF	I ⁴	ALL ⁵	AS ⁵
Parámetros físico-químicos										
Cromo hexavalente	X	X	X				X			
Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	X			X	X		X	X		X
Demanda química de oxígeno DQO	X			X	X		X	X		X
Difenilpoliclorados	X									
Dureza										X
Fenoles monohídricos							X			
Flúor		X								
Fosfatos totales	X			X	X			X		X
Fósforo total				X	X			X		
Grasas y aceites	X			X	X	X	X	X		
Hierro		X					X			
Litio										
Manganeso		X					X			
Material flotante y espumas	X			X	X	X		X		
Mercurio	X		X				X			
Molibdeno		X								
Níquel		X					X			
Nitratos	X		X						X	X
Nitritos	X		X							
Nitrógeno				X	X			X		
Olor y sabor						X	X			
Oxígeno disuelto	X			X	X		X	X		X
pH	X	X		X	X		X	X	X	X
Plaguicidas organoclorados ²							X			
Plaguicidas organofosforados ³							X			
Plata	X						X			
Plomo	X	X	X				X			
Radionucleidos	X	X								

Parámetro	CH ¹	R	P	RA	RP	E	FF	I ⁴	ALL ⁵	AS ⁵
Parámetros físico-químicos										
Relación de absorción de sodio RAS		X								
Salinidad efectiva y potencial		X	X							
Selenio	X	X					X			
Sodio (PSP)		X								
Sólidos totales	X						X			X
Sólidos totales en suspensión	X						X			X
Sólidos disueltos	X						X			X
Sulfatos	X								X	
Sulfuro de hidrógeno ionizado							X			
Sustancias tóxicas	X			X	X			X		
Temperatura							X	X		X
Tensoactivos	X			X	X		X	X		
Turbiedad	X						X			X
Vanadio		X								
Parámetros biológicos										
Macroinvertebrados bentónicos								X		
Macrófitos								X		
Perifiton								X		
Fitoplancton								X		
Zooplancton								X		
<p>1. Para aguas superficiales o subterráneas, no aplican para agua potable (criterios de salud).</p> <p>2. Plaguicidas organoclorados: PCBs, DDT y otros de amplio uso y/o peligrosos como alaclor, aldicarb, benomil, carbofurano, clorpirifos, clordano, 2.4-D, triazinas, hidrocarburos del petróleo, pentaclorofenol u otros que puedan analizarse mediante pruebas rápidas y específicas de inmunoensayo internacionalmente reconocidas.</p> <p>3. Plaguicidas organofosforados y/o carbamatos inhibidores de la acetilcolinesterasa.</p> <p>4. Se podrá exigir otros parámetros, a criterio de la autoridad ambiental y de acuerdo con el tipo de industria y/o vertimiento.</p> <p>5. Se incluyen aguas lluvias y aguas subterráneas, que, aunque no son usos del agua sino tipos de agua, son susceptibles de cualquiera de los usos de las demás columnas. Por tanto, estos son parámetros mínimos de caracterización, pero, en función del uso previsto, deben ser objeto de análisis de los parámetros que corresponda.</p> <p>CH: Consumo humano. R: Riego. P: Uso pecuario. RA: Recreación activa. RP: Recreación pasiva. E: Uso estético. FF: Preservación de fauna y flora. I: Uso industrial. ALL: Aguas lluvias. AS: Aguas subterráneas.</p>										

Fuente: (MAVDT & IDEAM, 2011).



8.2.1.5 Equipos

Los materiales y equipos por utilizar en la campaña de monitoreo de calidad del agua, deben estar relacionados en una lista de chequeo y co-

rresponder con los tipos de variables que van a ser determinadas; en la Tabla 8-22, se presentan los requerimientos mínimos de este tipo para la campaña de monitoreo.

Tabla 8-22. Materiales y equipos para el monitoreo de calidad del agua.

Materiales	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> • Mapas de la red de calidad del agua o puntos de monitoreo georreferenciados previamente seleccionados. • Libreta de campo. • Marcadores o rotuladores. • Cinta de enmascarar. • Bolsas. • Documentos (formato de captura de datos, etiquetas, cadena de custodia). • Dotación (guantes, botas de seguridad, chalecos, gorros, cascos). • Botellas de plástico y de vidrio previamente esterilizadas, de acuerdo con la Tabla 8-22. • Reactivos para preservar muestras, reactivos para análisis in situ. • Agua destilada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos de medición de variables in situ (conductividad, pH, T°, oxígeno disuelto) o multiparámetro. • GPS. • Cámara fotográfica. • Botellas muestreadoras (tipo Van Dorn o Kemmerer). • Bombas. • Baldes aforados. • Muestreadores múltiples. • Muestreador de oxígeno disuelto

Equipo multiparámetro

El equipo multiparámetro (Figura 8-123) posee una o varias sondas, las cuales son utilizadas para medir variables in situ; este medidor debe estar protegido frente a cambios de temperatura extremos durante las mediciones, ya que afectan la estabilidad del sistema electrónico y la exactitud de la medición. La calibración y verificación del equipo de acuerdo con sus manuales es la clave para lograr precisión en el dato.

Se recomienda, antes de realizar cualquier medición, verificar el equipo cuantas veces sea necesario,

sobre todo si se van a efectuar mediciones sucesivas o si se van a cambiar las condiciones medioambientales del lugar de muestreo (por ejemplo, visitar el mismo día dos sitios con características climáticas diferentes como Bogotá y Girardot). También es importante purgar los depósitos y la sonda con la muestra de agua objeto de análisis; por ejemplo, para medir la conductividad no se deben emplear muestras de agua anteriormente utilizadas.



Figura 8-123. Equipo multiparámetro, utilizado en campaña binacional 2017, Estación Carlosama.

Se deben tener en cuenta las condiciones de operación y uso de los equipos establecidos por el fabricante para garantizar un buen desempeño durante la medición. Es importante considerar lo establecido por los respectivos métodos de referencia, por ejemplo, en cuanto a sensibilidad de medición y resolución de lectura, para cumplir con los requerimientos y así proporcionar la validez del resultado.

• Otros materiales y equipos

La botella de Van Dorn: (Figura 8-124) está diseñada para obtener muestras a una profundidad de aproximadamente 2 m. En posición horizontal sirve para tomar muestras de fondo, en la interfaz sedimentos-agua.

El muestreador de Kemmerer: es uno de los más antiguos muestreadores verticales operados mediante cable mensajero. Se suele utilizar en masas de agua con profundidad de 1 m o superior. Existen muestreadores de Kemmerer (Figura 8-124) para volúmenes comprendidos entre 0.5 y 8 litros.

Los muestreadores múltiples: permiten tomar simultáneamente varias muestras de volumen igual o diferente en el mismo lugar. Cada muestra se recoge en una botella independiente. Cuando las muestras son de igual volumen, se puede obtener información sobre la variabilidad instantánea entre las muestras replicadas (Figura 8-124).

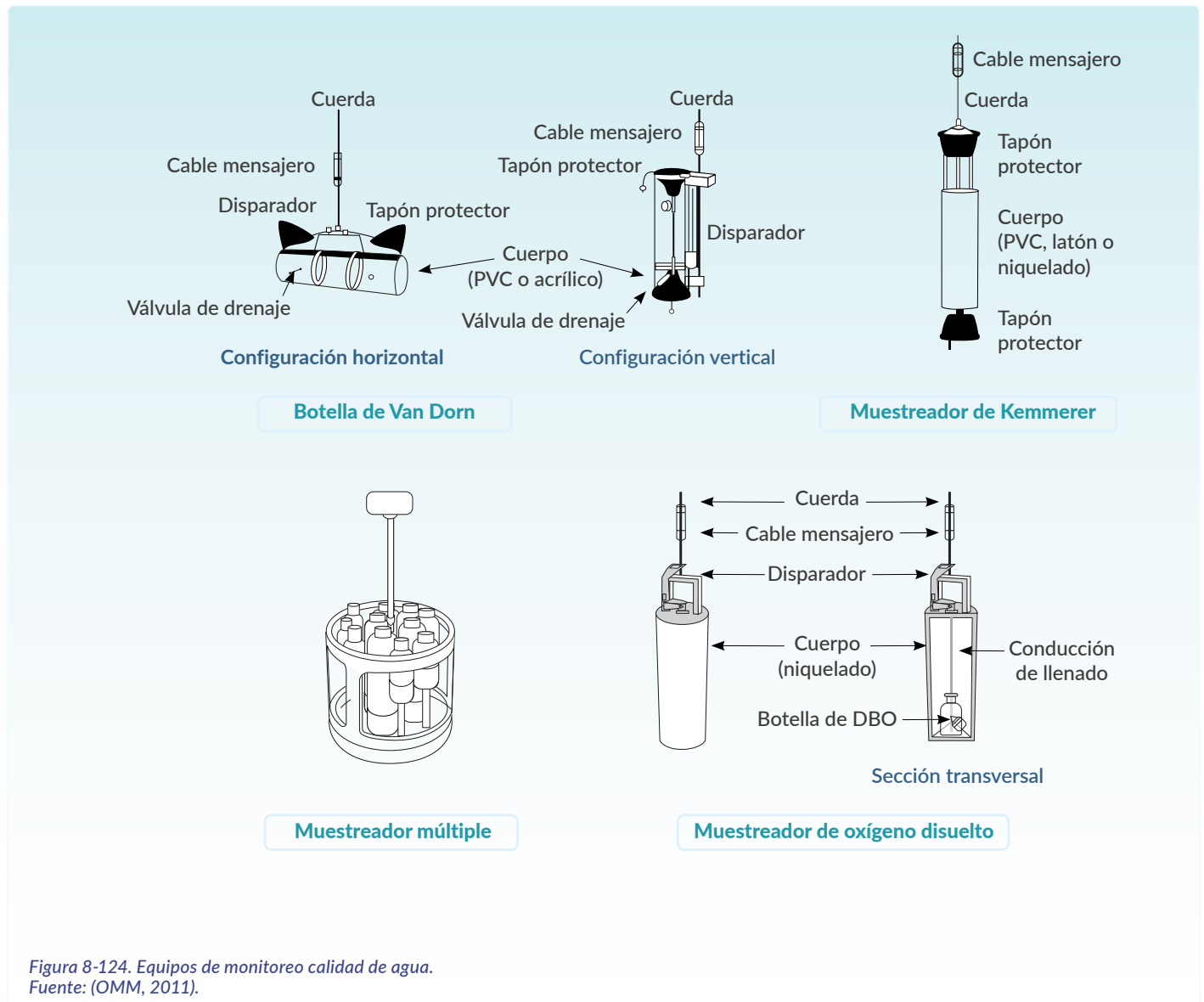


Figura 8-124. Equipos de monitoreo calidad de agua. Fuente: (OMM, 2011).

El equipo típico para medir la concentración de oxígeno disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): (Figura 8-124), también se puede utilizar en campo, el cual debe ser abierto para conseguir una mezcla con las capas de agua superiores; este tipo de muestreadores no es aconsejable para corrientes fluviales poco profundas. Para recolectar las muestras, se utilizan botellas de DBO₅, de boca

estrecha con obturadores de vidrio biselados, para evitar la retención de aire en las muestras.

8.2.1.6 Procedimiento para la toma de muestras

Antes de ejecutar la campaña de monitoreo es indispensable tener en cuenta la siguiente lista de chequeo:

- Plan de muestreo (debe describir la ubicación de los puntos de muestreo, número de muestras, tipo de muestra, muestras por tomar, entre otros).
 - Equipos verificados para la medición de parámetros in situ, teniendo en cuenta las cartas de control para verificación de equipos.
 - Reactivos para la toma y preservación de muestras.
 - Ubicación exacta de los puntos de monitoreo.
 - Documentación requerida (manuales, protocolos, formatos de campo, rótulos o etiquetas).
 - Neveras.
 - Botellas y recipientes previamente esterilizadas (tener en cuenta tipos de recipientes de acuerdo con las muestras por tomar).
 - Elementos o equipos de seguridad (planillas de seguridad social, uniformes, botiquín, entre otros).
 - Demás elementos necesarios de acuerdo con la programación previa de la campaña.
- Toma de muestras**
- Los procedimientos de muestreo dependen de las condiciones del sitio, tales como profundidad, velocidad, caudal y ancho del cauce. En campo, antes de iniciar con la toma de muestras, el personal debe estar equipado con los artículos de dotación correspondientes (botas de seguridad, chaleco, casco, guantes, máscara, entre otros), los equipos y materiales se deben encontrar previamente calibrados, esterilizados e identificados según las muestras que se van a tomar.
- Es importante inspeccionar el punto de monitoreo de tal manera que se cumpla con las condiciones de seguridad del personal y que se aseguren las actividades de monitoreo; tener en cuenta los siguientes aspectos:
- ♦ Antes de tomar las muestras, se deben seguir las indicaciones dadas por el laboratorio donde se van a realizar los ensayos y/o los métodos de ensayo correspondientes, entre esto se incluye el tipo de recipiente, si se debe o no realizar purga, o si el recipiente viene esterilizado en especial para toma de muestras microbiológicas o con algún pretratamiento.
 - ♦ Se recomienda identificar el tipo de muestra que se va a tomar (puntual, compuesta, integrada).
 - ♦ Recolecte cada una de las muestras por integrar en el menor lapso de tiempo posible, evitando que se genere turbulencia durante el proceso (esto ocasiona la pérdida de compuestos volátiles y semi volátiles), también evite las zonas de mayor turbulencia para la recolección de las mismas.
 - ♦ Durante la integración de las muestras, evite airearlas excesivamente, esta práctica podría incrementar la concentración de oxígeno disuelto y generar datos equivocados.
 - ♦ Si la toma de muestra es desde un puente, es recomendable ubicarse en el centro del puente, evitar la remoción de sedimentos del fondo del cauce, y en el momento de subir el balde, evitar raspar cualquier estructura con el fin de no contaminar la muestra.
 - ♦ Si la muestra se toma en una quebrada o río de poca profundidad para la medición de parámetros en campo, se recomienda tomarla directamente en el río o captar un volumen considerable de agua en un balde limpio, evitando hacer remoción del sedimento. Para el muestreo, es necesario coger la botella por debajo del cuello y sumergirla en dirección contraria al flujo de agua, evitando tener contacto directo al interior de la misma.

- ♦ La medición de parámetros in situ se realiza directamente del cuerpo de agua si las condiciones lo permiten, o, se capta un volumen considerable de agua en un balde limpio, de donde se tomarán las alícuotas necesarias para realizar la medición.
- ♦ En el caso de un muestreo integrado a profundidad se debe garantizar el uso de una embarcación, asegurando que no se presente desplazamiento por deriva, por corrientes o por acción del viento.
- ♦ Si se toman muestras a varias profundidades o en varios puntos para realizar una integración, se debe realizar la medición de las variables in situ a cada una de las profundidades o submuestras tomadas.
- ♦ Evitar hacer remoción del sedimento.
- ♦ Si la muestra se toma en aguas profundas, es recomendable utilizar botellas muestreadoras (Van Dorn, Kemmerer, Niskin, entre otras) por tener mayor capacidad volumétrica; son ideales para la obtención de muestras en el análisis de pigmentos fotosintéticos y contaminantes (pesticidas, metales pesados, etc.). Es importante abrir ambos extremos de la botella y asegurarlos para que no se cierren; luego de bajar la botella, esperar por lo menos un minuto para la estabilización, toma de muestra y cierre de la botella para luego subirla, depositar el agua en un balde, medir los parámetros in situ y tomar las muestras para su posterior análisis.
- ♦ En el caso de parámetros como grasas y aceites, la toma de muestras se debe realizar en la superficie del cuerpo de agua sin dejar rebosar el recipiente.
- ♦ En el caso de otros parámetros puntuales tales como acidez, alcalinidad, sulfuros, entre otros, la toma de muestras se debe realizar en la superficie del cuerpo de agua.
- ♦ Para las muestras microbiológicas, no se debe purgar el recipiente, tomar entre 100 ml y 250 ml en un envase estéril (o la cantidad solicitada por el método de referencia), llenar el recipiente hasta un 90 % de su volumen total dejando un espacio de cabeza de aire (aproximadamente 2.5 cm) para asegurar la correcta homogeneización; y cerrar inmediatamente evitando contacto con el aire del ambiente y posibles fuentes de contaminación cruzada.
- ♦ En las muestras microbiológicas, el espacio debe ser mayor para el correspondiente suministro de oxígeno para las bacterias.
- ♦ En el momento de la toma de muestra para la DBO_5 , el frasco debe llenarse totalmente en forma lenta para evitar así la formación de burbujas.
- ♦ En las muestras fisicoquímicas que necesitan preservación, tener en cuenta dejar un espacio de cabeza que permita dicho proceso.
- ♦ Para la mayoría de variables que requieren preservación con Ácido Clorhídrico (HCL), Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), Ácido Nítrico (HNO_3), entre otros, estos son utilizados para bajar el pH de la muestras a <2 Unidades de pH, lo cual puede lograrse generalmente, adicionando entre 1.5 a 2 ml del ácido concentrado por cada litro de muestra; no obstante, si sospecha que la muestra de agua es o posee tendencia alcalina, agregue más cantidad de ácido y verifique el pH, además, tenga en cuenta que si está analizando compuestos traza y la adición de ácido supera el 5 % del volumen de la muestra, es necesario anotarlo en la cadena de custodia para que en el laboratorio realicen las respectivas correcciones.
- ♦ Se debe realizar la correcta identificación de las muestras (etiqueta o rótulo), de manera clara y per-

durable, como mínimo con la siguiente información: fecha y hora de la toma de muestra, punto de muestreo, identificación inequívoca de la muestra (código), preservación, análisis por realizar y tipo de muestra.

- Las botellas de las muestras deben ser transportadas dentro de un contenedor adecuado, rígido, tipo nevera, donde se pueda refrigerar.

Medición de parámetros in situ

Si el sitio de muestreo corresponde a una estación hidrométrica, se debe anotar la lectura del nivel del limnómetro o limnógrafo, para posteriormente, con base en la curva de calibración de la corriente, calcular el caudal. Si la sección no corresponde a una estación, es importante realizar un aforo de caudal, para poder correlacionarlo con los parámetros de calidad (MAVDT & IDEAM, 2011).

Los parámetros de medición en campo in situ son pH, conductividad, temperatura del agua, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno. De acuerdo con las recomendaciones de la OMM (2011), la lectura de los valores debe ser de forma inmediata luego de ser tomada la muestra, ya que el valor puede variar durante el almacenamiento.

Sin embargo, siempre se deben tener en cuenta las indicaciones específicas en cuanto al tiempo de la medición y controles de aseguramiento de calidad de los respectivos métodos de referencia utilizados.

Estas mediciones deben registrarse de la misma manera en el *formato de registro de datos de campo* (Anexo 8-16), (Figura 8-125).



Figura 8-125. Verificación de equipos, toma de muestra y registro del parámetro in situ, estación hidrológica San Juan.

A continuación, se presenta una descripción para la medición de parámetros como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura de acuerdo con las recomendaciones de la OMM (2011):

- **Medición de pH**

En aguas naturales no contaminadas, el pH está controlado principalmente por el equilibrio entre el dióxido de carbono, los carbonatos y los iones de bicarbonato. La concentración de dióxido de carbono puede resultar alterada por los intercambios experimentados en la interfaz aire-agua y por los procesos de fotosíntesis y descomposición. Los cambios de pH se deben a lluvias ácidas, desechos industriales, drenaje de minas o lixiviación de minerales.

El pH es un importante criterio de calidad del agua, ya que afecta a la viabilidad de la vida acuática y a gran número de usos del agua. Dado que el pH depende de la temperatura, las mediciones deberán estar estrictamente asociadas a la temperatura de la muestra en el momento del muestreo. Idealmente, el pH se determinará in situ, mediante un medidor digital provisto de un electrodo combinado que permita medir al mismo tiempo la temperatura.

El pH puede determinarse también mediante colorimetría, utilizando indicadores de pH y soluciones tampón normalizadas para efectuar comparaciones visuales o colorimétricas. Este método suele ser menos preciso, y está limitado a aguas con bajo contenido de sustancias coloreadas y de escasa turbidez.

Sobre el terreno, el instrumento se debe calibrar antes de cada lectura mediante las soluciones tampón apropiadas, y siguiendo las instrucciones del manual. Se podrá ajustar la temperatura de las soluciones tampón y de los electrodos sumergiendo las botellas de solución y los electrodos en la muestra de agua.

Deberán tomarse precauciones para impedir que el agua penetre en las botellas de la solución tampón. Cuando los electrodos no se hayan utilizado recientemente o se hayan dejado secar durante varios días, podrían tardar de 10 a 20 minutos en estabilizarse.

El medidor estará protegido frente a cambios de temperatura extremos durante las mediciones, ya que estas afectan a la estabilidad del sistema electrónico y a la exactitud de la medición. Cuando se hayan almacenado en seco ensamblajes de electrodos durante largo tiempo, se empapará en una solución de ClK de 3 mol/l la membrana de vidrio durante 12 a 24 horas antes de su utilización.

Los medidores de pH pueden estar provistos de un recipiente de almacenamiento de probetas lleno de electrolito. Los electrodos de vidrio que no hayan sido acondicionados antes de su utilización podrían no estabilizarse adecuadamente y requerir una calibración frecuente.

Cuando el medidor de pH presente una deriva y la sonda haya sido almacenada y correctamente acondicionada, podría ser necesario rellenar la sonda con una solución de 3 mol/l de ClK. Si la deriva persistiese, se empapará el electrodo en hidróxido de amonio.

Como cualquier otro equipo, la sonda estará en todo momento protegida del barro y de las heladas, y durante su manejo se evitarán los movimientos bruscos.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad es un indicador de la concentración de iones de sales, ácidos y bases no orgánicos disueltos en el agua. La relación entre conductividad y concentración de sólidos disueltos suele ser lineal en la mayoría de las aguas naturales.

Es preferible medir la conductividad en el lugar de observación. Como esta depende de la tempera-

tura, el medidor deberá indicar un valor respecto de una temperatura de referencia (generalmente, 20 o 25 °C) o respecto de la temperatura de la muestra, esta deberá registrarse de manera simultánea. Es importante calcular y comparar la conductividad de la muestra en un momento de referencia determinado.

Antes de efectuar cualquier medición, se enjuagará varias veces los depósitos y la sonda con la muestra de agua. Para medir la conductancia específica no deberían utilizarse muestras de agua anteriormente utilizadas para medir pH, a fin de evitar que el ClK del electrodo de pH se difunda.

El instrumento se debe calibrar sobre el terreno antes de cada lectura. Se utilizarán las soluciones estándar de ClK cuya conductancia específica se aproxime más a los valores esperados en el lugar de observación.

El equipo para medir la conductividad será objeto de los mismos cuidados y operaciones de mantenimiento que cualquier otro instrumento sensible. Para asegurar la exactitud de las lecturas, se protegerá el medidor del barro, de los choques y de las heladas.

La exactitud de la medición dependerá del tipo de instrumento, de cómo haya sido calibrado este y del valor de conductividad real de la muestra.

Cuando se haya seleccionado y calibrado cuidadosamente el instrumento, será posible obtener una incertidumbre de ± 5 por ciento entre los 0 °C y los 40 °C, con compensación automática de la temperatura.

• Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto es importante para evaluar la calidad del agua superficial y para controlar el tratamiento de las aguas de desecho.

Hay dos métodos de medición del oxígeno disuelto: el primero se aplica in situ, mediante una sonda polarográfica o potenciométrica (oxímetro); el segundo

consiste en efectuar un análisis químico de Winkler. Con este último método, la adición de reactivos (solución de Mn^{++} y solución de yoduro básica) a la muestra al extraer esta permitirá fijar su oxígeno. Seguido se efectuará un análisis en laboratorio con una muestra conservada de la luz.

Hay otro método basado en el mismo principio: el método de Hach, basado en la utilización de reactivos predosificados. Como las concentraciones pueden variar notablemente durante el día, convendrá efectuar mediciones in situ.

Si se utiliza el método químico, se tomarán tres muestras de agua con el muestreador de oxígeno disuelto. Para medir la concentración de oxígeno disuelto en las muestras se utiliza un medidor de oxígeno disuelto o se efectúa un análisis químico de Winkler. El valor del oxígeno disuelto registrado será el promedio de, como mínimo, dos lecturas que difieran entre sí en menos de 0.5 mg/l.

En los métodos electroquímicos, la sonda responde a la actividad de oxígeno, no a su concentración. El agua dulce saturada de oxígeno arroja la misma lectura que el agua salada saturada de oxígeno a la misma presión y temperatura, aunque la solubilidad del oxígeno es inferior en agua salada. Por consiguiente, al efectuar el muestreo se habrá de tener en cuenta la salinidad, la temperatura y la presión atmosférica.

En el método Winkler, se producen interferencias cuando las muestras presentan un color o turbidez intensos, o contienen otras sustancias interferentes o fácilmente oxidables. Este método se utiliza mucho en laboratorio por su exactitud en la medición de concentraciones de oxígeno disuelto.

Podrá utilizarse el método de sondeo cuando la exactitud de los resultados sea de ± 0.5 a 1.0 mg/l del

valor real y sea suficiente para los fines del estudio. Cuando la muestra tenga una concentración relativamente elevada de oxígeno disuelto, la exactitud será adecuada, pero en algunos casos, se ha observado que la concentración de oxígeno disuelto es muy baja; en tales casos, será importante utilizar una sonda nueva y cuidadosamente calibrada.

- **Temperatura**

Para medir la temperatura pueden utilizarse numerosos tipos de termómetro. Los hay de alcohol tolueno, de mercurio, de cinta bimetálica o eléctricos. En esta última categoría se incluyen los termómetros de par termoeléctrico y otros menos portátiles, como los termistores, los termómetros de cuarzo o los de resistencia. Algunos medidores, como los utilizados para medir el oxígeno disuelto, el pH, el Eh o la conductividad eléctrica, pueden medir también la temperatura.

Antes de utilizar el termómetro, se enjuaga con una parte de la muestra de agua. Seguido, se sumerge en la muestra durante aproximadamente un minuto, o hasta que se estabilice la lectura. No se utilizará el termómetro en ninguna de las botellas de muestras que se envíen al laboratorio.

El valor se registrará en grados Celsius en la hoja de trabajo de campo. La exactitud de las mediciones de temperatura del agua no será, por lo general, superior a 0.1 °C. En muchos casos, sin embargo, será tolerable una incertidumbre de 0.5 °C, y en numerosas situaciones los datos estadísticos de temperatura se redondearán al grado Celsius más próximo. Será, pues, importante especificar los requisitos operacionales para seleccionar el termómetro más apropiado.

8.2.1.7 Control de calidad en campo

El control y aseguramiento de la calidad en campo son elementos esenciales para garantizar la validez de los resultados por obtener en los ensayos que serán realizados in situ y por los laboratorios a las muestras recolectadas. Además de los controles de calidad establecidos por el laboratorio donde se realicen los ensayos, se requiere de la presentación de blancos duplicados de muestra, testigos de temperatura, adicionados de campo, para constatar la pureza de los preservantes químicos, detectar la contaminación en recipientes de muestras, papeles filtrantes, equipo de filtración y cualquier otro equipo empleado en la recolección o manipulación de muestras, así como errores sistemáticos o casuales desde el momento en que se toma la muestra hasta el análisis. También, hay que recolectar réplicas de muestras para comprobar la reproducibilidad del muestreo. La oportunidad y la frecuencia de blancos y de réplicas de muestras se establecen en el diseño del proyecto. A continuación, se presentan algunos de los controles de calidad, sin embargo, se deben tener en cuenta los demás controles que sean solicitados por el laboratorio que va a realizar el análisis de las muestras o por las indicaciones de los métodos de referencia:

Blancos de recipientes

Antes de realizar una visita a campo, se debe tomar al azar uno de cada diez recipientes por usar en el muestreo, se llena con agua destilada ultra pura, se preserva de igual forma que las muestras de campo y se separa para su posterior envío con las otras muestras para su análisis químico como “blancos de recipientes”; de esta forma se podrá detectar cualquier contaminación generalizada que se haya producido durante el lavado.



Río Amazonas, Puerto Nariño
📍 Aura María Bustillo

Blancos de filtros

Si las muestras de agua son *filtradas en el campo* para determinar el componente disuelto de ciertos elementos de la calidad del agua, los filtros por utilizar deben encontrarse limpios o estériles, de ser necesario lavarse previamente en el laboratorio con una solución que pueda eliminar cualquier contaminante que afecte la precisión de la medición de la variable de interés. Justo después del lavado, los filtros deben ubicarse en cajas Petri de plástico para su transporte a campo. Los equipos de filtración, como los embudos, deben lavarse previamente en el laboratorio utilizando el mismo procedimiento y luego transportarse en bolsas de polietileno selladas.

Se debe preparar diariamente un *blanco de filtros*, pasar una muestra de agua destilada ultra pura a través de uno de los filtros previamente lavados en el equipo de filtración y conservarlo igual que las muestras de agua para su posterior envío al laboratorio para analizar la(s) variable(s) de interés.

Blancos de campo

Se deben preparar *blancos de campo* (se sugiere un blanco por cada diez muestras de agua) al concluir cada punto de muestreo; se llenan los recipientes de blanco para muestra con agua destilada o ultra pura, se les agrega el preservante de la misma forma que a las muestras de agua, se cierran los recipientes herméticamente y, por último, se transportan luego al laboratorio de igual forma que las muestras de agua.

Réplicas de muestras (alícuotas)

Las réplicas de muestras se obtienen al dividir una muestra en dos o más submuestras colectadas en condiciones lo más similares posibles. Esto se debe realizar periódicamente a fin de obtener la magnitud de los errores provocados por contaminación, errores

casuales y sistemáticos y cualquier otra variación que se haya producido desde el momento en que se toman las muestras hasta que llegan al laboratorio.

Adicionados de campo

Son usados para determinar la pérdida del analito de interés durante el muestreo y transporte hasta el laboratorio. Dado que el adicionado de campo a veces se prepara en el campo, esto puede conducir en errores por pérdida o por contaminación. Para eliminar este problema es aconsejable preparar en el laboratorio estos adicionados a blancos o a muestras similares, y luego transportarlos a lo largo del muestreo en los mismos recipientes que contienen las muestras.

Duplicados de campo

Se emplean para documentar la precisión. El valor de la precisión es función de la variación en la composición de la muestra, la variación en la técnica de muestreo y variación de la técnica analítica. Los duplicados de campo, se realizan tomando dos muestras bajo las mismas condiciones, se agrega el preservante adecuado de acuerdo con el analito de interés por evaluar y se transporta con las demás muestras.

En muestras con adiciones de concentración conocida de la(s) variable(s) de interés (adición estándar)

Al menos una vez en cada punto de muestreo se deben preparar muestras de control para cada variable medida. Es necesario agregar a cuatro alícuotas de una sola muestra, tres concentraciones diferentes conocidas de la variable de interés, dentro del rango de concentración que el método analítico utilizado sea capaz de medir o detectar. La información obtenida a través de estas muestras de control se utiliza para detectar cualquier error sistemático o sesgo en la metodología analítica, lo cual es muy importante para la interpretación de los datos (Pro-

grama de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] et al., 1994).

8.2.1.8 Cantidad de muestra

Los volúmenes de muestras en particular dependen del tipo y del número de parámetros objeto de estudio, del método analítico y de las concentraciones esperadas de los constituyentes en el agua. El personal de laboratorio es el encargado de determinar el volumen de muestra requerido; este volumen puede establecerse al hacer una lista de todos los parámetros que son conservados en la misma forma, totalizar el volumen necesario para la preparación y el análisis, multiplicar luego por dos para duplicar y por tres para triplicar los análisis.

Se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- El recipiente de la muestra debe llenarse completo cuando sea importante evitar el contacto con el aire.
- El recipiente no debe llenarse completo cuando sea necesario batir rigurosamente las muestras antes del análisis.
- Cuando se deban satisfacer los dos requerimientos anteriores, se debe llenar completamente la botella,

pero añadir unas piezas de un sólido inerte, limpio y esterilizado, como un anillo o reborde.

- Cuando la muestra contenga partículas discretas, como materiales no disueltos, bacterias y algas, es necesario un volumen de muestras mayor que el usual para minimizar errores.

En la mayoría de análisis físicos y químicos es necesario tomar dos litros de muestra, los cuales incluyen nitritos, sólidos, DBO_5 , detergentes, acidez, alcalinidad, color, etc. Así mismo, para análisis de DQO, nitratos y fósforo total resulta conveniente un envase plástico de 500 ml, preservado con ácido sulfúrico. En la determinación de metales totales se recomienda 500 ml de muestra, preservada con ácido nítrico.

Las muestras microbiológicas requieren un envase estéril de 250 ml y llenar el recipiente hasta un 90 % de su volumen total. Para el análisis de fósforo soluble, un frasco de 200 ml enjuagado con ácido clorhídrico HCl es el más recomendable.

Se recomienda coleccionar siempre un volumen de muestra suficiente en el recipiente adecuado, que permita hacer las mediciones de acuerdo con los requerimientos de manejo, almacenamiento y preservación (IDEAM, 2006).



Río Coello
■ Juan José Montoya

8.2.1.9 Preservación de las muestras

Luego de recolectar las muestras, se debe adicionar el preservante (Figura 8-126) de acuerdo con lo descrito en los respectivos métodos de referencia.

En la Tabla 8-23 se da una guía de preservación recomendada por el *Standard Methods*. Una vez preservada la muestra es necesario homogeneizar, verificar la preservación y cerrar bien el recipiente.



Figura 8-126. Preservación de muestras con ácido en Estación Pipiguay.

En la Figura 8-127, se observan algunas recomendaciones dadas por la OMM para el filtrado y preservación de las muestras.

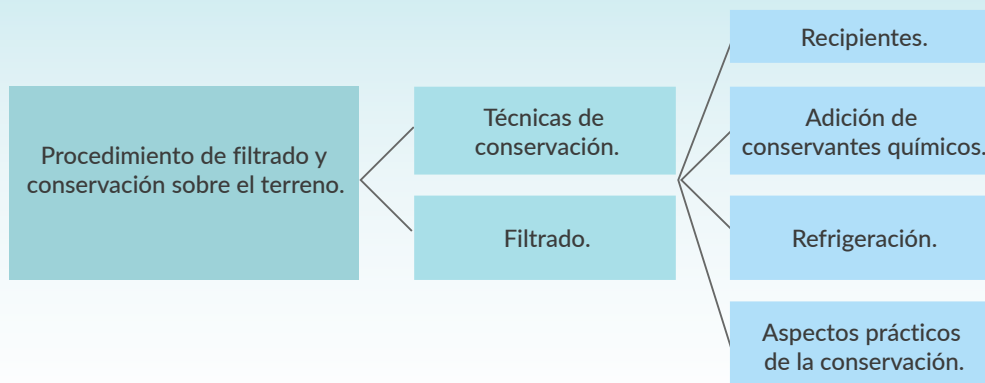


Figura 8-127. Recomendaciones para el filtrado y conservación de las muestras. Fuente: (OMM, 2011).

La OMM (2011), recomienda filtrar las muestras para separar la materia disuelta de las partículas; en el caso de metales, la muestra no se debe filtrar, sino que debe someterse a una digestión ácida en laboratorio para permitir la disolución de las partículas. Los filtros orgánicos (policarbonato, acetato de celulosa o teflón) son recomendados para sustancias minerales; en el caso de compuestos orgánicos, son convenientes los filtros de fibra de vidrio.

Filtración

La filtración⁸ se debe hacer en los siguientes casos y con los siguientes procedimientos:

- ♦ La filtración tiene por objeto separar las partículas disueltas y debe llevarse a cabo durante o inmediatamente después de la recolección de la muestra, conservando luego la muestra mediante un procedimiento aceptado.
- ♦ En caso de metales pesados no se debe hacer filtración de la muestra. Esta se someterá a una digestión completa en el laboratorio para convertir los metales compuestos en solubles en agua.
- ♦ En caso de análisis de constituyentes orgánicos, las muestras se deben filtrar inmediatamente después de su recolección mediante un filtro de fibra de vidrio o una membrana de metal. La muestra filtrada se destina al análisis de los constituyentes orgánicos disueltos, y la fracción de partículas atrapadas en el filtro se destina al análisis de partículas orgánicas.
- ♦ Para reducir la adsorción de sustancias disueltas en el material del filtro se puede usar filtros orgánicos

(policarbonato, acetato de celulosa) para sustancias minerales, y filtros de fibra de vidrio para compuestos orgánicos.

- ♦ Los filtros y los aparatos de filtración deben someterse a un tratamiento previo en laboratorio y lavarse o curarse antes de la filtración con los primeros 150 a 200 ml filtrados, que deben desecharse. Para crear el vacío en el equipo de filtración debe usarse una bomba manual o eléctrica. El vacío genera pérdida de dióxido de carbono, lo cual puede causar reducción en el pH de la muestra y la precipitación de algunos metales. Por esta razón y para reducir las pérdidas debido a la adsorción en las paredes del recipiente, es útil acidificar las muestras para metales.

Métodos de preservación

Para prevenir los efectos de los cambios físicos, químicos y biológicos que pueden ocurrir en la muestra desde el momento de la toma hasta su análisis en el laboratorio, es necesario aplicar medidas tales como las siguientes:

- ♦ Reducir lo más posible el tiempo entre la toma y el laboratorio.
- ♦ Realizar las mediciones directamente in situ, hasta donde el tipo de parámetro y la tecnología disponible lo permitan.
- ♦ Aplicar procedimientos de conservación a la muestra, tales como: mantenerlas en la oscuridad, adicionar conservantes químicos, bajar la temperatura para retardar las reacciones, congelar las muestras, extraerlas con diferentes solventes, usar una columna de cromatografía en campo, o mediante la combinación de estos métodos.

• Uso de recipientes apropiados

Es muy importante utilizar recipientes apropiados para mantener la integridad de las muestras, especial-

⁸ La OMM recomienda filtración y no centrifugación o decantación debido a que la centrifugación requiere de más equipo, y la decantación o sedimentación requiere de más tiempo, y ambos métodos no pueden ser fácilmente calibrados y pueden aumentar los riesgos de contaminación.

mente cuando la concentración de los componentes es baja. Las especificaciones suelen ser suministradas por los laboratorios.

Los recipientes son generalmente de plástico o de vidrio. El vidrio boro silicatado es inerte frente a la mayoría de los materiales, y es recomendable para recoger muestras destinadas al análisis de compuestos orgánicos. El polietileno es barato y adsorbe menos iones metálicos. Se utiliza para muestras destinadas a analizar componentes inorgánicos. No convendrá utilizar recipientes de polietileno para identificar componentes orgánicos como plaguicidas o ciertas sustancias volátiles capaces de difundirse a través de las paredes de plástico.

Para las muestras fotosensibles se necesitan recipientes de vidrio opaco o no actínico, para los gases disueltos se utilizarán botellas de boca estrecha con tapón de vidrio cónico.

Los recipientes destinados a muestras microbiológicas deberán poder resistir los procesos de esterilización. Para el seguimiento de elementos químicos se utilizará únicamente polietileno de baja o alta densidad.

Existen actualmente recipientes desechables. Estos deberán ser descontaminados antes de su utilización. Serán mantenidos durante no menos de 24 horas en una solución ultrapura de HNO₃ al 10 por ciento, aclarados después con agua ultrapura (18.2 MΩ) y conservados en bolsas de polietileno hasta su utilización en el lugar de observación (Pearce, 1991).

Los tapones de las botellas pueden entrañar dificultades. Los tapones de cristal pueden llegar a agarrotarse, especialmente si las muestras son alcalinas. Los tapones que no estén revestidos de teflón podrían dejar pasar sustancias contaminantes o absorber muestras vestigiales. Cuanto menor sea la

concentración de la especie estudiada en la muestra, más importantes serán estos aspectos.

• **Preservantes químicos**

Se utiliza este método para la mayoría de metales disueltos y herbicidas de fenoxiácido. Algunas muestras destinadas para análisis biológicos requieren también conservación química.

Por lo general, será preferible utilizar soluciones relativamente concentradas de agentes conservantes.

De este modo, las correcciones de la dilución de la muestra debidas al pequeño volumen de agente conservante serán pequeñas o insignificantes.

El conservante podría interferir en el análisis, por lo que convendría seguir cuidadosamente los procedimientos estipulados. Por ejemplo, un ácido puede alterar la distribución del material en suspensión y dar lugar a la disolución de coloides y partículas de metales. Por ello, será muy importante realizar el filtrado en primer lugar y luego la acidificación.

• **Congelación**

Cuando sea imposible efectuar un análisis en un plazo razonable, se recomienda congelar las muestras destinadas al análisis de los principales aniones, es decir, cloruros, sulfatos y nitratos. No se trata, sin embargo, de una técnica de conservación generalizada, ya que puede ocasionar cambios fisicoquímicos como, por ejemplo, la formación de precipitados o la pérdida de gases disueltos que podrían afectar a la composición de la muestra.

Además, la congelación y descongelación alteran los componentes sólidos de la muestra, por lo que podría ser necesario un retorno al equilibrio seguido de una homogeneización a alta velocidad antes de realizar el análisis. No convendrá nunca congelar muestras de agua en botellas de vidrio.

- **Refrigeración**

La refrigeración a 4 °C es una técnica de conservación común. En algunos casos, puede afectar a la solubilidad de ciertos componentes y provocar su precipitación. La refrigeración se utiliza en muchos casos en conjunto con la adición de conservantes químicos.

- **Aspectos prácticos de la preservación**

- Adoptar una rutina que asegure que todas las muestras que requieran preservación tengan el tratamiento inmediato, en especial en los casos de aditivos químicos que no produzcan un cambio fácilmente detectable en la apariencia de la muestra. En estos casos se recomienda marcar las muestras preservadas para asegurarse de que ninguna sea olvidada o doblemente tratada.

- Adoptar un procedimiento fácil de aplicación de los preservativos químicos, para reducir las posibilidades de error, contaminación o riesgos para la salud, aunque a veces resulte un poco más costoso. Por ejemplo: usar pipetas precalibradas y automáticas que faciliten el trabajo en campo; adicionar los preservativos directamente en el laboratorio antes de que los recipientes sean llevados a campo; usar frascos identificables con diferentes colores o etiquetas y debidamente sellados, que indiquen los preservativos que contienen, previamente medidos en el laboratorio.

En la Tabla 8-23, se encuentran las recomendaciones para el almacenamiento y preservación en el manejo de muestras.



Río Fonce
■ Juan José Montoya

Tabla 8-23. Recomendaciones para el almacenamiento y preservación en el manejo de muestras.

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, ml	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado	Almacenamiento máximo regulatorio ⁵
Acidez	P, V(B)	100	s	Refrigerar <6°C.	24 h	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigerar <6°C.	24 h	14 d
DBO ₅	P, V	1000	s, c	Refrigerar <6°C.	6 h	48 h
Boro	P (PTFE) o cuarzo	1000	s, c	HNO ₃ hasta pH<2.	28 d	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requiere.	28 d	28 d
Carbono orgánico total	V(B)	100	s, c	Analizar inmediatamente; o refrigerar <6°C y adicionar HCl, H ₃ PO ₄ o H ₂ SO ₄ hasta pH.	7 d	28 d
Cloruro	P, V	50	s, c	No requiere.	N.E.	28 d
Cloro residual total	P, V	500	s	Analizar inmediatamente.	0.25 h	0.25 h
Clorofila	P, V	500	s	Sin filtrar, guardar en la oscuridad a 6°C.	24 - 48 h	
				Filtrada, guardar en la oscuridad a -20°C.	28 d	
				(No almacenar en congelamiento).		
Dióxido de cloro	P, V	500	s	Analizar inmediatamente.	0.25 h	N.E.
Color	P, V	500	s, c	Refrigerar <6°C.	24 h	48 h
Conductividad específica	P, V	500	s, c	Refrigerar <6°C.	28 d	28 d
Cianuro:	P, V	1000	s, c	Analizar dentro de los primeros 15 min. Si la muestra va a ser almacenada, adicione NaOH, lleve a pH >12 y refrigere a ≤6°C en la oscuridad, adicione Tiosulfato si la muestra presenta cloro residual.	24 h	14 d; 24 h si presenta sulfuros.
Total						
Cianuro:	P, V	1000	s, c	Agregar 0.6 g de ácido ascórbico si tiene cloro y refrigere <6°C.	No almacenar; analizar inmediatamente.	14 d; 24 h si presenta sulfuros.
Disponible a cloración						
Fluoruro	P	100	s, c	No requiere.	28 d	28 d
Dureza	P, V	100	s, c	Adicionar HNO ₃ o H ₂ SO ₄ hasta pH<2.	6 meses	6 meses
Yoduro	P, V	500	s, c	Análisis inmediato.	0.25 h	N.E.

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, ml	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado	Almacenamiento máximo regulatorio ⁵
Yoduro	P, V	500	s, c	Análisis inmediato.	0.25 h	N.E.
Metales en general	P (A), V(A)	1000	s, c	Para metales disueltos filtrar inmediatamente, adicionar HNO ₃ hasta pH<2.	6 meses	6 meses
Cromo VI	P (A), V(A)	250	s	Agregar buffer de sulfato de amonio, lleve a pH de 9.3 - 9.7 como especifica el método 3500-Cr para extender a 28d, refrigere a ≤6°C.	28 d	28 d
Cobre por colorimetría ₁			s, c			
Mercurio	P(A), V(A), FP(A)	500	s, c	Adicionar HNO ₃ hasta pH<2, refrigerar a 6°C.	28 d	28 d
Nitrógeno:						
Amoniaco	P, V, FP	500	s, c	Analizar lo más pronto posible, o adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar a 6°C.	7 d	28 d
Nitrato	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar a 6°C.	48 h	48 h (14 d para muestras cloradas).
Nitrato + nitrito	P, V	200	s, c	Adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar a 6°C.	1-2 d	28 d
Nitrito	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible; refrigerar a 6°C.	ninguna	48 h
Orgánico, Kjeldahl	P, V	500	s, c	Refrigerar y extender a 28 d, refrigere a ≤6°C; adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH<2.	7 d	28 d
Olor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible; refrigerar a ≤6°C.	6 h	24 h (Manual EPA).
Grasas y aceites	V	1000	s	Adicionar HCl o H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar a ≤6°C.	28 d	28 d
Compuestos orgánicos (MBAS)	P, V, FP	250	S, c	Refrigerar a ≤6°C,	48 h	48 h según CFR 136.
Pesticidas (1)	V(S) duro (Pyrex o equivalente) color ámbar, tapa con forro PTFE (teflón)	1000	S, c, no colecte más de 1L de muestra.	Refrigerar a ≤6°C, agregar 1000 mg ácido ascórbico / L si es residual cloro presente (0.008% tiosulfato de sodio en CFR 136).	7 d	7 d hasta la extracción; 40 d después extracción.
Fenoles	P, V, tapa con forro PTFE (teflón)	500	S, c	Refrigerar a ≤6°C, agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2.		28 d hasta la extracción, 2 días después extracción.
Base-neutros y ácidos	V(S) Amber	1000	S, c	Refrigerar a ≤6°C. 008% de sodio tiosulfato en CFR 136 si el cloro está presente.	7d	7 d hasta la extracción; 40 d después extracción.

Determinación	Recipiente ²	Volumen mínimo de muestra, ml	Tipo de muestra ³	Preservación ⁴	Almacenamiento máximo recomendado	Almacenamiento máximo regulatorio ⁵
Oxígeno disuelto (electrodo y Winkler)	V, Botellas DBO ₅	300	S	Analizar Inmediatamente, la titulación puede realizarse después de la acidificación.	0.25 h, para titulación después de acidificación 8 h	0.25 h-8 h
Ozono	V	1000	S	Analizar inmediatamente.	0.25 h	N.S.
pH	P, V	50	S	Analizar inmediatamente.	0.25 h	0.25 h
Fosfato	V(A)	100	S	Refrigerar a ≤6°C. Para fósforo disuelto filtrar inmediatamente después de su recolección.	48 h	48 h según EPA manual para DW.
Fósforo total	P, V, FP	100	S, c	Agregar H ₂ SO ₄ llevar a pH<2, refrigerar a ≤6°C.	28 d	28 d
Sólidos (8)	P, V	200	S, c	Refrigerar a ≤6°C.	7 d	7 d
Sulfato	P, V, FP	100	S, c	Refrigerar a ≤6°C.	28 d	28 d
Temperatura	P, V, FP		S	Analizar inmediatamente.	0.25 h	0.25 h
Turbiedad	P, V, FP	100	S, c	Analizar el mismo día, almacene en la oscuridad hasta las 24 horas siguientes, refrigerar a ≤6°C.	24 h	24 h
Coliformes totales y fecales	V (Esterilizado)	200	s	Refrigerar a ≤6°C; agregar 0.2 ml de tiosulfato de sodio (Na ₂ S ₂ O ₃) al 3% para agua residual y crudas o 0.2 ml de tiosulfato de sodio (Na ₂ S ₂ O ₃) al 10% para agua potable.	24 h	24 h

1. Para determinaciones no enlistadas, use recipientes de vidrio o plástico; preferible refrigerar durante el almacenamiento y analice tan pronto como sea posible.

2. P: Plástico (polietileno o equivalente); V: Vidrio; V(A) o P(A): Enjuague con HNO₃ 1:1; V (B): Vidrio, Borosilicato; V(S): Vidrio, enjuagado con solventes orgánicos o llévelo al horno; F: Fluoropolímero; FP: Fluoropolímero (Politetrafluoroetileno (PTFE, teflón) u otro Fluoropolímero).

3. s: Simple; c: Compuesta.

4. Refrigerar: almacene >0°C, ≤6°C (por encima del punto de congelamiento del agua); en la oscuridad; analizar inmediatamente: Dentro de los primeros 15 minutos de la toma de la muestra.

5. Ver (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1992. Rules and Regulations. 40 CFR Parts 100-149). Para posibles diferencias respecto a los requisitos de los recipientes y preservación: NS: No mencionado en la referencia citada; stat: No se permite almacenamiento; analizar inmediatamente, dentro de los primeros 15 minutos de haber sido colectada la muestra.

6. Algunas matrices correspondientes a agua potable y aguas residuales tratadas pueden ser objeto de interferencia positiva como resultado de la preservación, si tal interferencia es demostrable, las muestras deben ser analizadas tan pronto como sea posible sin preservación. No retenga en una matriz específica por más de quince minutos (15) las muestras de cianuro, sin demostrar que es estable por largos periodos de tiempo.

7. Nota: Esta tabla pretende dar una guía solamente, si hay alguna discrepancia entre esta tabla y el método específico, la información del método tiene prioridad. Si ejecuta el método para propósitos de cumplimiento, tenga en cuenta que puede existir requisitos adicionales de preservación y tiempo de espera. De ser así, los requisitos reglamentarios deben ser acatados.

9. Humedezca el papel indicador de yoduro de potasio-almidón, con una solución tampón de acetato pH 4. Si el papel se torna de color azul o púrpura, el resultado es positivo para agentes oxidantes.

Fuente: (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd ed (APHA et al., 2017).



Río Magdalena
Oscar Martínez

8.2.1.10 Precauciones para evitar contaminación de muestras

La calidad de los datos generados por un laboratorio depende principalmente de la integridad de las muestras que ingresan a él. Por consiguiente, el investigador de campo debe tomar las precauciones necesarias para impedir su contaminación y deterioro. Dado que existen muchas fuentes de contaminación, se deben tomar algunas precauciones:

- La porción de muestra debe ser representativa y de fácil transporte, evitar monitorear cerca a vertimientos o afectaciones puntuales, en su lugar ubique el sitio de muestreo mínimo 50 m aguas abajo de dicha intervención.
 - La muestra debe preservarse inalterada durante todo su ciclo, desde la toma, preservación, transporte, análisis y disposición final, de tal manera que represente las características fisicoquímicas o microbiológicas de la fuente monitoreada.
 - Para muestras que contienen compuestos orgánicos, no utilice recipientes de plástico (contienen esteres de ftalato), excepto los que estén fabricados de polímeros fluorados, como el politetrafluoroetileno (PTFE). Algunos analitos pueden ser absorbidos en las paredes de los recipientes de plástico o los contaminantes de estos pueden liberarse en las muestras.
 - No utilice vidrio blando para la recolección de muestras, este libera silicio, sodio y boro, los cuales son elementos con tendencia a reaccionar de forma rápida en presencia de otras sustancias, debido a que nunca se les encuentra como elemento libre.
 - Los recipientes para recolecta y almacenamiento de las muestras deben estar libres de revestimientos de plástico o forros de papel. De ser necesario, utilice tapas con revestimiento de aluminio (excepto para análisis de metales y muestras muy ácidas o muy alcalinas) o politetrafluoroetileno (PTFE).
- Si durante el muestreo se presenta lluvia, es importante anotarlo en la cadena de custodia, debido a que un mayor flujo de agua en la fuente hídrica que se está estudiando, puede ocasionar dilución de los analitos de interés (sobre todo para compuestos traza) y estos pueden no detectarse, aun cuando se ha seguido detalladamente las instrucciones de monitoreo.
 - En el momento de recolectar la muestra, se debe evitar remover el sedimento o el material del fondo del cuerpo de agua, lo que podría cambiar las condiciones de la matriz, al aportar sedimentos, turbiedad, materia orgánica u otros elementos o sustancias químicas.
 - No exponga la muestra a la radiación directa del sol, esto puede ocasionar que se aceleren los procesos de conversión o degradación química alterando los compuestos de la misma.
 - Durante el proceso de preservación siga las indicaciones de la Tabla 8-23; los ácidos, tienen características y composición diferente, por ejemplo, el ácido nítrico (HNO_3), posee átomos de nitrógeno (N), los cuales pueden generar interferencia positiva, al aumentar la concentración de los análisis para compuestos que también contengan el elemento nitrógeno (N), ejemplo: nitrito (NO_2), nitrato (NO_3), nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$), entre otros. Por otro lado, el uso de las capacidades oxidativas y de preservación establecidas para cada tipo de ácido, han sido estandarizadas por medio de métodos normalizados; por lo que una desviación de este tipo de directrices, podría afectar significativamente los resultados.

- Las técnicas de preservación deben ejecutarse obligatoriamente, recuerde que estas solo retrasan los cambios químicos y biológicos que inevitablemente continúan después de la recolección de las muestras.
- Las muestras deben permanecer refrigeradas, así estén o no preservadas, las bajas temperaturas inhiben la actividad biológica, la cual es responsable de gran parte de los cambios en la composición de la muestra por actividad metabólica o lisis celular.
- Algunos tipos de análisis de laboratorio, requieren la implementación rigurosa de requerimientos particulares de toma de muestra, los cuales son exigidos por el método estandarizado y de obligatorio cumplimiento, verifique si dentro del grupo de muestras que debe recolectar se encuentran algunas variables con requerimientos específicos de monitoreo, los cuales deben ser atendidos para evitar la pérdida, degradación o contaminación de la misma, algunos ejemplos son las muestras que se recolectan para análisis de ciertos contaminantes (plaguicidas y metales pesados), microbiológicos (coliformes y E. coli), grasas y aceites, entre otros.
- Las mediciones en campo siempre deben realizarse en una submuestra separada, la cual es descartada al finalizar la medición. Nunca deben hacerse en la misma muestra de agua que se entrega al laboratorio para su análisis químico.
- Los recipientes (nuevos o usados) para la extracción de muestras, deben limpiarse de acuerdo con las indicaciones de los métodos recomendados (Tabla 8-23).
- Solo se debe usar el tipo de recipiente recomendado para cada tipo de variable (Tabla 8-23).
- Los frascos para muestras de agua solo se deben usar para tal fin. Los recipientes que hayan sido utilizados en el laboratorio para almacenar reactivos concentrados nunca deben emplearse como recipientes para muestras.
- Antes de ser utilizados en campo, se deben controlar todos los preservantes y el material de vidrio para asegurar que estén perfectamente limpios.
- Se deben usar los métodos de preservación recomendados por los métodos de referencia. Todos los reactivos deben ser como mínimo de pureza analítica, a menos que el método indique algo diferente; normalmente son provistos y certificados por el laboratorio de análisis o por el fabricante del reactivo.
- Se deben usar los métodos de preservación recomendados. Todos los conservadores deben ser de pureza analítica; normalmente son provistos y certificados por el laboratorio de análisis.
- Cuando se preservan muestras, la forma de evitar la posibilidad de agregar el preservante incorrecto o que los preservantes se contaminen entre sí, es preservando juntas todas las muestras que utilicen el mismo tipo de preservación.
- Se puede usar una película de teflón o papel de aluminio lavado con solvente, para evitar que las tapas de los recipientes contaminen las muestras de agua por examinar, con el objetivo de determinar compuestos orgánicos.
- No se debe tocar la parte interior de los recipientes para muestras o de sus tapas con las manos descubiertas, ni con guantes.
- Los recipientes para muestras deben guardarse en un ambiente limpio, libre de polvo, gases, suciedad y basura. La limpieza de los vehículos es un factor importante para evitar problemas de contaminación.
- Los productos derivados del petróleo (gasolina, aceite, gases de escape) constituyen una fuente principal de contaminación. Los derrames o goteos (que suelen

producirse en los botes) deben limpiarse inmediatamente. Los gases de escape y el humo del cigarrillo pueden contaminar las muestras con plomo y otros metales pesados. Los equipos de aire acondicionado también constituyen una fuente de contaminación por metales traza.

- Los filtros y demás aparatos deben permanecer limpios; es necesario lavarlos con ácido o remojarlos en soluciones especiales y ser envueltos en papel de aluminio enjuagado con solvente.
- Los recipientes esterilizados deben mantenerse en ese estado hasta que se recolecte la muestra. Si el papel esterilizado ultra fuerte o el papel de aluminio se han perdido o si la tapa se ha roto, el recipiente debe descartarse.

8.2.1.11 Cadena de custodia

Luego de tomar la muestra en campo, se debe diligenciar la cadena de custodia, lo cual permite la identificación correcta de la muestra y que el error en el propósito de análisis del parámetro sea mínimo.

La información básica que debe ir registrada en este documento de campo corresponde a:

- Nombre de la campaña de monitoreo.
- Nombre de la entidad que realiza la campaña de monitoreo.
- Nombre de la persona quien toma las muestras.
- Nombre o código del punto de monitoreo.
- Tipo de corriente.
- Fecha y hora de muestreo.
- Número y tipo de envases por punto de muestreo.
- Método de preservación de la muestra.
- Parámetro por analizar con la muestra.
- Observaciones de campo en el momento de la toma de la muestra.

8.2.1.12 Almacenamiento y transporte de muestras

Los recipientes deben almacenarse dentro de las neveras con el debido cuidado, de tal manera que no se rompan, que no queden expuestos a la luz directa y se evite la contaminación cruzada (Figura 8-128).



Figura 8-128. Mantenimiento de la refrigeración de las muestras con hielo en estación hidrológica San Juan.

Las neveras se deben encontrar debidamente selladas para el traslado de las muestras de acuerdo con los tiempos de almacenamiento sugeridos en la Tabla 8-23, o según lo recomendado por el respectivo método de referencia.

Para las muestras que requieren de refrigeración, en la nevera se debe incluir hielo o pilas refrigerantes (no utilizar hielo seco), asegurando que no ocurra congelamiento de las mismas.

Para garantizar la cadena de frío durante el almacenamiento y el transporte se debe incluir un testigo

de temperatura dentro de cada nevera que permita realizar el seguimiento de la misma.

El tiempo de transporte y almacenamiento de las muestras nunca deberá exceder el tiempo regulatorio del análisis establecido por el método de referencia, cuando no sea posible cumplir con los tiempos establecidos por condiciones adversas, las partes interesadas deberán evaluar y dejar por escrito la pertinencia del análisis. Adicionalmente deberá ser reportado en el informe que emita el laboratorio que realiza los análisis.



8.2.2 Monitoreo de comunidades hidrobiológicas

Los recursos hídricos del país contienen una importante diversidad de organismos acuáticos agrupados en comunidades acuáticas de fitoplancton, zooplancton, algas perifíticas, diatomeas, macroinvertebrados acuáticos y plantas acuáticas que sirven como indicadores hidrobiológicos de la calidad del agua.

A diferencia de los parámetros físicos y químicos, las comunidades de organismos proveen información integral sobre el estado del medio en las últimas semanas o meses dependiendo de su ciclo biológico (Li et al., 2010). Permiten descubrir cambios producidos a lo largo del tiempo, ya que los organismos vivos presentan adaptaciones evolutivas a unas determinadas condiciones ambientales y tienen unos límites de tolerancia a las diferentes alteraciones de las mismas, lo que admite tener una cierta visión histórica de los acontecimientos ocurridos en un período de tiempo, en función de la dinámica de las comunidades biológicas presentes (Álvarez, 2005). Los indicadores biológicos que se consideran para evaluar el estado ecológico de los ecosistemas acuáticos son flora acuática (fitoplancton, perifiton y plantas acuáticas), fauna invertebrada bentónica y fauna ictiológica.

Usar un conjunto de diferentes especies de estos organismos, como indicadores biológicos, proporciona una evaluación integral de las condiciones ambientales, las cuales son altamente variables en los cuerpos de agua (Stevenson et al., 2010 en Smol & Stoermer, 2010). Con la presencia-ausencia de estos organismos se pueden calcular índices bióticos, que son sistemas de clasificar la calidad del agua otorgando una puntuación. Los métodos biológicos, nunca excluyentes de la calidad fisicoquímica, son

relativamente sencillos, rápidos y de bajo costo, lo que los hace idóneos para el monitoreo, vigilancia y control de las cuencas hidrográficas (Álvarez, 2005).

Las principales ventajas por las cuales se consideran los organismos vivos como buenos indicadores de la calidad del agua (Álvarez, 2005) y elementos fundamentales para la determinación del estado de los ecosistemas acuáticos son las siguientes:

- Los datos biológicos responden a situaciones, no a variables únicas. Es más una respuesta sintética que analítica.
- Los índices biológicos dan testimonio del impacto contaminante durante un período de tiempo más o menos largo, no solo del momento de la toma de muestras.
- La toxicidad de los contaminantes se estima por sus efectos biológicos, no por su concentración en el agua.
- Permiten la evaluación detallada de la capacidad de respuesta del medio (magnitud del impacto y recuperación).
- Menores costos del seguimiento biológico en comparación con el fisicoquímico, si el número de contaminantes es elevado.
- Los resultados del análisis biológico son fáciles de expresar y de interpretar, son prácticos y sencillos.

En el ámbito global, las comunidades bióticas son ampliamente reconocidas para monitorear las condiciones del medio acuático, por lo que se desarrollaron normativas de aplicación nacional o internacional que garantizan el seguimiento de un mismo protocolo, como es el caso de las directivas que cubren el entorno europeo (Comisión Europea, 2000). En Colombia, se realizaron algunos estudios dirigidos al desarrollo de indicadores de la calidad del agua, por ejemplo: (Díaz & Rivera, 2004), (Pinilla, 2010), (Riss et al., 2002), (Roldán, 2016) y se han propuesto algu-

nos protocolos para la colecta de muestras bióticas, como (Rueda, 2002) y Prácticas de Limnología: guía de campo y laboratorio (Pinilla, 2017).

No obstante, estas aproximaciones no están integradas en un mismo marco de procedimientos que permita recopilar información de manera sistemática y procesarla para analizar comparativamente la calidad del agua en todo el país. De acuerdo con esto, este protocolo constituye un primer paso en la necesaria unificación de metodologías orientadas a conocer la biodiversidad acuática, lo que permitirá en el futuro, análisis comparativos en el desarrollo de herramientas más complejas (responden a la funcionalidad de los ecosistemas) como índices e indicadores ajustados a la realidad de los ecosistemas acuáticos del país.

Alcance taxonómico

La calidad de la información colectada depende de la aplicación rigurosa de los procedimientos y la experticia en taxonomía de los analistas encargados del procesamiento de las muestras.

El trabajo de identificación debe realizarlo personal especializado, con una alta formación acreditada y experiencia comprobada. Para identificar muestras de referencia, procurar apoyo de expertos (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014).

Por otro lado, el muestreo debe contar con los respectivos permisos de colecta y de traslado de especímenes (Decretos 3016 de 2016, 1076 de 2015 y 309 de 2000 o en aquellos que los modifiquen o sustituyan); el material colectado se debe depositar en colecciones registradas ante el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Decreto 1375 de 2013 o en aquel que lo modifique o sustituya).

8.2.2.1 Recomendaciones generales para el monitoreo de las comunidades hidrobiológicas

Antes de comenzar el trabajo de campo es importante conocer el área donde se van a realizar los muestreos y para ello se utilizan herramientas tales como: bibliografía, mapas e imágenes satelitales del lugar. Esto permite realizar un trabajo más rápido y eficiente, reduciendo así el costo tiempo-esfuerzo (Darrigan et al., 2007).

Roles y responsabilidades

El monitoreo hidrobiológico requiere contar con equipos de trabajo que se encarguen de diferentes roles y responsabilidades:

- **Coordinador de campo y laboratorio**

Cumplirá la función de director técnico responsable de hacer seguimiento de los aspectos relacionados con la parte operativa, técnica y locativa.

- **Coordinador operativo y de sistemas de gestión**

Coordina las diferentes actividades operativas y de los sistemas de gestión en seguridad industrial, salud ocupacional y ambiente tanto en campo como en laboratorio, así como del aseguramiento del sistema de gestión de calidad.

- **Asistente de laboratorio y campo**

Brinda soporte técnico al equipo de trabajo en las actividades administrativas, operativas y de gestión del sistema de gestión de calidad y del sistema de gestión de seguridad industrial, salud ocupacional y ambiente.

Es necesario que el personal que va a ejecutar el muestreo cuente con la suficiente experiencia y debida competencia técnica. Al personal es necesario darle una inducción sobre las actividades por realizar y las normas del sistema de gestión integrado de la organi-

zación que incluya la gestión de la calidad, ambiental, de la seguridad y salud en el trabajo. Para proceder a autorizar dicho personal, se debe hacer una evaluación de la inducción o capacitación.

Siempre que sea posible y dependiendo de los objetivos del proyecto, cada profesional temático debe recolectar sus propias muestras, gran parte del valor de un profesional experimentado radica en las observaciones personales que hace de las condiciones de campo y en su capacidad para registrarlas (APHA et al., 2017).

Formatos

Toda actividad de campo y laboratorio debe responder a una secuencia de calidad que garantice el óptimo procedimiento desde la toma de muestras hasta el análisis en laboratorio y entrega final de resultados. Parte fundamental de este proceso son el alistamiento, llenado y entrega de los formatos correspondientes (Tabla 8-24).

Tabla 8-24. Listado de formatos para el muestreo y procesamiento de las comunidades hidrobiológicas.

Formatos	En campo	En laboratorio
	Protocolo de muestreo.	Protocolo de análisis de laboratorio.
	Plan de muestreo (Anexo 8-17).	Custodia de entrega de muestras a analistas.
	Ficha descriptiva estaciones de muestreo.	Registro de uso de equipos ópticos.
	Formato reporte de campo.	Registro de uso de equipos de sedimentación y conteo.
	Formato cadena de custodia ingreso muestras.	Registro taxonómico y número de organismos (Anexo 8-19).
	Formato calibración de equipos.	Registro fotográfico.
	Formato reporte de campo fisicoquímico.	Registro de transformación de datos (fórmulas de conteo).
	Formato solicitud de análisis y cadena de custodia.	
Procedimiento general actividad de campo.		

Fuente: (UJTL, 2018).



Afluente al río Quindío, Valle del Cocorá - Salento
Richard Muñoz

Cadena de custodia

Los formatos de captura de información de campo y laboratorio deben estar diseñados y diligenciados para garantizar la integridad de la muestra desde su recolección hasta que se genere el informe de los resultados.

El formato debe permitir el rastreo de la tenencia y el manejo de la muestra desde el momento de la recolección, seguido por el análisis hasta la disposición final de la misma. Este proceso se conoce como cadena de custodia y se requiere para demostrar el control de la muestra; es particularmente útil cuando los datos se colectan para ser usados por las autoridades ambientales, para la regulación o para resolver un litigio. Los procedimientos de cadena de custodia son útiles para el control de rutina de las muestras.

Un formato de captura de datos debe acompañar cada muestra o grupo de muestras. El registro incluye como mínimo la siguiente información: campo para la asignación del código de muestra o identificación exclusiva de la muestra; firma del colector; fecha, hora y ubicación geográfica de la recolección; tipo de muestra; requisitos de preservación de la muestra, nivel de la corriente, observaciones del entorno y de las condiciones ambientales; campo para registrar la información correspondiente al envío de la muestra al laboratorio.

Adicional, es necesario registrar las firmas de las personas involucradas en la cadena de custodia de la muestra e incluir las fechas de custodia, así como un espacio para observaciones.

Estas observaciones podrían constituir una ficha descriptiva del sitio, en la que se haga una descripción general, con la ubicación exacta, incluyendo los datos de las variables fisicoquímicas medidas, vegetación

circundante, condiciones climáticas, presencia de animales y cultivos cercanos al área, entre otros; también puede dibujar el punto señalando referencias de ubicación clave, como carreteras y calles, un registro de fotografías panorámicas y detalladas del lugar de colecta, así como de cada uno de los procedimientos realizados en campo durante la toma de las muestras.

Condiciones ambientales recomendables

Las condiciones ambientales requeridas durante el muestreo son aquellas que no atenten contra la seguridad del personal. Se sugiere suspender la toma de muestras frente a amenazas ambientales como crecidas de ríos, lluvias torrenciales y/o tormenta eléctrica (UJTL, 2018). Asimismo, no son recomendables para muestreo los bancos empinados o inestables y fondos de río (AQEM CONSORTIUM, 2002).

Preparación de materiales

Antes del trabajo de campo se deben preparar los reactivos para la preservación de las muestras, revisar que los equipos se encuentren en óptimas condiciones para ser operados; en caso de no cumplir con los criterios de verificación, se debe informar al personal encargado. De ser necesario, efectuar un mantenimiento rápido o cambiar las baterías puede ser suficiente; si el problema persiste, es necesaria la consecución de otro equipo.

También, se debe verificar la disponibilidad, estado actual y limpieza de los materiales, con los que se va a trabajar, por ejemplo, las redes y los elementos de protección personal para campo. La elección del tipo, tamaño y número de los recipientes requeridos para las colectas, depende de cada comunidad biológica.

Alcance taxonómico

La calidad de la información colectada no solo dependerá del seguimiento riguroso de los procedimien-

tos, del correcto uso y estado de los equipos ópticos (microscopio tradicional e invertido y estereoscopio), sino principalmente de la experticia en taxonomía de los analistas encargados del procesamiento de las muestras.

El trabajo de identificación debe realizarlo personal especializado, con una alta formación acreditada y experiencia comprobada. Para identificar muestras de referencia, procurar apoyo de expertos (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014).

Etiquetado

Las etiquetas para la identificación de los recipientes en los que se van a coleccionar las muestras, deben elaborarse de manera que sean resistentes a la humedad y garantizar que permanezcan legibles, deben incluir como mínimo la siguiente información:

- ♦ Comunidad hidrobiológica muestreada.
- ♦ Fecha de colecta.
- ♦ Ubicación geográfica o sitio de muestreo.
- ♦ Tipo de muestra.
- ♦ Modo de preservación.
- ♦ Colector.

Queda a criterio del personal de campo si llevan los recipientes con sus etiquetas impresas o si las diligencia en el sitio de muestreo.

Registro fotográfico

Tomar fotografías panorámicas y detalladas del lugar de colecta, así como de cada uno de los procedimientos realizados en campo durante la toma de las muestras.

Transporte

Las muestras deben ser guardadas en neveras portátiles (plásticas y/o icopor) con tapa hermética, debidamente rotuladas y protegidas de la luz, asegu-

rando que se guarden las muestras de forma que no se presenten fugas.

Recepción

Las muestras serán recibidas en las instalaciones del laboratorio para su posterior análisis.

- ♦ Verificar el diligenciamiento completo de los formatos de campo y la cadena de custodia.
- ♦ Revisar el estado de la nevera y de los envases donde han sido recolectadas las muestras.
- ♦ Verificar que los recipientes han sido los adecuados para la recolección de las muestras y el etiquetado es correcto.
- ♦ Cotejar que el volumen recolectado es el indicado en los formatos de campo y/o que es el necesario para llevar a cabo el análisis solicitado.
- ♦ Verificar una a una la preservación de las muestras.
- ♦ Proceder a identificar con el número único del laboratorio todas las muestras recolectadas en una misma estación.
- ♦ Registrar cualquier novedad que se presente con las muestras.
- ♦ Archivar la documentación en las carpetas respectivas.
- ♦ Disponer las muestras de forma organizada en los estantes y/o neveras destinados para tal fin.
- ♦ Continuar con la cadena de custodia de las muestras.

8.2.2.2 Organismos planctónicos

El plancton es la comunidad de organismos microscópicos o de tamaño muy pequeño que se encuentra en suspensión en el medio líquido. Estos organismos son independientes de los hábitats costeros y bentónicos, se encuentran a merced de las corrientes y movimientos de la columna de agua

(Pinilla, 2017). El plancton está compuesto principalmente por bacterias acuáticas (bacterioplancton), hongos acuáticos (micoplancton), microalgas (fitoplancton) y microfauna (zooplancton). La comunidad planctónica es característica de ambientes lénticos (de aguas quietas), pero es posible encontrarlo en las zonas de menor velocidad de los ecosistemas lóticos (de aguas corrientes), donde se denomina potamoplancton (Pinilla, 2017).

Fitoplancton

Los organismos fitoplanctónicos (Figura 8-129) son organismos microscópicos que se encuentran suspendidos en la columna de agua de ecosistemas lénticos tales como: lagos, lagunas, ciénagas, humedales e incluso ríos no vadeables que tienen un flujo muy lento u otros ecosistemas artificiales como estanques y embalses.

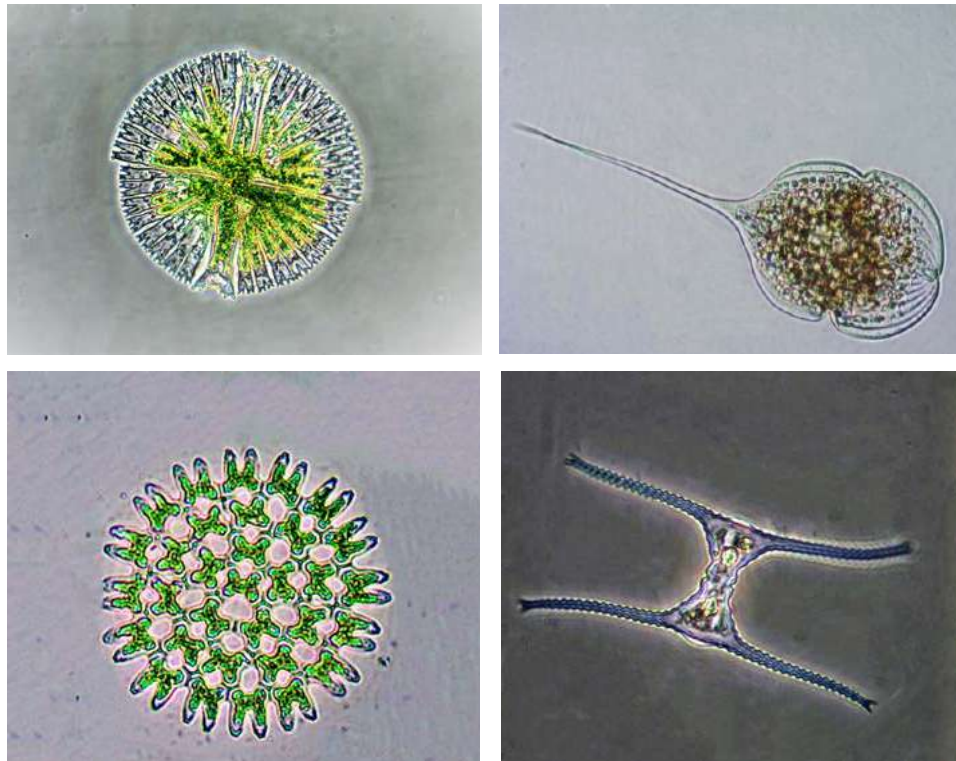


Figura 8-129. Algunas especies de Fitoplancton A: *Phacus* sp. B: *Micrasterias* sp. C: *Pediastrum* sp. D: *Staurastrum* sp.

Las algas fitoplanctónicas pueden ser unicelulares, coloniales, o formas filamentosas con un ciclo de vida corto que les permite responder muy rápido a los cambios ambientales (John et al., 2011); (Bellinger & Sigee, 2015); (Whitton & Potts, 2000).

Se han utilizado ampliamente como indicadores de la calidad del agua, algunas especies que se encuentran en ambientes muy enriquecidos por nutrientes mientras que otros son muy sensibles a vertimientos químicos u orgánicos. Algunas especies pueden desa-

rollar un crecimiento excesivo en ciertas condiciones que se denominan floraciones o *Bloom*, estos florecimientos pueden generar olor, sabor, condiciones anóxicas o toxicidad causando incluso la muerte a mamíferos y el hombre (Whitton & Potts, 2000). Por lo tanto, es necesario su monitoreo constante en cuerpos de agua que se utilicen para diversas actividades como el consumo o preservación de la flora y fauna.

Los métodos propuestos en este protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos tales como: (Bellinger & Sigeo, 2015), (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014); (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013); (Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO [IOC], 2010), (APHA et al., 2005); (Wetzel & Likens, 2000); (Donato, 2002); (Rivera & Zapata, 2009); (Pinilla, 2017), (UJTL, 2018) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.

• Selección de puntos

Antes de comenzar el trabajo de campo es importante conocer el área donde se van a realizar los muestreos, para esto, se utilizan herramientas tales como: bibliografía, mapas e imágenes satelitales del lugar. Esto permite realizar un trabajo más rápido y eficiente, reduciendo así el costo tiempo-esfuerzo (Darrigan et al., 2007).

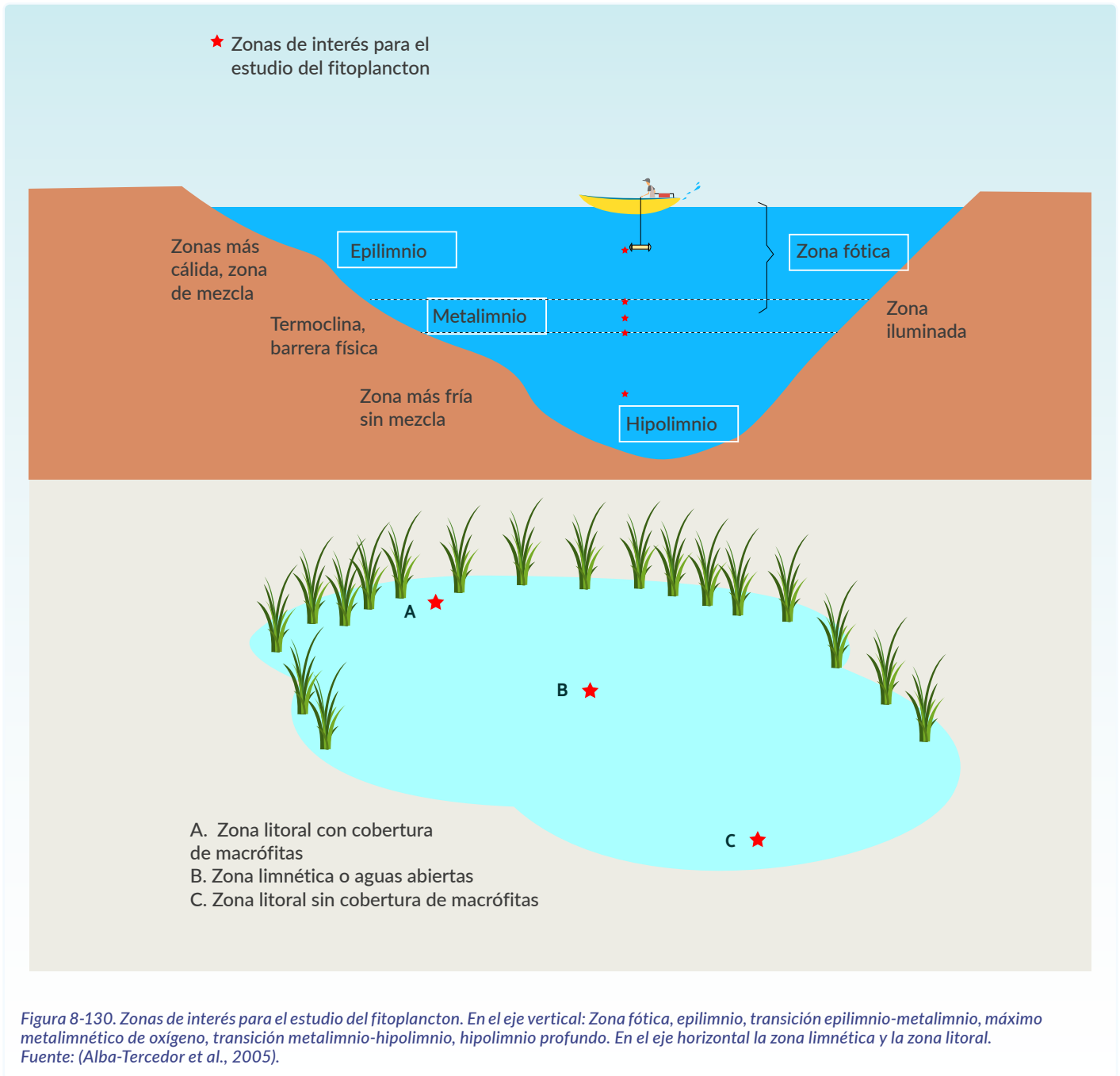
La selección de los puntos de muestreo del fitoplancton debe ajustarse a los objetivos del programa de monitoreo o proyecto. Los factores por considerar incluyen: acceso, localización de fuentes de posible afectación, mezcla de contaminantes y las condiciones típicas del sitio como profundidad, gradiente, sustrato y otras condiciones físicas.

Se deben elegir puntos de muestreo que representen las características relevantes del propósito del estudio (descriptivo, evaluación general, impactos, presiones, etc.); además, los puntos de muestreo deben coincidir con los de toma de muestras fisicoquímicas y otras comunidades biológicas (macroinvertebrados, peces, macrófitas). En caso de que el monitoreo tenga alcance a largo plazo se busca que la muestra sea representativa del ecosistema y es importante que el sitio de muestreo sea permanente.

La selección de las estaciones y características de la muestra (cualitativas, cuantitativas, integradas, por profundidad, replicas, etc.) se establecen previamente según el tipo de estudio. Si no existen requerimientos previos, la selección de los puntos se realizará teniendo en cuenta la heterogeneidad espacial y la variación en la profundidad.

En el sitio de muestreo se debe tener en cuenta que el fitoplancton responde no solo a las características químicas del agua, sino también a factores físicos tales como el gradiente vertical que ofrece la luz, donde en las zonas superficiales con mayor incidencia se favorecen los procesos fotosintéticos. No obstante, en zonas de alta radiación, como las zonas tropicales, se puede presentar inhibición fotosintética; por lo que algunos organismos han desarrollado mecanismos para evitar altas intensidades lumínicas y se ubican en zonas subsuperficiales, otros pueden desarrollarse en zonas profundas e incluso formar floraciones en el bentos (Dodds & Whiles, 2010).

Otro factor de importancia para la distribución del fitoplancton en la columna de agua es el régimen de estratificación y mezcla (Figura 8-130).



De esta forma, ecosistemas lénticos profundos o ecosistemas protegidos del viento presentan periodos de estratificación térmica que condiciona la distribución del fitoplancton por la presencia de una

termoclina (cambio brusco en temperatura causada por un gradiente en la densidad del agua), que puede constituir una barrera física para microorganismos como el fitoplancton (Reynolds, 2006).

En este protocolo se realizan recomendaciones para la colecta de muestras de la comunidad fitoplanctónica en los diferentes escenarios.

• Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de monitoreo de la comunidad del fitoplancton debe obedecer a los objetivos del programa de monitoreo o proyecto.

Las algas fotosintéticas tienen una tasa de renovación semanal o quincenal, por lo que en el caso de estudios sucesionales esta sería la frecuencia óptima. Sin embargo, son muchos los factores que inciden en la definición de la frecuencia y casi siempre es el tema presupuestal el más sensible. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y periodos secos). Si el muestreo solo se puede realizar una vez al año se recomienda la época seca.

La frecuencia de monitoreo de la comunidad del fitoplancton debe obedecer a los objetivos del programa de monitoreo o proyecto; el tema presupuestal es un atributo muy importante que incide en esta definición.

A nivel general se recomienda (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2014):

- Estudios taxonómicos y líneas base requieren coleccionar dos veces por año, coincidentes con las épocas lluviosa y seca. Además, evaluar simultáneamente los parámetros fisicoquímicos.
- Estudios de productividad primaria requieren dos veces por año.
- Estudios sucesionales, debido a que las algas fotosintéticas tienen una tasa de renovación semanal o quincenal, realizarlo con esta frecuencia.
- Monitoreos de control y vigilancia deben considerar que la frecuencia puede variar desde muestreos mensuales (en el caso de que se haga un seguimiento de vertidos al ecosistema), tri-

mestrales, semestrales y en caso de que solo se puede realizar una vez al año se recomienda la época seca.

• Tipos de muestras

La recolección de las muestras fitoplanctónicas pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo, según los objetivos del estudio y la precisión necesaria.

Muestras cualitativas: Tiene como objetivo la identificación de los organismos, conocer la composición de la comunidad y en algunos casos complementar el inventario de taxones registrado en las muestras cuantitativas. Este propósito se alcanza mediante arrastres (se emplean las redes de plancton de 23 μm de diámetro de poro) horizontales y verticales con la red. Los organismos en este caso solo se reportan como presencia-ausencia, y se identifican, por ejemplo, la presencia de organismos potencialmente tóxicos.

En la toma de muestras cuantitativas, se utilizan botellas hidrográficas para obtener el análisis de densidad de organismos que presentan un volumen definido. Entre las más usadas está la del tipo Van Dorn (Figura 8-131) que posee un volumen de 2 litros o más. Este tipo de muestreo pretende expresar la densidad de algas, en individuos células por mililitro o por biomasa o biovolumen (micras cúbicas por mililitro); datos que son muy útiles para establecer la calidad del agua. Las muestras no deben ser filtradas, puesto que de esta manera se selecciona la comunidad acorde con el tamaño de poro de la malla, por lo tanto, la toma de muestra debe ser directa.

Muestras cuantitativas: estas pueden ser muestras simples que corresponde a una sola toma en un punto o profundidad específica o muestras integradas, donde una sola muestra procede de diferentes profundidades o diferentes zonas del ecosistema.



Figura 8-131. Toma de muestras cualitativas tipo Van Dorn.

• **Materiales, equipos y reactivos**

El trabajo de campo y toma de muestras de la comunidad fitoplanctónica requiere los materiales, equipos y reactivos que se relacionan a continuación, deben ser verificados con una lista de chequeo previo a la iniciación de la campaña (Anexo 8-20).

Protección personal: Para realizar trabajo en campo siempre se debe llevar:

- Pantalón plástico o fontanero (en caso de acceder al cuerpo de agua caminando).
- Botas de caucho o calzado impermeable.
- Chaleco salvavidas con línea de vida.
- Guantes para el manejo de reactivos y toma de la muestra.
- Gorro y protección solar.
- Intercomunicadores.
- Botiquín o equipo de primeros auxilios.

Materiales: A continuación, se enlistan los materiales para realizar la toma de muestras para la comunidad fitoplanctónica:

- Frascos plásticos de tapa rosca de boca ancha de 250 ml, preferible traslúcidos de color ámbar u otro que garantice proteger la muestra de la luz. Si la muestra va a ser almacenada por largo tiempo se requiere envasar en botellas de vidrio, para garantizar una menor evaporación del reactivo fijador.
- Balde 10 l aforado.
- Pipetas Pasteur plásticas.
- Cinta pegante transparente ancha (para asegurar las etiquetas).
- Neveras de icopor y/o plásticas (para transporte de muestras).
- Tabla acrílica.
- Decámetro.
- Bolígrafo o rotulador permanente.
- Etiquetas resistentes a la humedad.
- Formatos de campo.
- Custodia.

Equipos: Para realizar el trabajo en campo y la toma de muestras para la comunidad fitoplanctónica se necesitan los siguientes equipos:

- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Botella muestreadora de profundidad, existen diferentes tipos entre ellas el tipo Van Dorn: Es un muestreador de agua horizontal, para tomar muestras en diferentes profundidades de ecosistemas lénticos. Fabricada de PVC o acrílico, tiene un sistema de cierre doble, activado por un mensajero. Botella Kemmerer es de tipo vertical, generalmente metálica y la diferencia con la botella Van Dorn radica en el sistema de cierre activado también por un mensajero.
- Red de plancton de 20 o 23 μm de luz de poro.
- Disco de Secchi: disco de 20 cm de diámetro, con bandas blancas y negras alternas, que se sumerge en el agua para medir la transparencia basada en la visibilidad (Bellinger & Sigeo, 2015).
- Ecosonda manual para determinar el punto de máxima profundidad.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto y cable marcado para establecer la profundidad de los registros.
- Muestreador integrador de la columna de agua (tubo flexible de silicona con lastre de longitud predeterminada o tubo de PVC entre 2-2.5 cm de diámetro), para muestras integradas. También se puede utilizar la botella muestreadora para la composición de muestras integradas a partir de muestras puntuales.
- Pértiga telescópica con adaptador de recipiente o dispositivo similar.
- Cámara fotográfica.

- Bote adecuado para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.

Reactivos fijadores: Las muestras para el recuento de fitoplancton se fijan con solución de Lugol (mezcla de yoduro de potasio y yodo). Este preservante reacciona con el almidón que es la sustancia de reserva de algunos grupos de algas y permite una mejor sedimentación de las células.

La solución de Lugol se utiliza en periodos de conservación cortos, manteniendo la muestra en buen estado unos pocos meses en oscuridad. Para garantizar el almacenamiento de las muestras en colecciones biológicas se debe adicionar este reactivo con una periodicidad de una o dos veces al año.

La preparación de solución ácida de Lugol requiere:

- Balanza.
- Cabina o campana de extracción (en caso de no disponer de este equipo utilizar máscara de seguridad y gafas).
- Yodo (I_0 , atención, este reactivo puede ser tóxico).
- Yoduro de potasio (KI).
- Ácido acético glacial (CH_3COOH).
- Agua destilada.
- Mortero de mano y pistilo.
- Probeta.
- Balón aforado de 200 ml.
- Guantes.
- Papel filtro.
- Frasco de vidrio color ámbar debidamente rotulado para el almacenamiento.

En su preparación se debe mezclar en mortero 10 g de I_0 (yodo) y 20 g de KI (yoduro de potasio) hasta que la mezcla sea homogénea. Luego se debe adicionar agua destilada y disolver la mezcla (apro-

ximadamente 20 ml). Una vez los granos estén disueltos se adicionan 20 ml de ácido acético glacial y se lleva la preparación a 200 ml con agua destilada en un balón aforado (APHA et al., 2005). Se deje decantar o pasar por un papel filtro para eliminar residuos o partícula y a continuación traspasarlo al recipiente de almacenaje.

El líquido resultante se debe conservar en un recipiente hermético y protegido de la luz (frasco de vidrio color ámbar) para minimizar su sublimación. El reactivo puede ser almacenado en gotero plástico para el trabajo de campo y no se debe almacenar en recipientes metálicos o recipientes con tapa metálica. Esta solución se utilizará para las muestras de fitoplancton procedentes de masas de agua con $\text{pH} < 7$. Se debe utilizar 0.5 ml de esta solución por cada 100 ml de muestra, o hasta que la muestra adquiera una coloración semejante a la miel.

• Procedimiento para la toma de muestras

Una vez se esté ubicado en el sitio de muestreo, se debe hacer un recorrido para determinar zonas con diferentes características naturales y antrópicas que afecten el sistema hídrico, y elaborar una ficha descriptiva del sitio (Anexo 8-18).

La toma de las muestras de fitoplancton se debe realizar en los mismos puntos en los que se tomen

muestras fisicoquímicas. La profundidad del cuerpo de agua y la disponibilidad de luz son factores determinantes como criterio de toma de muestras para esta comunidad, en sistemas de alta corriente y/o con alta cobertura de macrófitas se limita la presencia de estos organismos. Es importante tener en cuenta los siguientes pasos que dependen del tipo de ecosistema:

Ecosistemas con una zona limnética libre de macrófitas y fácil acceso al espejo de agua:

- Establecer el punto más profundo del cuerpo de agua con el ecosonda o una cuerda marcada y un lastre.
- Referenciar el punto con el GPS.
- Realizar una toma de datos en el perfil vertical de temperatura y oxígeno disuelto con la sonda multiparámetro (Figura 8-131), registre estas dos variables en intervalos de 20 cm a 1 m según la profundidad del cuerpo de agua con el ánimo de establecer la capa de mezcla.
- Registrar la transparencia con el Disco Secchi (Figura 8-132), sumergir el disco hasta donde no se observe, luego elevarlo lento hasta distinguir los cuadrantes. De esta manera podemos determinar la zona fótica: región productora, o zona donde existe una penetración eficaz de la luz para realizar fotosíntesis (Esteves, 2011).

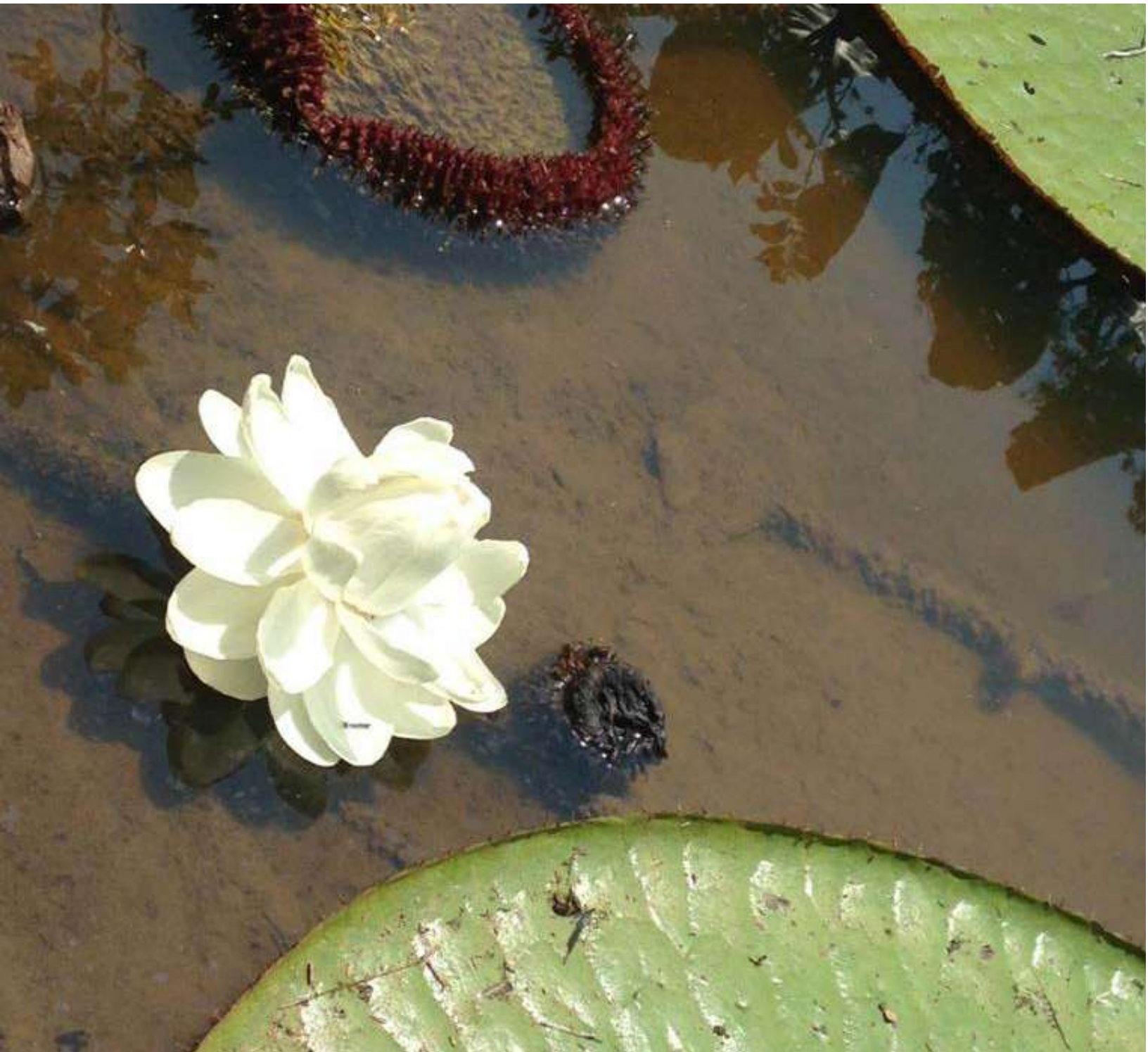




Figura 8-132. Observación de parámetros multiparamétricos y transparencia con el disco Secchi.

- Si la capa de mezcla y la transparencia van hasta el fondo del cuerpo de agua se puede tomar una muestra integrada con el muestreador integrador, el cual consiste en un tubo silicona o PVC que abarca toda la columna de agua. Este tubo no puede superar los 2.5 cm de diámetro, se introduce verticalmente en la columna, se produce un efecto de succión con el dedo en el extremo en la superficie y se saca rápidamente, recibiendo el contenido del tubo en un balde. De esta forma se tendrá una muestra de toda la columna de agua, de allí se tomarán 300 ml para ser fijados con solución de Lugol.
- En el caso de que la capa de mezcla vaya hasta el fondo, pero la penetración lumínica sea inferior entonces se deben seleccionar al menos tres puntos en la columna según la profundidad del disco Secchi (DS) 1DS, a 2DS y a 3DS (subsuperficial, mitad de zona fótica y cercana al fondo), integrar en el balde aforado, todo el contenido de la botella, de este tomar una muestra de 300 ml en un frasco rotulado, fijar con Lugol.
- Si el cuerpo de agua se encuentra estratificado de forma térmica o química entonces tome una muestra subsuperficial o integre la capa de mezcla y una segunda muestra en la termoclina u oxiclina (en caso que sea difícil establecer el cambio de temperatura).
- En ecosistemas dominados por macrófitas y/o con difícil acceso al punto más profundo del ecosis-

tema se puede realizar la evaluación en la zona litoral ya sea con lanzamientos de la red de arrastre (muestras cualitativas) y/o con una pértiga telescópica (muestra cualitativa o cuantitativa), (Figura 8-132), de esta forma se tiene acceso al

cuerpo de agua sin disturbar los sedimentos. Dependiendo de las condiciones o de los parches de macrófitas, se debe tomar una muestra integrada en el balde o contenedor aforado (300 ml en un frasco rotulado y fijar con Lugol).



Figura 8-133. Ejemplos de lanzamiento de red y uso de pértiga telescópica. Fuente: (UJTL, 2018).

- En los ríos no vadeables, con muy baja corriente suele presentarse una alta concentración de sólidos suspendidos, por lo que el desarrollo del fitoplancton es bajo. Sin embargo, se puede cuantificar esta comunidad haciendo muestreos con la

red de fitoplancton, con el ánimo de concentrar la muestra (Figura 8-134). En este caso filtrar un volumen de agua conocido a través de la red hasta que esta se sature y transferir la muestra a un frasco rotulado y fijado con Lugol.



Figura 8-134. Muestreo con red de fitoplancton, proceso de filtrado. Fuente: (UJTL, 2018).

Se requiere registrar en el *formato captura de datos en campo* (Anexo 8-21) los datos de campo para parámetros hidrobiológicos (fitoplancton), los datos de micraje de la red, profundidad a la que ha sido tomada la muestra y el volumen total filtrado.

Antes de retirarse del sitio de muestreo, verificar que las muestras estén correctamente rotuladas, el formato totalmente diligenciado y que correspondan al sitio muestreado para asegurar la calidad del muestreo.

Las muestras deben ser guardadas en neveras portátiles (plásticas y/o icopor) con tapa hermética, debidamente rotuladas y protegidas de la luz. Asegurarse de almacenar las muestras de forma que no se presenten fugas.

Si las muestras son enviadas a través de una empresa transportadora, se debe rotular la nevera, firmar la cadena de custodia, depositar los formatos dentro de una bolsa plástica y fijarlos a la tapa de la nevera con cinta. Indicar al personal que recibe la nevera que corresponde a material delicado. Solicitar que la entrega al laboratorio se lleve a cabo en el menor tiempo posible.

Una vez recibidas las muestras en las instalaciones del laboratorio se debe:

- Verificar el diligenciamiento completo de los formatos de campo y la cadena de custodia.
 - Revisar el estado de la nevera y de los envases donde han sido recolectadas las muestras.
 - Verificar que los recipientes han sido los adecuados para la recolección de las muestras y el etiquetado es correcto.
 - Cotejar que el volumen recolectado es el indicado en los formatos de campo y/o que es el necesario para llevar a cabo el análisis solicitado.
- Verificar una a una la preservación de las muestras.
 - Proceder a identificar con el número único del laboratorio todas las muestras recolectadas en una misma estación.
 - Registrar cualquier novedad que se presente con las muestras.
 - Archivar la documentación en las carpetas respectivas.
 - Disponer las muestras de forma organizada en los estantes y/o neveras destinados para tal fin.
 - Continuar con la cadena de custodia de las muestras.

• Laboratorio

A continuación, se enlistan todos y cada uno de los materiales, equipos y reactivos necesarios para el análisis de muestras de comunidades planctónicas:

Materiales: Para el análisis de las muestras de comunidades planctónicas se requieren los siguientes materiales:

- Cámaras de sedimentación estilo Utermöhl de 10, 50 y 100 ml de capacidad (Figura 8-135).
- Cámara de sedimentación Sedgewick–Rafter S-R.
- Láminas porta y cubre objetos.
- Pipetas Pasteur plásticas de 3 ml desechables.
- Probeta de 1000 ml.
- Papel secante.
- Papel de arroz.
- Aceite de inmersión.
- Claves taxonómicas.
- Formato registro taxonómico y número de organismos (Anexo 8-19).
- Claves taxonómicas especializadas en cada grupo algal.



Figura 8-135. Cámaras de sedimentación Utermöhl.

Equipos: A continuación, se enlistan los equipos necesarios para realizar el análisis las muestras de comunidades planctónicas:

- Microscopio óptico con reglilla ocular para toma de medidas.
- Microscopio invertido con reglilla ocular para toma de medidas.
- Cámara fotográfica.
- Portaobjetos y cubreobjetos.

Reactivos: Para realizar el análisis de las muestras de las comunidades planctónicas se requieren los siguientes reactivos:

- Agua destilada.
- Aceite de inmersión.
- Transeau.
- Lugol.

En el caso de los reactivos tener en cuenta que la solución Transeau reduce un poco la concentración de formol, el cual es tóxico a largo y corto plazo (Wallace & Snell, 2010). Para la solución de formalina y yodo

de Lugol a una concentración final de 5 % o menos y etanol a aproximadamente 30-50 % es menos tóxico y mancha la muestra obteniendo visibilidad, aunque organismos blandos terminan comprimiendo el cuerpo y perdiendo detalles de importancia taxonómica (Wallace & Snell, 2010).

• Análisis de las muestras

Se detalla el procedimiento para las muestras cuantitativas o cualitativas.

Muestras cualitativas:

- A partir de la muestra cualitativa, muestra de arrastre con red, o de una submuestra de la muestra cuantitativa deje en reposo por al menos 12 horas.
- Haciendo uso de una pipeta Pasteur plástica, tomar una alícuota del fondo de la muestra cualitativa, colocar una gota en un portaobjeto limpio y cubrir con el cubreobjeto evitando la formación de burbujas.

- Si se presenta formación de burbujas producto de la evaporación durante la identificación, es posible adicionar agua destilada en el borde del cubreobjeto.
- Colocar la placa en el microscopio óptico en objetivo de 40x y de 100x y realizar la identificación correspondiente.
- Mediante claves especializadas identifique los organismos en el mínimo nivel taxonómico posible. Identifique los morfotipos presentes.
- Realice tinciones con tinta china o los procedimientos que las claves taxonómicas sugieren para las identificaciones.
- Tome las medidas correspondientes con la reglilla ocular previamente calibrada para la identificación de especies y de géneros.
- Realizar la identificación taxonómica hasta no observar un nuevo taxa por 100 unidades de campo ocular o alrededor de tres minutos de observación (Barbour et al., 1999). Hacer el registro de los taxa en el *formato registro taxonómico* y número de organismos (Anexo 8-19).
- Reportar los especímenes a nivel de género (morfoespecie) debe llevar el siguiente orden: género con una sola morfoespecie = género sp. Género con más de una morfoespecie = género sp.1, sp.2, sp.3, etc.
- Los datos registrados en el formato deben ser pasados a una matriz de Excel.
- Realizar fotografías a cada taxa identificado y registrarlas en el formato correspondiente.
- Luego de la observación cualitativa de la muestra, esta debe ser devuelta al frasco original.

Muestras cuantitativas: Las muestras de fitoplancton se deben sedimentar antes de efectuar la

observación al microscopio, con el objeto de tener una mayor representatividad de la comunidad, esta actividad puede realizarse en cámaras de Utermöhl y/o de Sedgwick Rafter para lo cual se debe:

- Agitar la muestra tomada en campo de manera suave y constante, invirtiendo el frasco al menos entre quince a cincuenta veces para asegurar una buena homogeneización de la muestra. No hacerlo violentamente porque se pueden producir burbujas difíciles de eliminar en la cámara.
- Depositar en la cámara de sedimentación Utermöhl de 10, 50 o 100 ml, dependiendo de la cantidad de biomasa presente o la cantidad de sólidos en suspensión que contenga la muestra.
- Para muestras que presentan poco sedimento se debe sedimentar entre 50 a 100 ml y para muestras con alto contenido sedimentar entre 5 a 25 ml.
- Evaluar antes de realizar la sedimentación si la cámara y el volumen utilizado es el adecuado. Si la muestra contiene muchas partículas, el conteo se debe realizar en otro tipo de dispositivo, como por ejemplo cámaras de Sedgwick Rafter.
- Tapar la cámara y mantenerla en un sitio sin luz directa y en una superficie nivelada. Luego sedimentar teniendo en cuenta que el tiempo de sedimentación en horas resulta de multiplicar la altura de la cámara en centímetros por tres (Wetzel & Likens, 1991). Otros autores sugieren una hora por cada mililitro sedimentado, así una muestra de 50 ml requiere un tiempo de sedimentación de 50 horas.
- Después de transcurrido el tiempo de sedimentación, desplazar la parte tubular de la cámara hacia un lado, mantenerla firme y presionada

hacia abajo para evitar que el líquido se derrame. El sobrenadante se elimina por el pequeño orificio que tiene la base rectangular, mientras que en la

depresión cilíndrica de la base queda un pequeño volumen, que contiene los organismos por contar (Villafañe & Reid, 1995) (Figura 8-136).



Figura 8-136. Proceso de sedimentación de una muestra de fitoplancton. Fuente: (Villafañe & Reid, 1995).

Si se utiliza la cámara de Sedgwick Rafter seguir los pasos dados a continuación:

A) La muestra se coloca en el cilindro de sedimentación y se tapa, B) Después del tiempo de sedimentación del fitoplancton, el cilindro se desliza hacia el orificio pequeño de la base, C) El cilindro se destapa para eliminar el agua, y D) La cámara contiene el material sedimentado.

- Homogeneizar la muestra mediante la agitación del frasco contenedor, combinando movimientos verticales y horizontales durante máximo 30 se-

gundos. Un tiempo superior a este podría dañar el material algal, fraccionando los individuos y alterando el conteo real de la muestra.

- Tomar con una pipeta plástica Pasteur aforada una submuestra de 1 ml y transferir inmediatamente a la cámara de conteo Sedgwick Rafter, evitar la formación de burbujas.
- Colocar el cubreobjetos diagonal sobre la cámara, si se generan burbujas, poner una gota de agua destilada junto a la esquina donde se encuentre el espacio de aire.

- Colocar la cámara en un lugar plano, sin luz directa del sol y dejar sedimentar durante una hora.
- Realizar una visualización previa al conteo en el microscopio invertido. Si la densidad de algas o sedimentos es muy alta, de modo que no es posible realizar el conteo, la muestra deberá ser diluida. Para esto se extrae un volumen medido de la muestra y se adiciona agua destilada en la proporción requerida según la densidad de algas.
- En el caso en que la muestra presente muy bajas densidades de células, se concentra la muestra por sedimentación para agilizar el conteo.

- **Conteo de organismos**

El conteo de células se realiza con un microscopio invertido, provisto de una reglilla ocular y en la medida de lo posible de cámara fotográfica incorporada. El método de sedimentación asume que las células tendrán una distribución de Poisson en el fondo de la cámara. Los conteos se pueden realizar en transectos transversales o campos al azar, o alternativamente se puede realizar recuentos de todo el fondo de la cámara (Figura 8-137).

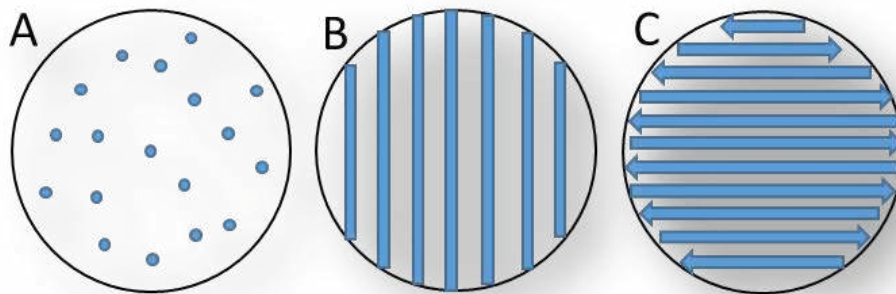


Figura 8-137. Esquema del fondo de la cámara de sedimentación y las posibilidades de conteo de células. A. Campos al azar, cada punto representa un campo óptico. B. Transectos, también pueden ser horizontales. C. Dirección del conteo de todo el fondo de la cámara.

Para alcanzar una confiabilidad del conteo del 80 % se deben contar al menos 100 unidades y para una confianza del 90 % se deben enumerar al menos 400 unidades. Por lo tanto, se recomienda contar entre 100 a 400 células del morfotipo dominante.

Una vez se cuenten los individuos o células de la morfoespecie más abundante, se debe continuar con la observación de la cámara reportando por campo las nuevas morfoespecies que van apareciendo hasta terminar la observación de toda

la cámara. A este procedimiento se le denomina barrido e incluye:

- Llevar el registro de todos los morfotipos, su frecuencia de aparición y el número de campos necesarios para alcanzar el recuento.
- Realizar fotografías a cada taxa identificado y registrarlas en el formato.
- Una vez terminada la observación, la muestra sedimentada, esta debe ser devuelta al frasco original con el fin de conservar la muestra en su totalidad.



Calima, Darien - Valle del Cauca
Edgar Garzón

• **Transformación de los datos**

- La estimación de la densidad de cada morfotipo se debe realizar a partir de la siguiente Ecuación 8-53:

$$\text{Células ml}^{-1} = \left(\frac{N * a_{\text{cámara}}}{a_{\text{campo}} * N_C * Vol_S} \right)$$

Ecuación 8-53

Donde,

N: Número de células contadas.
a_{Cámara}: Área del fondo de la cámara (mm²).
A_{campo}: Área de un campo óptico (mm²).
N_C: Número de campos contados.
Vol_S: Volumen sedimentado (ml).

Para obtener la biomasa total de la muestra en células por mililitro sume los datos de cada morfotipo presente.

El cálculo para cada morfotipo a partir del recuento de todo el fondo de la cámara se realiza con la Ecuación 8-54:

$$\text{Células ml}^{-1} = \left(\frac{N}{Vol_S} \right)$$

Ecuación 8-54

Si se estima la densidad de cada morfotipo a partir de una muestra de red, el cálculo es el siguiente (Ecuación 8-55):

$$\text{Células ml}^{-1} = \left(\frac{N}{\frac{V_S * V_f}{V_c}} \right)$$

Ecuación 8-55

Donde,

N: Número de células contadas.
V_S: Volumen sedimentado (ml).
V_f: Volumen filtrado (ml).
V_c: Volumen concentrado (ml).

Finalmente, los resultados se deben registrar en el Sistema de Información Biológica (SIB), administrada por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt.

Las muestras deben ser depositadas en una colección biológica registrada en el Instituto Alexander von Humboldt. Si la institución debe realizar un programa continuo de monitoreo se sugiere tener su propia colección de muestras y catálogo de fotografías de los especímenes.

Para la aplicación de algunos índices es necesario el cálculo del volumen celular o *biovolumen*. Este dato se estima, a partir de la medición de las

dimensiones de al menos 30 células de cada uno de los morfotipos seleccionadas aleatoriamente mediante:

- Cálculo de la equivalencia de la forma celular a una forma geométrica de acuerdo con lo establecido por (Hillebrand et al., 1999) y (Sun & Liu, 2003).
- Cálculo del volumen promedio a partir de las 30 mediciones de cada morfotipo. En el caso de los morfotipos poco frecuentes se deben utilizar las medidas disponibles o consultar en literatura.
- A partir de los datos de densidad de cada morfotipo se multiplica por su volumen medio (Ecuación 8-56).

$$B_{vol} = Vol_m * p$$

Ecuación 8-56

Donde,

$$B_{vol}: \text{Biovolumen} \quad \left(\frac{\mu m^3}{ml} \right).$$

$$Vol_m: \text{Volumen medio} \quad (\mu m^3).$$

$$p: \text{Densidad} \quad \left(\frac{\text{células}}{ml} \right).$$

Para establecer la biomasa total de la muestra se debe realizar una sumatoria de todos los datos de los morfotipos presentes (*International Atomic Energy Agency [IAEA], 2012*), (*Wetzel & Likens, 2000*).

Zooplankton

Los organismos pertenecientes al zooplankton corresponden a organismos heterotróficos, micros-

cópicos o de tamaño muy pequeño (algunos milímetros). En las aguas dulces está constituido por categorías taxonómicas como protozoarios, rotíferos, cladóceros y copépodos como los más comunes, aunque también se pueden incluir otros grupos como ostrácodos, cnidarios y platelmintos entre otros (Figura 8-138).

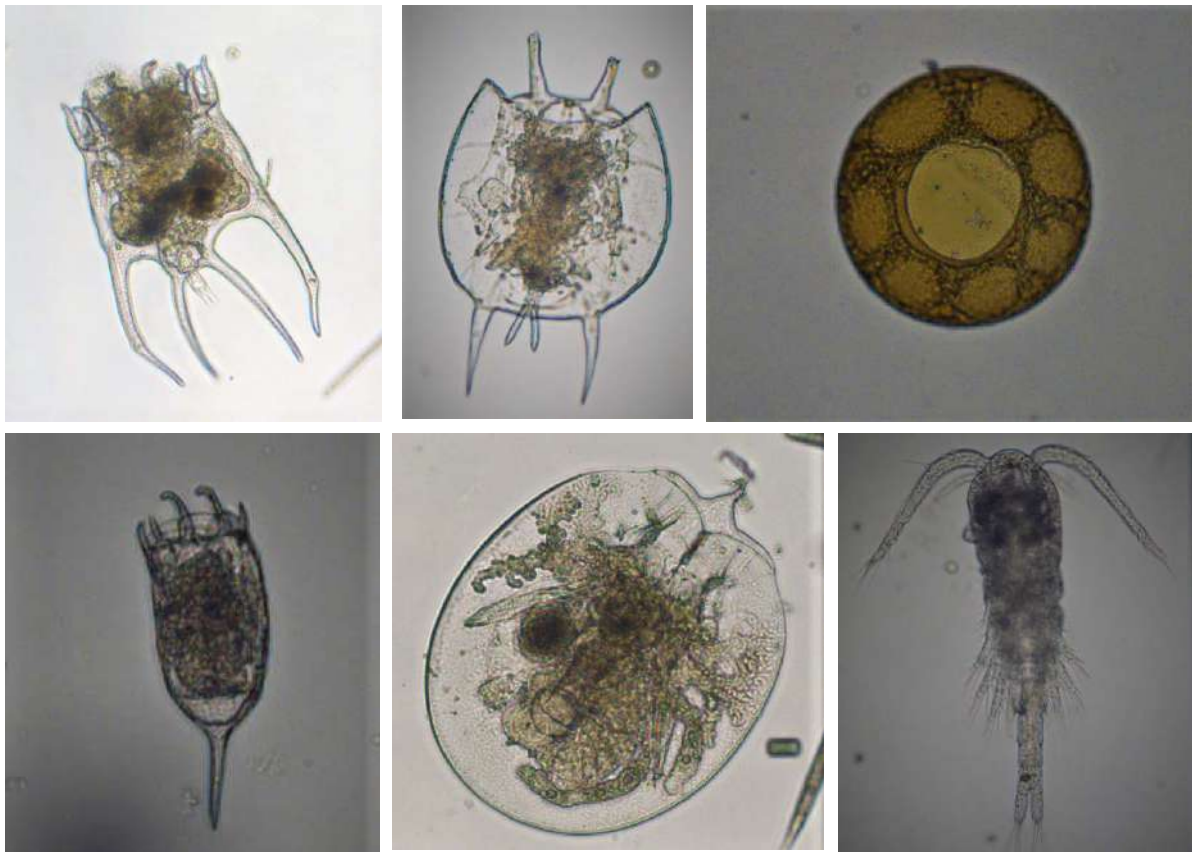


Figura 8-138. Algunas especies de zooplancton. A: *Plationus patulus*. B: *Platyas quadricornis*. C: *Testudinella mucronata*. D: *Cyclopodia Mf.* E: *Arcella discoides*. F: *Keratella cochlearis*.

• Selección de puntos de monitoreo

La selección de puntos de muestreo del zooplancton depende de los objetivos del programa de monitoreo o proyecto. Sin embargo, en monitoreos a largo plazo de la calidad del agua se debe mantener el punto de muestreo de manera permanente de tal manera que sea representativo del ecosistema. Los factores que determinan la distribución en el ecosistema son variados entre ellos la presencia de alimento (algas, bacterias, detritus, etc.) y la presencia de depredadores, entre otros.

Estos organismos realizan migraciones verticales particularmente en ambientes donde existen predadores y prefieren las zonas litorales cubiertas por macrófitas. Evitan los rayos solares (UV) que les puede causar algún daño. Su distribución se da en parches en el ecosistema y poseen mecanismos que les permite evadir los muestreadores (Lampert & Sommer, 2007). Ante estas características se deben hacer algunas consideraciones iniciales antes del muestreo, relacionadas con la profundidad del ecosistema, la morfometría del mismo, la estratificación física y la proporción de zona litoral en el cuerpo de agua.

- **Frecuencia de monitoreo**

La frecuencia de muestreo de la comunidad del zooplancton depende de los objetivos del proyecto. Sin embargo, en monitoreos se recomienda evaluar las dos comunidades planctónicas (fitoplancton y zooplancton) simultáneas, de tal manera que se pueda dar una interpretación ecológica de la presencia de estos organismos en el ambiente de una manera integral.

Se sugiere realizar la colecta en periodos climáticos diferentes (lluvia y sequía). Si el muestreo solo se puede realizar una vez al año, escoger la época seca, cuando las condiciones ambientales son extremas.

- **Tipo de muestras**

La recolección de las muestras puede ser de tipo cuantitativo o cualitativo, depende de los objetivos del estudio y la precisión necesaria.

Muestras cualitativas: En estas muestras se trata de representar la totalidad de especies de la comunidad, a partir de esta muestra no se pueden obtener datos de densidad.

La toma de este tipo de muestra se realiza mediante la red cónica de zooplancton cuyo tamaño de

poro pueden variar entre 20-120 μm , efectuando arrastres horizontales que incluyan los diferentes sitios de muestreo. Dependiendo de la profundidad del sitio se pueden ejecutar arrastres verticales desde 50 cm antes del fondo hasta la superficie.

Muestras cuantitativas: permiten referenciar la densidad de los organismos en un volumen de agua filtrada o colectada; se expresa en individuos por litro.

La muestra cuantitativa se toma usando una trampa Schindler-Patalas Plankton que tiene capacidad de 20 litros o botellas Vann Dorn que almacenan cinco litros, en diferentes profundidades. Debido a que los organismos zooplanctónicos son poco abundantes es necesario concentrar la muestra para que sea representativa, la manera de hacerlo es filtrar a través de la red de zooplancton.

El volumen por filtrar depende de la producción primaria del ecosistema, de tal manera que en ecosistemas poco productivos u oligotróficos se deben filtrar de 30 a 100 litros por muestra y para ecosistemas muy productivos o eutróficos se deben filtrar entre 1 y 10 litros (Figura 8-139).



Figura 8-139. Concentración de muestra con botella Van Dorn y red de plancton.



Lanzamiento red de fitoplancton. Lagunas del páramo de Sumapaz
📹 Claudia Andramunio

• Equipos

A continuación, se enlistan los equipos necesarios para la toma de muestras de zooplancton:

- Frascos plásticos de 200 a 300 ml para almacenar la muestra.
- Botella muestreadora específica para esta comunidad Schindler-Patalas, la cual puede tomar un volumen de muestra en una profundidad determinada y a la vez consta de una red que permite la concentración del volumen muestreado.
- Si no se dispone de este muestreador entonces se utiliza una botella muestreadora tipo Van Dorn y una red (aunque es mayor la evasión de organismos con estos últimos dispositivos).
- Red de zooplancton de tamaño de poro de 20 μm . Aunque muchos protocolos señalan redes de mayor tamaño para esta comunidad, hay que señalar que en nuestros ambientes muchos de los rotíferos son de tamaño pequeño y de manera frecuente son la comunidad más abundante.
- Balde o contenedor aforado para almacenar la muestra hasta su concentración por la red.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto y cable marcado para establecer la profundidad de los registros.
- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Ecosonda manual para determinar el punto de máxima profundidad.
- Neveras portátiles para transporte de la muestra.
- Bolígrafo o rotulador permanente (o cualquier otro método para etiquetar las muestras). Si se usan etiquetas, estas deben ser resistentes a la humedad.
- Bote o lancha adecuada para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.
- Pértiga telescópica con adaptador de recipiente o dispositivo similar.

Nota de construcción: Para la preservación de las muestras de zooplancton se utiliza comúnmente alcohol al 70 % o solución Transeau la cual se prepara en una proporción de 6:3:1, correspondientes a seis partes de agua destilada, tres partes de alcohol y una de formol, se adiciona a la muestra en proporción 1:1, es decir, se debe adicionar el mismo volumen de preservante que de muestra.

De la misma manera se utiliza agua carbonatada, para narcotizar los individuos antes de la fijación y evitar que se contraigan para facilitar su observación.

• Procedimiento para la toma de muestra

La toma de muestras del plancton (fitoplancton y zooplancton) se realiza en general siguiendo los mismos criterios.

En ecosistemas con una zona limnética libre de macrófitas y fácil acceso al espejo de agua:

- Establecer el punto más profundo del cuerpo de agua, con el ecosonda o una cuerda marcada y con un lastre.
- Referenciar el punto con el GPS.
- Realizar una toma de datos en el perfil vertical de temperatura y oxígeno disuelto con la sonda multiparámetro, registrar estas dos variables en intervalos de 20 cm a 1 metro según la profundidad del cuerpo de agua con el ánimo de establecer la capa de mezcla.

Si el cuerpo de agua presenta una condición de mezcla, porque es poco profundo:

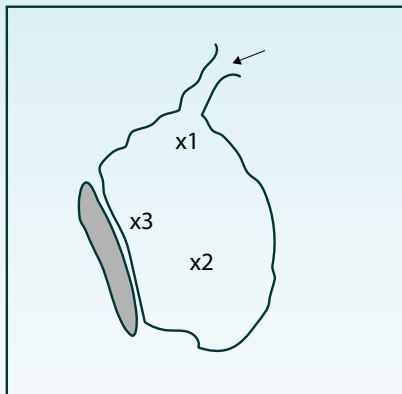
- Tomar la muestra con la botella muestreadora en al menos tres zonas de la columna de agua subsuperficial, zona media y 20 a 30 cm antes del fondo e integrar en un contenedor aforado el volumen total requerido.
- Filtrar todo el volumen por la red de zooplancton.

- Al material retenido en el frasco recolector de la red, agregar una cantidad de agua carbonatada hasta que los organismos estén quietos, entonces transferir la muestra al frasco de almacenaje de la muestra previamente rotulado con el código de la muestra y datos de la localidad, nombre del colector y volumen filtrado.
- Preservar con solución Transeau.

Si el cuerpo de agua está estratificado y presenta una oxiclina: (un rápido cambio en la concentración de oxígeno entre dos profundidades muy cercanas), entonces tomar una muestra que integre la capa de mezcla y otra muestra en la oxiclina.

Si el cuerpo de agua es somero y cubierto con macrófitas: utilizar la pértiga telescópica, integrar diferentes submuestras hasta alcanzar el volumen requerido y realice los mismos pasos ya descritos.

Si el sistema presenta una morfología indefinida: es recomendable realizar muestreo en varias estaciones. Por ejemplo, en embalses con varios brazos, puede localizarse una estación en cada uno de los brazos, cerca de la presa y en la zona más profunda (Figura 8140). Otras estaciones estratégicas, según los objetivos del estudio, para tener en cuenta pueden ser: cerca de tomas de agua, vertimientos de agua residuales, cerca de zonas litorales que pueden influir en la fisicoquímica del agua.



- x1: cerca a afluentes
- x2: máxima profundidad
- x3: área de recreación
- x4: cerca a la presa
- ⇒: dirección del viento

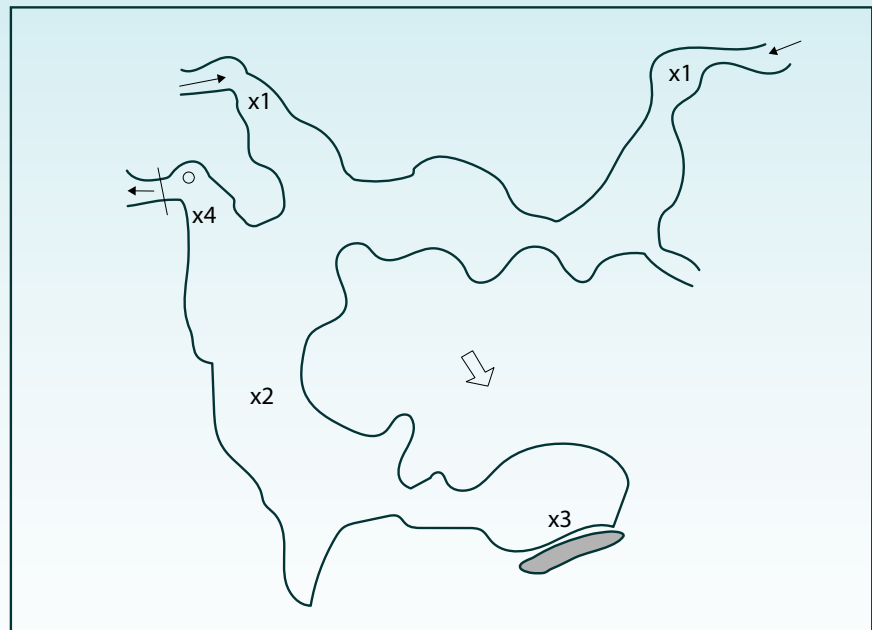
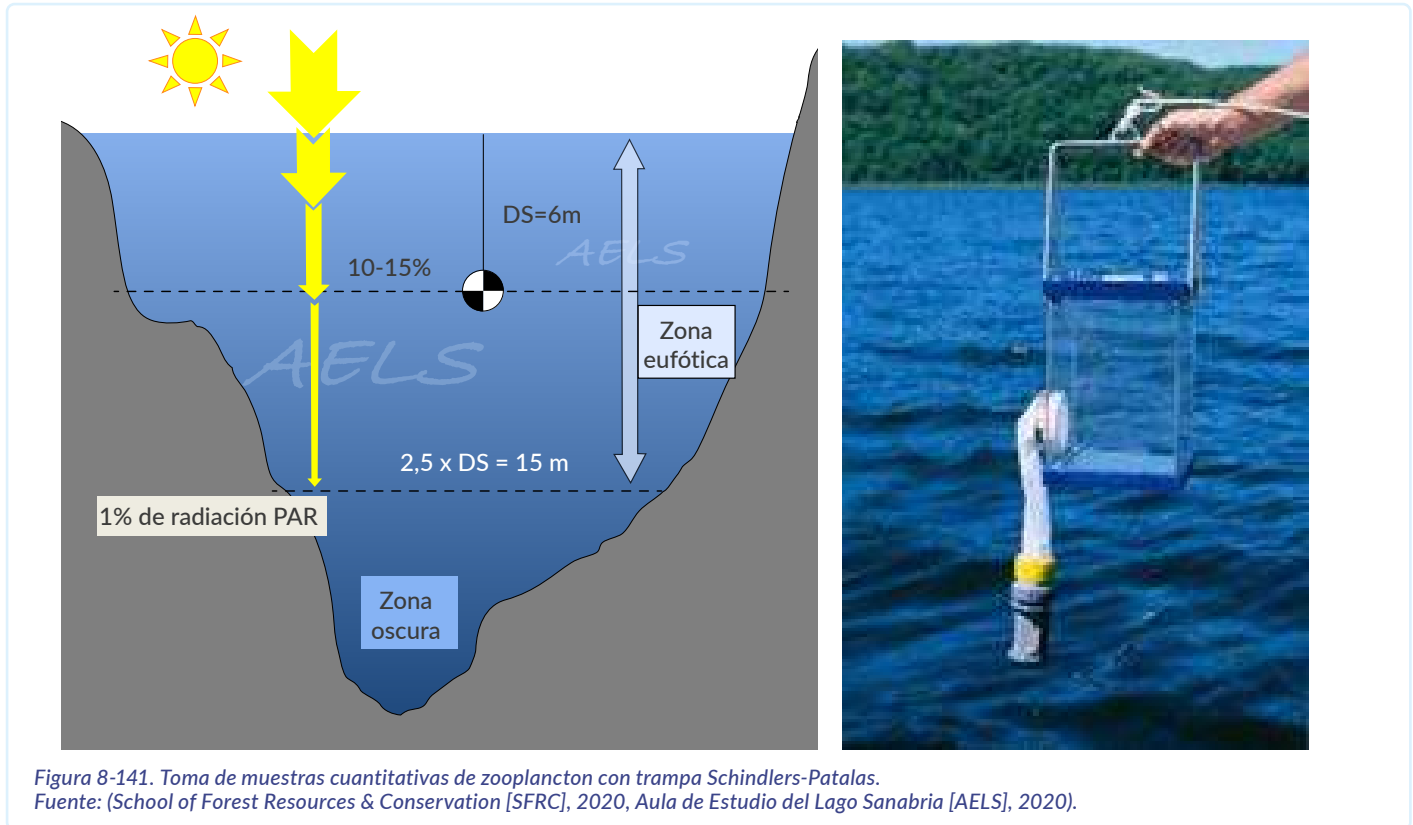


Figura 8-140. Estaciones de muestreo sugeridas para el muestreo de plancton en sistemas lénticos.
Fuente: (Hötzel & Croome, 1999).

En sistemas lénticos someros: filtrar 60 litros tomados con trampa Schindler-Patalas Plankton o

botellas Van Dorn, a través de la red de zooplancton (Figura 8-141).



En sistemas lénticos profundos: tomar volúmenes de 20 litros a nivel subsuperficial, y a profundidades de disco Secchi (1DS), 2DS, 3DS donde la profundidad es suficiente y cerca al fondo. El volumen total de agua tomada (alrededor de 60 litros) se filtra a través de una red de zooplancton, obteniendo una muestra integrada y concentrada de aproximadamente 100 ml.

La preservación de las muestras debe hacerse con:

- Solución Transeau.
- Solución de formalina y yodo de Lugol.
- Etanol no desnaturalizado al 95 %.

Para el caso del yodo de Lugol debe estar a una concentración final de 5 % o menos y etanol a aproxima-

damente 30 - 50 % es menos tóxico y mancha la muestra obteniendo visibilidad, aunque organismos blandos terminan comprimiendo el cuerpo y perdiendo detalles de importancia taxonómica (Wallace & Snell, 2010).

Para preservar las muestras se deben lavar usando un tamiz de $33 \mu\text{m}$ o la red de colecta, para extraer toda el agua, finalmente fijar la muestra en etanol y almacenar a 4°C (Prosser et al., 2013). Con este método los organismos mueren rápido, por lo que habrá poca distorsión y preservará la muestra indefinidamente (Caprioli et al., 2004). Este método es el indicado para realizar secuencias en nuevas técnicas moleculares.

Finalmente, para el proceso de etiquetado, registro fotográfico, transporte y recepción se deben seguir las instrucciones consignadas en la sección de trabajo de campo de la comunidad fitoplanctónica.

• Laboratorio

A continuación, se enlistan todos y cada uno de los materiales, equipos y reactivos necesarios para el análisis de muestras de comunidades planctónicas. Este listado debe ser tenido en cuenta como documento de chequeo (Anexo 8-20):

Protección personal: El equipo para la protección personal es el siguiente:

- Bata de laboratorio.
- Guantes de látex.

Materiales: Para realizar el análisis de muestras a comunidades planctónicas se requieren los siguientes materiales:

- Cámara de conteo Sedgwick-Rafter.
- Cámara Bogorov.
- Láminas porta y cubre objetos.
- Agujas de disección especializadas.
- Pinzas especializadas.
- Caja de Petri.
- Pipetas Pasteur plásticas de 3 ml.
- Probeta de 1000 ml.
- Papel secante.
- Papel de arroz.
- Claves taxonómicas especializadas en cada grupo.
- *Formato registro taxonómico* y número de organismos (Anexo 8-19).

Equipos: A continuación, se enlistan los materiales para realizar el análisis de muestras a comunidades planctónicas:

- Microscopio óptico con reglilla ocular para toma de medidas, deseable con cámara fotográfica.

- Microscopio invertido con reglilla ocular para toma de medidas, deseable con cámara fotográfica.
- Estereomicroscopio (en caso de organismos grandes).
- Cámara fotográfica.

Reactivos: Para realizar el análisis a las comunidades planctónicas se requieren los siguientes reactivos:

- Rosa de bengala, es una tinción que se utiliza para resaltar estructuras y facilitar la identificación taxonómica.
- Glicerina, facilita el manejo de los ejemplares durante la identificación taxonómica
- Hipoclorito de sodio (necesario para el tratamiento de rotíferos)
- Aceite de inmersión.

El tamaño de los organismos colectados indicará el tipo de cámaras y equipos necesarios para su observación. Se debe realizar la identificación de organismos grandes (cladóceros y copépodos) en estereomicroscopio hasta el nivel de género. Sin embargo, para rotíferos, protozoarios y para el nivel de especie en cladóceros y copépodos es necesario utilizar microscopio óptico.

Adicionalmente, llevar a cabo las identificaciones de los organismos con bibliografía especializada y desarrollar un catálogo de fotografías de los especímenes, el cual debe presentarse en el formato correspondiente.

Para la determinación taxonómica se recomienda tener en cuenta:

- Resaltar algunas estructuras mediante el uso de tinción, por ejemplo, con rosa de bengala.
- Manipular especímenes grandes usando glicerina para hacer las observaciones requeridas en las claves.
- Identificar las especies de rotíferos separando y utilizando el mástax (lo puede separar con el uso de hipoclorito de sodio).

- Determinar los cladóceros, separar el post abdomen, realizar las mediciones de las características externas, tales como rostro, forma del cuerpo, decoraciones, forma entre otros.
- Identificar los copépodos, separar el quinto par de pseudopatas de especímenes hembras para Cyclopoida y machos para Calanoida, además del primer par de anténulas de especímenes machos tanto de Cyclopoida y Calanoida.

Para muestras cualitativas:

- Tomar una alícuota del fondo de la muestra cualitativa con la ayuda de una pipeta Pasteur plástica aforada de 3 ml, colocar una gota en un portaobjeto limpio y cubrir con el cubreobjeto evitando la formación de burbujas.
- Adicionar agua destilada en el borde del cubreobjeto, si se presenta formación de burbujas, producto de la evaporación durante la identificación.
- Colocar la placa en el microscopio óptico y realizar la determinación de los organismos utilizando claves taxonómicas.

- Seguir el procedimiento descrito para la comunidad fitoplanctónica detallado anteriormente.

Para la preparación de la muestra, se debe realizar un recuento de organismos, iniciar con un barrido o visualización de la muestra antes de empezar el proceso con el fin de obtener una lista de los taxa presentes en la muestra y tener una aproximación de la densidad general de organismos.

Una vez se proceda a identificar organismos pequeños como rotíferos (en algunos casos también protozoos), se debe utilizar la cámara de conteo Sedgwick Rafter (capacidad 1 ml), (Figura 8-142) y un microscopio invertido con reglilla micrométrica, se recomienda además homogeneizar la muestra suavemente y tomar con la pipeta una alícuota de 1 ml, depositarla en la cámara para su posterior observación bajo microscopio invertido.

Si la densidad es baja (< 200 ind/l, lo cual puede estimar en el conteo de la primera alícuota) revisar la muestra completa (íntegra), en este caso puede utilizar una cámara de Utermöhl para realizar el conteo, previa sedimentación de los organismos.

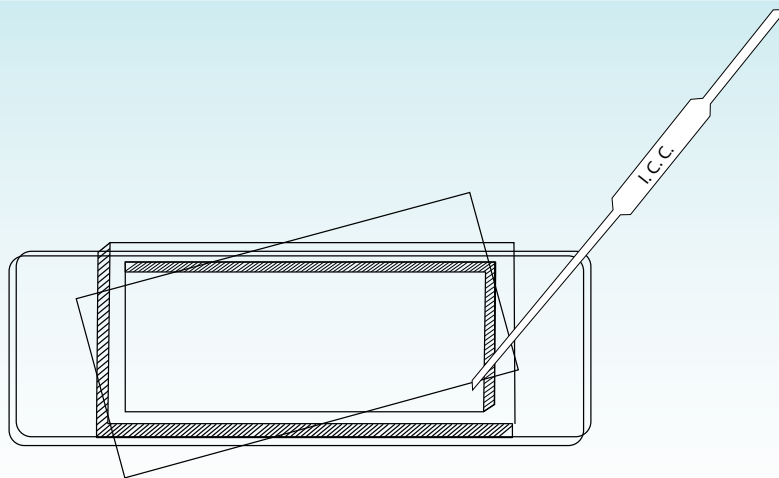


Figura 8-142. Proceso de sedimentación de la muestra de zooplancton en las cámaras Sedgwick-Rafter. Fuente: (Whipple et al., 1927).

En el caso de ocurrencia de organismos grandes, las cámaras Bogorov pueden tener varios volúmenes (6, 10 o más ml) y son apropiadas para el recuento de organismos medianos a grandes del zooplancton, como cladóceros y copépodos (Pinilla, 2017).

Para el montaje de estos organismos, agitar la muestra y tomar con la ayuda de la pipeta plásti-

ca, una alícuota de 5 o más ml (dependiendo de la capacidad de la cámara) y depositar en la cámara dejando reposar la muestra entre 10 a 15 min aproximados (Figura 8-143). Luego realizar la observación en el estereoscopio.

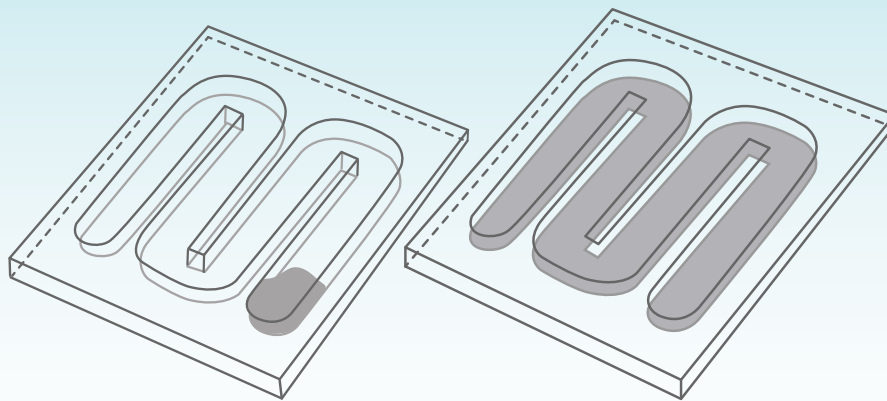


Figura 8-143. Cámara Borogov para conteo de zooplancton.
Fuente: (Pinilla, 2017).

La estimación de la densidad de cada morfotipo de las muestras observadas con la cámara Sed-

gewick-Rafter se realiza aplicando la Ecuación 8-57 (APHA-AWWA-WPCF, 1992):

$$\text{Individuos } L^{-1} = \frac{N * V_c}{V_{s-r} * V_f}$$

Ecuación 8-57

Donde,

- N*: Número de organismos contados.
- V_c*: Volumen de la muestra concentrada (ml).
- V_{s-r}*: Volumen contado (sedimentado), (ml).
- V_f*: Volumen filtrado (ml).

Si la muestra ha sido diluida, multiplicar el número de organismos por ml obtenidas, por el factor de dilución.

Si la densidad es alta revisar al menos cinco alícuotas de 1 ml cada una utilizando la cámara de conteo Sedgwick Rafter. Finalmente se aplica la siguiente Ecuación 8-58:

$$\text{Individuos } L^{-1} = \left(\frac{N}{\frac{V_{\text{contado}} * V_f}{V_c}} \right)$$

Ecuación 8-58

Donde,

N: Número de organismos contados.
V_{contado}: Volumen contado (l).
V_f: Volumen filtrado (l).
V_c: Volumen concentrado (l).

Las muestras observadas con la cámara Bogorov, requieren la realización de los cálculos dividiendo el número de organismos de cada taxón por el volumen

de la muestra colocada en la cámara y multiplicándolo por el factor de concentración (Ecuación 8-59), (Farhadian & Pouladi, 2014):

$$\text{Individuos } L^{-1} = \left(\frac{N}{V_{\text{Bogorov}}} \right) * \left(\frac{V_c}{V_f} \right)$$

Ecuación 8-59

Donde,

N: Número de organismos contados en toda la cámara.
V_{Bogorov}: Volumen colocado en la cámara (en ml).
V_c: Volumen final concentrado (en ml).
V_f: Volumen original filtrado (en l).



Páramo de Guacheneque (Villapinzón-Cundinamarca)-Laguna El Mapa.
📍 Germán Merchán

8.2.2.3 Organismos bentónicos y asociados

En este aparte se ilustra el monitoreo hidrobiológico de algas perifíticas y diatomeas.

Algas perifíticas

El perifiton es una comunidad acuática constituida por todos los organismos (bacterias, hongos,

algas, protozoarios, rotíferos) que están adheridos a un sustrato natural o artificial (Allan & Castillo, 2007). La mayor fracción de la biomasa de esta comunidad corresponde a productores primarios por lo que también reciben el nombre de ficoperifiton o algas bénticas (Figura 8-144).



Figura 8-144. Algunas especies de algas perifíticas. A: *Anabaena* sp. B: *Gomphonema* sp. C: *Trachelomonas* sp. D: *Eunotia* sp.

Estas algas tienen un ciclo de vida corto y al estar adheridas responden rápido a los cambios físicos, químicos y al disturbio biológico, es así como son buenos indicadores del estado del ecosistema (Stevenson & Bahls, 1999). Están adheridas al sustrato (que puede ser orgánico o inorgánico, vivo o muerto para formar una fina capa de pocos milímetros (biofilm) ubicada entre el sustrato y la capa de agua que lo rodea (Wetzel, 2001).

Esta compleja comunidad además de ser productiva, puede ser:

- ♦ Un gran regulador del flujo de nutrientes en aguas interiores (Wetzel, 1990).
- ♦ La base de la cadena alimenticia de los ecosistemas acuáticos ya que sus componentes actúan como reductores y transformadores de nutrientes (Araújo-Lima et al., 1986; Battin et al., 2003).

- ♦ Contribuye significativamente en la nutrición de la epifauna acuática asociada a los macrófitos (Soska, 1975) y es un gran alimento para algunas especies de peces de importancia económica como algunos loricáridos, así como de insectos y macroinvertebrados importantes para la dinámica de los ecosistemas acuáticos (Roldán, 1992).
- ♦ Ser utilizada para detectar cambios dentro del ecosistema, por ejemplo, la eutrofización (Mattila & Räsänen, 1998; Díaz et al., 2007) a través del análisis de algas Cyanophyceae o algas verde azules que se desarrollan principalmente en aguas con presencia de altos valores de alcalinidad y de materia orgánica (Andramunio, 2013).

La mayor fracción de la biomasa de esta comunidad corresponde a productores primarios que se denominan algas perifíticas, las cuales desempeñan un papel importante en los ecosistemas acuáticos, en especial lagos someros en donde su crecimiento es favorecido de forma potencial por las extensas zonas litorales (Vadeboncoeur & Steinman, 2002).

Además, estos organismos poseen atributos importantes para la bioindicación, por tres motivos principales: ubicuidad, ya que están distribuidos prácticamente en todos los ambientes acuáticos; alta riqueza de especies, favorecen un sistema amplio de información para el monitoreo ambiental (Lowe & Pan, 1996) y cortos ciclos de vida de las especies respondiendo de esta forma rápida a las alteraciones ambientales (McCormick & Stevenson, 1998).

• Selección de puntos de monitoreo

Se sugiere una evaluación multi hábitat de tal manera que se tenga una sola muestra integrada que represente el ecosistema, para la evaluación

de la calidad del agua a partir de las comunidades algales perifíticas.

- Seleccionar un tramo en ríos vadeables. Algunos autores sugieren entre 30 a 40 veces el ancho del canal. Sin embargo, se debe evaluar previamente el acceso, la presencia de vertimientos y en general que represente el ecosistema.
- Tener en cuenta todos los tipos de sustratos y hábitats (pocetas, rápidos, áreas cercanas a la orilla); el muestreo debe proceder según la proporción de cada hábitat en el al tramo. Integrar todas las submuestras en un solo frasco.
- Escoger sustratos que estén sumergidos totalmente en el agua, que no estén en completa oscuridad (por ejemplo, cuevas o debajo de raíces, debajo de pilas de piedra), y que tengan estabilidad y no deriven fácil en el cauce.
- En los ríos no vadeables el muestreo del perifiton está sujeto a las zonas cercanas a la zona riparia, donde es posible encontrar un número mayor de sustratos de colonización, observar con cuidado que el sustrato no haya sido recientemente inundado.
- La selección de puntos de muestreo depende de los objetivos del proyecto. Sin embargo, en monitoreos de la comunidad de algas perifíticas se recomienda mantener el mismo punto de muestreo a largo plazo.

Es importante tener en cuenta que, para la evaluación de esta comunidad algal, se requieren de diferentes métodos de colecta según el sustrato donde se desarrolle la comunidad.

Simultáneo a la colecta de muestras de algas perifíticas se recomienda registrar los parámetros fisicoquímicos.

• Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de monitoreo obedece a los objetivos del proyecto. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y sequía), no obstante, el interés de la investigación determinará los periodos de muestreo. Se recomienda como mínimo realizar dos monitoreos por año, siempre en épocas contrastantes.

• Tipos de muestra

El tipo de muestras puede ser compuesta, cualitativa, semicualitativa o cuantitativa.

Muestras compuestas: corresponde a la colecta de ficoperifiton proveniente de diferentes tipos de sustrato en un tramo seleccionado y de diferentes hábitats o biotopos (corriente rápida, lenta, remansos, etc.). Estas muestras representan toda la variabilidad física en el tramo de muestreo o multi hábitat.

Muestras cualitativas, semicuantitativas o cuantitativas: El tipo de muestreo depende de la técnica empleada para extraer la muestra; los dos primeros establecen los organismos presentes, su proporción, pero no cuantifican la biomasa. Para la cuantificación es necesario establecer un área de muestreo por muestra. La cuantificación de la biomasa permite hacer un seguimiento de los cambios espaciales y temporales del sistema. Adicional, permite la aplicación de índices de bioindicación.

• Materiales y equipos

Los materiales y equipos de campo constan de:

Protección personal:

- Overol plástico o fontanero (en caso de acceder al cuerpo de agua caminando).
- Botas impermeables.
- Chaleco salvavidas con línea de vida.
- Guantes de nitrilo.
- Gorro con protección solar.

- Intercomunicadores.
- Equipo de primeros auxilios.

Materiales:

- Frascos plásticos que garanticen que no hay paso de luz de 100 o 250 ml de boca ancha, previamente etiquetados, por fuera del frasco.
- Cepillo de cerdas suaves (un cepillo nuevo, por cada sitio de muestreo).
- Hoja de navaja tipo Minora forrada en papel aluminio.
- Perifitómetro o muestreador de área conocida.
- Pipetas plásticas.
- Navaja.
- Red de plancton tamaño de poro de 20 μm .
- Rastrillo de mango largo con red fina adherida, para el muestreo de sustratos verticales como estructuras de concreto de difícil acceso o paredes rocosas en el río.
- Tubo de PVC con borde de caucho, cepillo de mango largo y pipeta con pera succionadora en el caso de sustratos sumergidos y de difícil manejo.
- Jeringa para el muestreo de sustratos blandos de 50 ml sin aguja.
- Sonda multiparamétrica con al menos sensores de temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad previamente calibrado.
- Aparato de localización geográfica (GPS).
- Neveras portátiles para transporte de la muestra.
- Bolígrafo o rotulador permanente para etiquetar las muestras. Las etiquetas deben ser resistentes a la humedad.
- Reloj.
- Agua destilada.

Nota de construcción: En el caso del perifitómetro, se construye con dos jeringas, una de 20 ml y otra de

60 ml; a esta última se le retira una porción de goma del émbolo. Este caucho se adhiere con silicona a la base de 20 ml, la cual se debe modificar cortando la parte superior correspondiente al área de inserción de la aguja (Figura 8-145). La muestra se raspa con ayuda de un cepillo pequeño que también se debe construir.

Reactivos: Las muestras de perifiton suelen preservarse con formol al 10 %, algunos autores sugieren el uso de formol tamponado para evitar la disolución

de las frústulas de diatomeas a largo plazo. También se puede usar solución de Lugol.

Otro fijador menos común es alcohol al 70 % o solución Transeau la cual se prepara en una proporción de 6:3:1, correspondientes a seis partes de agua destilada, tres partes de alcohol y una de formol, se adiciona a la muestra en proporción 1:1, es decir se debe adicionar el mismo volumen de preservante que de muestra.



Figura 8-145. Elementos para la construcción de un perifitómetro.

• Procedimiento de toma de muestras

En cada punto de muestreo (independientemente del tipo de sistema: lótico o léntico) se establece una franja de 10 m en la cual se seleccionan tres zonas en donde se encuentren el mayor número de sustratos disponibles y respondan a las siguientes características:

- Como criterio general, es recomendable muestrear las comunidades (superficies parduzcas resbaladizas) que se desarrollen sobre sustratos duros estables situados en zonas sumergidas del lecho fluvial o del litoral de lagos como: rocas, piedras y cantos rodados de un tamaño mínimo de 10 x 10 cm.
- En caso de no encontrarse este tipo de sustrato, se puede tomar la muestra en estructuras construidas por el hombre como pilares de puentes o paredes de infraestructuras hidráulicas.
- La limpieza de los sustratos seleccionados se debe realizar dependiendo del tipo de sustrato colonizado, pero siempre teniendo claro el valor del área por muestrear. Esta limpieza puede realizarse con

un cepillo de dientes y/o pincel de cerdas duras. Para estimar el área de muestreo, se recomienda utilizar como unidad de área un cuadrante de 9

cm² (Figura 8-146), el cual debe replicarse mínimo cinco veces sobre el sustrato seleccionado.

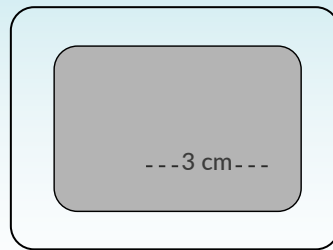


Figura 8-146. Área del cuadrante.

En caso de muestrear sustratos verticales como estructuras de concreto de difícil acceso o paredes rocosas en el río, es necesario utilizar un rastrillo de mango largo con red fina adherida.

Para sustratos sumergidos y de difícil manejo, se puede hacer uso de un tubo de PVC con borde de caucho, cepillo de mango largo y pipeta con pera succionadora.

Finalmente, para el caso de sustratos blandos (como arena) se hace uso de una jeringa de 50 ml sin aguja.

Teniendo en cuenta el tipo de sustrato seleccionado, debe tenerse en cuenta la metodología adecuada para la remoción de la comunidad perifítica:

En sustratos duros tales como rocas o madera sumergida (raíces, troncos): Las piedras y cantos rodados

son los sustratos más idóneos. Si es posible extraiga el sustrato del agua, dépositelo sobre la bandeja y raspe un área conocida, por ejemplo, utilizando el cuadrante o el perifitómetro, con la ayuda de un cepillo de cerdas suaves (en algunos casos es necesario utilizar navaja para desprender organismos crustosos). Durante la remoción de la película perifítica el cepillo debe ser lavado, luego de cada cepillado, en agua destilada que ha sido almacenada previamente en el frasco colector. Este procedimiento se debe repetir hasta cubrir el área total de muestreo (240 cm²), tomar sustratos ubicados en los diferentes hábitats del tramo establecido (Figura 8-147).



Figura 8-147. Elementos utilizados para el muestreo de algas perifíticas sobre sustratos duros.

En el caso que los sustratos no sean removibles del cauce, por ejemplo, por su tamaño, se debe demarcar el área y raspar, colocar una red de plancton a contracorriente y asegurar que el material removido se deposite en la red.

En el caso de sustratos verticales, por ejemplo, puentes y estructuras de concreto sumergidas en el lecho es necesario raspar el área y depositar todo el material removido en la red con la ayuda de un mango largo con un rastrillo y red. En este tipo de muestreo y en todos aquellos que no sea posible tener un área efectiva de muestreo, los resultados serán de tipo semicuantitativo, es decir, se puede expresar la presencia de cada tipo de organismo en abundancia relativa. Se debe establecer un tiempo de muestreo

para cada submuestra e integrar en una muestra, para finalmente coleccionar en un frasco rotulado y preservar.

En sustratos blandos: Los limos, arcillas y arena son los sustratos comunes dentro de esta categoría.

Para cuantificar el perifiton en el sedimento se puede utilizar una jeringa o pipeta de 10 ml con pera de succión (Figura 8-148), a partir de un área conocida delimitada por ejemplo con un marco plástico, o cono acoplado a la pipeta.

Luego se deben succionar los primeros milímetros de sedimento correspondientes a la zona más iluminada. Esta técnica es recomendable para sitios de remanso o zonas litorales de ecosistemas lénticos con pocos centímetros de profundidad.

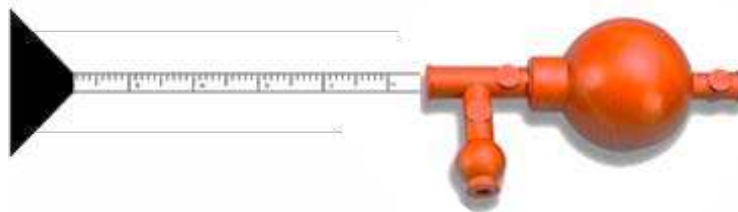


Figura 8-148. Elemento para muestrear las algas perifíticas de sustratos blandos.

También es posible utilizar un tubo de PVC de dos pulgadas, de longitud entre 15 a 20 cm, hundir sobre el sedimento y con la ayuda de una espátula, retirar la capa superficial, depositar en el frasco rotulado dispuesto para su recolección y una vez cubierta el área de muestreo, preservar.

En caso de que el sustrato esté compuesto de arena y en zonas corrientosas, se puede evaluar la composición a partir de la remoción del sustrato superficial con los pies generando una

suspensión del mismo. Con la red de plancton unos centímetros aguas abajo y aprovechando la fuerza de la corriente se captura el material más fino. Sin embargo, se debe tener cuidado de no saturar la red al primer intento. Este procedimiento se debe estandarizar por tiempo en diferentes zonas del río. Una vez recoja todas las submuestras preserve la muestra. La evaluación será semicuantitativa expresando la ocurrencia de cada organismo en proporciones relativas.

Sustratos en vegetación acuática: En tramos lénticos de ríos con abundante crecimiento de vegetación acuática, o en sistemas lénticos como lagos, morichales, humedales es común este tipo de muestreo. El procedimiento depende del tipo de macrófitas dominante (UJTL, 2018).

- **Plantas acuáticas sumergidas:** Se deben seleccionar tres plantas al azar por cada zona de muestreo del punto elegido (franja de 10 metros). Recoger la planta entera, si es pequeña, o bien cortar una parte (10 cm aproximadamente de la parte media del tallo de la planta o de entre 10 y 15 cm de crecimiento por debajo del espejo de agua) utilizando las tijeras podadoras. Guardar la planta (o su parte) en una bolsa de plástico de cierre hermético evitando las partes

sumergidas de las hojas flotantes por no recibir luz directa. Finalmente se guardan las muestras en la nevera junto con hielo sintético, hasta la llegada al laboratorio donde se continuará la limpieza del material.

- **Macrófitas emergentes:** Las muestras solo pueden tomarse sobre macrófitos emergentes que contengan porciones que permanezcan sumergidas, pero que no estén contaminadas por sedimentos del fondo (Figura 8-149). Se cortan tres tallos al azar por cada zona de muestreo del punto elegido (franja de 10 m), de aquellas plantas que se encuentren por debajo del nivel del agua. Para ello se debe poner una bolsa plástica de cierre hermético debajo de la parte sumergida del tallo y cortar con tijera podadora una superficie de 10 cm aproximados.



Figura 8-149. Muestreo de algas perifíticas.

Al final se guardan las muestras en la nevera junto con hielo sintético, hasta la llegada al laboratorio donde se continuará la limpieza del material.

- **En macrófitas, hojas sumergidas, musgos:** Se cortan con navaja partes de las plantas para luego frotarlas suave con el cepillo y remover las algas con

agua destilada. Es conveniente evitar las partes sumergidas que no reciban luz directa. Luego deben almacenarse las porciones raspadas de la planta en una bolsa, adicionar alcohol y pegar con cinta al frasco de la muestra, con el fin de cuantificar el área raspada en el laboratorio.

En caso de realizar un muestreo semicuantitativo, se pueden estrujar partes sumergidas de las plantas en el frasco contenedor y estandarizar cada submuestra por tiempo (Figura 8-150). Una vez se complete un número representativo de plantas, coleccionar en un frasco rotulado y preservar la muestra.



Figura 8-150. Estrujamiento o squeezing de plantas acuáticas para el muestreo de algas perifíticas.

- **En sustratos artificiales:** Este tipo de sustrato se puede usar en ambientes donde es inviable realizar muestreos cuantitativos sobre sustratos naturales, por ejemplo, ríos con lecho arenoso, ríos muy caudalosos y no vadeables, y también en casos en donde se desee

conocer el proceso de colonización y sucesión de la comunidad perifítica.

Los sustratos artificiales dependerán del objetivo del trabajo, siendo los más utilizados portaobjetos esmerilados o placas de cerámica y acetatos rugosos.

Estos se ubican en estructuras diseñadas para mantenerse en la corriente en sitios que permanezcan inundados y en zonas iluminadas.

Cada dispositivo instalado debe contar con un lastre que asegure, durante todo el tiempo del muestreo, la permanencia del sustrato artificial en el lugar instalado. El tiempo estimado para garantizar la colonización de la fracción perifítica varía entre 15 a 30 días, según el sistema, por lo tanto, este es el tiempo que se debe dejar antes de realizar el muestreo.

A continuación, se retiran en un lapso conocido de tiempo (por ejemplo, cada tres días), algunas láminas o placas para ir observando el proceso de colonización,

hacer este procedimiento hasta terminar el proceso. El sustrato retirado se deposita en una bolsa de cierre hermético o directo en un frasco colector previamente rotulado, hasta su limpieza en el laboratorio. Este tiempo no debe ser superior a 12 horas. La limpieza también puede hacerse en el campo.

El sustrato se limpia raspando con un cepillo de cerdas suaves o pincel de punta gruesa, para obtener el biofilm (película adherida sobre el sustrato, conformada por comunidades biológicas). Al terminar, se deposita la muestra en un frasco rotulado y preservar la muestra hasta su análisis (Figura 8-151).



Figura 8-151. Proceso de instalación y recolección de sustratos artificiales para la obtención de las muestras de la comunidad perifítica. Fuente: (Andramunio, 2013).

Preservar y fijar la muestra dependiendo del tipo de muestra colectada, los reactivos utilizados para la fijación y preservación de la muestra dependerán:

- **En muestras cualitativas:** se utiliza solución Transeau compuesta de agua destilada, etanol al 90 % y formol al 40 % en proporciones 6:3:1 respectivamente. La conservación de la muestra se hará en

proporción 1:1 (por ejemplo, 50 ml de muestra y 50 ml de solución Transeau).

- **En muestras cuantitativas:** se utiliza solución Lugol en volumen de 1 ml por cada 100 ml de muestra o hasta que esta tome una coloración ámbar.

Finalmente, para el proceso de etiquetado, registro fotográfico, transporte y recepción se siguen las

instrucciones consignadas en la sección de trabajo de campo de la comunidad fitoplanctónica.

• **Laboratorio**

A continuación, se enlistan todos y cada uno de los materiales, equipos y reactivos necesarios para el análisis de muestras en organismos bentónicos y asociados:

Protección personal: Se requieren los siguientes elementos:

- Bata de laboratorio.
- Guantes de látex.

Materiales: Para el análisis se requieren los siguientes materiales:

- Cuadrante de acetato de 3 x 3 cm.
- Cepillo de cerdas duras.
- Pinceles.
- Bandeja blanca.
- Frascos plásticos blancos tapa rosca de boca ancha de 250 ml.
- Frasco lavador.
- Pipetas Pasteur plástica de 3 ml.
- Cámaras de sedimentación Sedgwick Rafter.
- Láminas porta y cubre objetos.
- Probeta de 1000 ml.
- Papel secante.
- Papel de arroz.
- Aceite de inmersión.
- Claves taxonómicas.
- Formato Registro taxonómico y número de organismos.

Equipos: Los equipos necesarios para realizar el análisis son los siguientes:

- Microscopio óptico.
- Microscopio invertido.
- Calibrador digital.
- Cámara fotográfica.

Reactivos: Para realizar el análisis de las muestras en muestras de organismos bentónicos se requieren los siguientes reactivos:

- Agua destilada.
- Formol al 10 %, algunos autores sugieren el uso de formol tamponado para evitar la disolución de las frústulas de diatomeas a largo plazo.
- Solución Transeau (proporción 6:3:1 de agua destilada, etanol al 70 % y formol al 40 %).
- Lugol concentrado.

En caso de haber colectado en campo sustratos (macrófitas, troncos, hojas, etc.) para la limpieza en laboratorio, seguir el siguiente procedimiento (UJTL, 2018).

1. Sacar con pinzas cuidadosamente el sustrato de la bolsa y/o frasco que lo contengan.
2. Tomar el cuadrante de muestreo (lámina de 3 x 3 cm²), colocarlo en la superficie del sustrato y realizar el lavado con agua destilada sobre una bandeja blanca usando el cepillo y/o pincel para remover la comunidad.
3. Si la comunidad presenta desarrollo costroso, es importante realizar la limpieza con la cuchilla tipo Minora (previamente forrada en papel aluminio).
4. En caso de tratarse de raíces muy pequeñas o en donde no sea posible hacer uso del cuadrante, se deberá medir la superficie con un calibrador digital (diámetro y alto) y registrar los valores para posterior aplicación de la fórmula de conteo.
5. Las muestras obtenidas serán preservadas en frascos plásticos de 250 ml debidamente etiquetadas con formol al 10 % o Transeau en proporción 1:1, si se trata de muestras cualitativas o Lugol concentrado o hasta lograr coloración ámbar para muestras cuantitativas.



Parque Nacional Natural Chingaza
■ Aura María Bustillo

- **Análisis de las muestras**

Se detalla en este aparte el procedimiento para las muestras cuantitativas o cualitativas.

Muestras cualitativas: Para la determinación de organismos se deben realizar los siguientes pasos:

- Evitar la contaminación de las muestras, se debe trabajar con material propio cada una de ellas, por lo tanto, las pipetas y los frascos se deben marcar con el código asignado en laboratorio.
 - Tomar del fondo de la muestra una alícuota y dejar en reposo por al menos 24 horas.
 - Poner una gota en un portaobjetos y cubrir con un cubreobjetos, observar en el microscopio óptico en objetivo de 40x y de 100x (con ayuda de aceite de inmersión).
 - Identificar los organismos en el mínimo nivel taxonómico posible, mediante claves especializadas.
 - Identificar los morfotipos presentes.
 - Realizar tinciones con tinta china o los procedimientos que las claves taxonómicas sugieren para las identificaciones.
 - Tomar las medidas correspondientes con la reglilla ocular previamente calibrada para la identificación de géneros y especies.
 - Realizar registros fotográficos de los diferentes morfotipos.
- Muestras cuantitativas:** Para la cuantificación de organismos se deben realizar los siguientes pasos:
- Agitar la muestra mediante el movimiento vigoroso del frasco contenedor, combinando movimientos verticales y horizontales durante máximo 30 segundos. Un tiempo superior a este podría dañar el material algal, fraccionando los individuos y alterando el conteo real de la muestra.
 - Extraer con una pipeta plástica Pasteur una alícuota de muestra de 1 ml y transferir inmediatamente a la cámara de conteo Sedgwick Rafter, evitar la formación de burbujas y cubrir. De generarse burbujas, colocar una gota de agua destilada junto a la esquina donde se encuentre el espacio de aire.
 - Colocar la cámara en un lugar plano, sin luz directa del sol y dejar sedimentar durante una hora.
 - Realizar una visualización previa al conteo en el microscopio invertido. Si la densidad de algas o sedimentos es muy alta, de modo que no es posible realizar el conteo, la muestra debe ser diluida. Para esto, extraer un volumen medido de muestra y adicionar agua destilada en la proporción requerida según la densidad de algas.
 - En el caso en que la muestra presente muy bajas densidades de células, concentre la muestra por sedimentación para agilizar el conteo.
 - Utilizar para la observación de algas perifíticas muy pequeñas, una cámara de conteo de nanoplancton, celda Palmer Maloney (10 µl) para microscopio compuesto (Figura 8-152).
 - Homogeneizar la muestra, tomar una alícuota y proceder a llenar la cámara Palmer Maloney.
 - Dejar reposar la muestra por un periodo de 10 minutos.
 - Realizar el conteo por campos al azar. El número de campos depende de la densidad y variedad de organismos en la muestra, así como de la precisión estadística deseada.
 - Efectuar el conteo hasta alcanzar 400 organismos en total en un rango no inferior de 20 campos hasta 40 campos.
 - Efectuar el conteo a una magnificación total de 400X (objetivo de 40X).

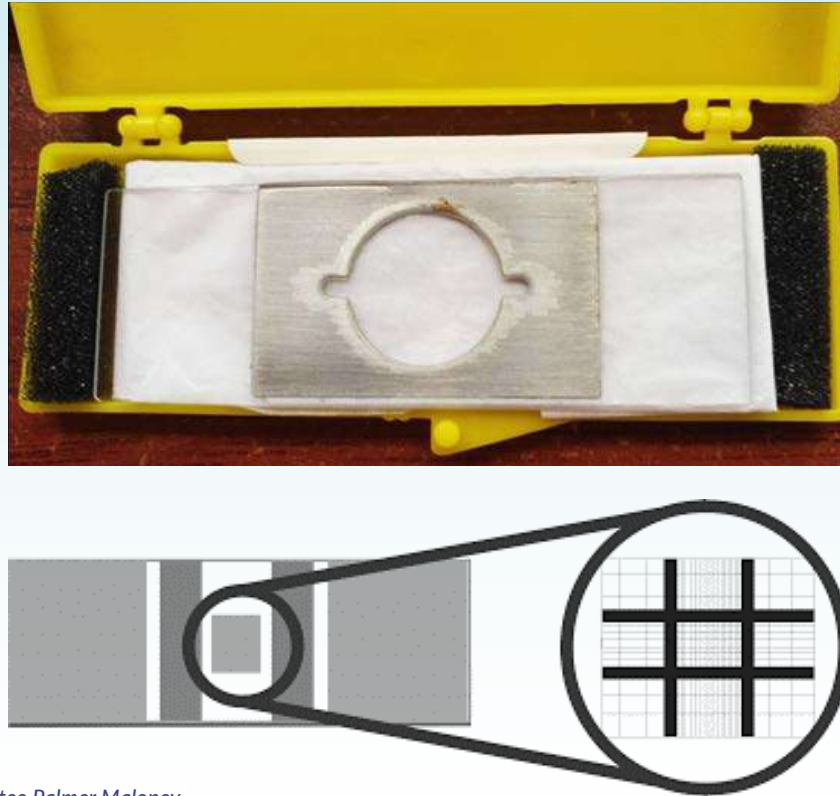


Figura 8-152. Celda de conteo Palmer Maloney.

El recuento de organismos debe garantizar la calibración del sistema de medición del microscopio. Se requiere establecer las reglas de conteo y el nivel taxonómico que se va a trabajar a nivel de género y especie (European Standard, 2004). Las características morfológicas de las algas perifíticas son importantes para la clasificación y determinación taxonómica de las diatomeas. Es pertinente realizar el conteo de valvas a 400X y 1000X, según los siguientes criterios:

- Para los organismos filamentosos, independiente que se les pueda distinguir o no la separación de las células, estos serán contados como un solo individuo.
- Los organismos coloniales serán contados como un individuo (toda la matriz que los contenga, in-

dependiente del tamaño o número de células que la conformen).

- Los organismos que queden en el límite del campo observado, serán incluidos en el campo actual de conteo siempre y cuando más de la mitad del individuo quede dentro de él.

El conteo por campos se realizará siguiendo los procedimientos relacionados a continuación:

- La numeración de los individuos de cada especie se realiza por unidad natural (individuos, colonias o filamentos). El número de objetivo por contar es de 40x.
- Realizar el conteo por campos iniciando desde la esquina superior izquierda de la cámara (Figura 8-153),

moviendo la platina verticalmente hacia abajo hasta el borde inferior de la cámara en donde se debe desplazar de forma horizontal al campo siguiente,

para realizar el mismo procedimiento hasta contar 100 unidades de la morfoespecie más abundante.



Figura 8-153. Descripción del proceso para el conteo de la muestra de perifiton en las cámaras Sedgwick-Rafter. Fuente: (UJTL, 2018).

- Una vez se cuenten entre 200 y 400 individuos de la morfoespecie más abundante, se debe continuar con la observación de la cámara reportando por campo las nuevas morfoespecies que van apareciendo hasta terminar la observación de toda la cámara. A este procedimiento se le denomina barrido.
- Efectuar la identificación correspondiente, haciendo uso de claves taxonómicas.
- Tomar fotografías a cada taxa identificado y registrar en un formato.
- Llevar el registro respectivo en el formato de registro taxonómico y número de organismos (Anexo 8-19).
- Devolver al frasco original, la muestra sedimentada una vez terminada la observación, con el fin de conservar la muestra en su totalidad.

- Lavar las cámaras entre usos con agua y detergente neutro.

Si se realiza conteo al azar:

- El número de campos depende de la densidad y variedad de organismos en la muestra, así como la precisión estadística deseada.
- Realizar el conteo hasta alcanzar 400 organismos en total, en un rango no inferior de 20 hasta 40 campos.

Ahora bien, si se realiza el conteo con Sedgewick Rafter se debe utilizar la siguiente fórmula (APHA et al., 2005), para el cálculo de la densidad de organismos (Ecuación 8-60):

$$\frac{\text{Organismos}}{\text{cm}^2} = \frac{N \times A_t \times V_t}{A_c \times n_c \times V_s \times A_s}$$

Ecuación 8-60

Donde,

N : Número de individuos contados.
 A_t : Área total de la cámara (cm^2).
 V_t : Volumen total de la muestra (ml).
 A_c : Área del campo de observación (cm^2).
 n_c : Número de campos observados.
 V_s : Volumen sedimentado (ml).
 A_s : Área del sustrato (cm^2).

En caso de haber diluido o concentrado la muestra, se utiliza V_s como el valor de la muestra tomado antes de realizar dilución o concentración. También se puede usar como V_s el valor de la cámara y después de realizar el cálculo de organismos/ cm^2 multiplicar el resultado por el factor de dilución o concentración, según sea el caso.

Si se realiza la prueba de conteo con Palmer Maloney se debe efectuar el conteo por campos al azar y calcular el número de organismos por cm^2 utilizando la siguiente ecuación adaptada (Lowe & LaLiberte, 2006), (Ecuación 8-61):

$$N^{\circ} \frac{Org}{cm^2} = \frac{N \times V_t}{V_c n_c A_s}$$

Ecuación 8-61

Donde,

N : Número de individuos contados.
 V_t : Volumen total de la muestra (ml).
 V_c : Volumen contenido en un simple campo (ml).
 n_c : Número de campos observados.
 A_s : Área del sustrato (cm^2).
 V_c se puede calcular según la Ecuación 8-62:

$$V_c = \pi \times r^2 \times d$$

Ecuación 8-62

Donde,

r : Radio del campo del microscopio.
 d : Profundidad de la cámara (La Palmer Maloney tiene una profundidad de 0.4mm).

Si no fuese posible realizar el conteo por campos al azar, por muy baja densidad algal y el alto contenido de material particulado en la muestra, entonces

se procede a contar toda la cámara. En ese caso el número de organismos por cm^2 se estima utilizando la Ecuación 8-63:

$$N^{\circ} \text{ de organismos/ } cm^2 = \frac{N \times V_t}{0.1 \text{ ml} \times A_s}$$

Ecuación 8-63

Donde,

N: Número de individuos contados.

V_t: Volumen total de la muestra (ml).

A_s: Área del sustrato (cm^2).

Si en cualquiera de las formas anteriores de conteo (campos al azar o cámara completa), fue necesario concentrar o diluir la muestra, se debe obtener el factor de dilución o de concentración y multiplicar o dividir (respectivamente) el $N^{\circ}Org/ml$ por dicho factor.

Simultáneo al conteo se diligencian los formatos donde se consigna el taxón y el número de veces que encuentra el organismo por área del campo visual. Una vez terminado el conteo, se realiza un recorrido por toda la cámara con el fin de verificar que se registre el total de taxones (géneros, especies o morfotipos).

Los datos obtenidos, se registran en la base de datos del SIB Colombia.

Diatomeas

Las diatomeas son microorganismos acuáticos cuya principal característica es la presencia de una pared celular de sílice (Figura 8-154). Las diatomeas bentónicas (establecidas sobre un sustrato natural o artificial), son ampliamente utilizadas como indicadores de la calidad del agua debido a que la estructura de estas comunidades es influenciada por cambios físicos, químicos y biológicos (Smucker & Vis, 2011); (Kireta et al., 2012); (Beyene et al., 2014); (Lavoie et al., 2014); (Malavoi & Souchon, 2002); (Prygiel & Coste, 2000); (Coste et al., 2009).





Figura 8-154. Algunas especies de Diatomeas. Arriba: a) *Tabellaria fenestra*, b) *Pinnularia microstaurum*, c) *Gomphonema coronatum*, abajo: d) *Frustulia saxonica*, e) *Encyonema sp.*, f) *Navicula sp.*

Su importancia como bioindicadores radica en su abundancia, diversidad, ubicuidad, amplio rango de autoecología, sensibilidad a la contaminación, facilidad de muestreo, transporte y almacenamiento (Martín et al., 2010).

• Selección de puntos de monitoreo

Es importante definir el tiempo de muestreo para que los efectos del régimen hidrológico no enmascaren las alteraciones que se pretenden estudiar (Smucker & Vis, 2011). Por ejemplo, en la época de lluvias los aumentos de flujo o velocidad puedan afectar la estructura de la comunidad de diatomeas (Bere, 2010). Por lo tanto, se debe determinar un período hidrológico estable que permita el muestreo de una comunidad en equilibrio.

En corrientes vadeables, dependiendo de la disponibilidad de sustratos removibles, se realiza el muestreo dando prioridad al sustrato rocoso. Si

en la estación de muestreo no hay sustrato rocoso, efectúe el muestreo sobre sustratos no naturales (ladrillos, baldosas) o sobre macrófitas enraizadas emergentes o sumergidas.

En corrientes no vadeables se puede realizar el muestreo de macrófitas enraizadas emergentes o sumergidas y estructuras de concreto (muros de contención, estructuras de apoyo en puentes, muelles).

Se recomienda extraer el sustrato de un microhábitat con las siguientes características (Figura 8-155):

- Bien iluminado, evitar lugares con sombra.
- Zona corriente del río, evitar el muestreo en zonas de remanso.
- Profundidad aproximada de 10-20 cm.
- Lejos de posibles perturbaciones puntuales. Si el muestreo se va a realizar en un punto con descargas, estimar la distancia aguas arriba y aguas abajo en que se va a realizar el muestreo.



Figura 8-155. Características para el monitoreo de diatomeas: corriente vadeable, buena iluminación, sustratos abundantes.

El sustrato por muestrear debe tener las siguientes características:

- Que sea extraído dentro de la zona eufótica (porción de la columna de agua en donde llega la luz necesaria para la fotosíntesis).
- Que pueda ser extraído con facilidad.
- Que tenga estabilidad para no ser arrastrado con facilidad por la corriente.
- Que no hayan quedado expuestos al aire en algún momento del ciclo hidrológico.
- Que tenga un biofilm pardo, evitar el muestreo de sustratos con biofilm verde.
- Que no esté muy cerca a la orilla.

Como complemento, debe hacerse una descripción detallada del lugar de muestreo: localización, anchura, profundidad, tipo de sustrato, presencia y abundancia de macrófitas, grado de sombra y otros datos de interés ecológico. Toda esta información es valiosa para la interpretación de los resultados y facilita el trabajo de los siguientes muestreos (Cirujano et al., 2005).

- **Frecuencia de monitoreo**

Es recomendable seguir las mismas pautas sugeridas en la sección que describe el protocolo para el estudio del ficoperifiton.

- **Tipo de muestra**

Colectar muestras para análisis cualitativo.

- **Equipos**

Los mismos que se presentan en la sección de algas perifíticas.

- **Procedimiento de toma de muestras**

A continuación, se describe el procedimiento de toma de la muestra en los diferentes tipos de sustratos que se pueden encontrar en un sitio.

- **Muestreo sobre rocas o sustratos no naturales:**

Para realizar el muestreo sobre rocas o sustratos no naturales se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Seleccionar cantos rodados (6-25 cm), bloques (>25 cm) o sustratos no naturales (ladrillos, baldosas) de una profundidad mínima entre 10-20 cm, para garantizar que hayan estado sumergidas

durante todo el ciclo hidrológico. Colectar entre 5 y 10 sustratos para obtener un área muestreada mínima de 250 cm². Los sustratos deben irse colectando en dirección aguas arriba de la corriente. Enjuagar los sustratos antes de retirar el biofilm, con el fin de remover los sedimentos, valvas muertas o diatomeas no bentónicas (European Standard, 2003).

- Realizar el cepillado de la parte superior del sustrato y enjuagar sobre una vasija con ayuda de

un frasco lavador. Efectuar el cepillado con movimientos circulares para asegurar la total remoción del biofilm en las grietas del sustrato. Enjuagar el cepillo para transferir las diatomeas removidas y con ayuda del frasco lavador terminar de remover el biofilm. Esta operación se realiza con un cepillo de dientes por punto de muestreo. El volumen resultante del enjuague debe tener un color pardo (Figura 8-156).



Figura 8-156. Cepillado de la superficie superior del sustrato. El volumen resultante es de color pardo, se recoge en una vasija y se le adiciona la solución fijadora.

- Transferir la muestra a un frasco plástico debidamente rotulado, adicionar la solución fijadora y a continuación

tomar un registro fotográfico de los sustratos muestreados estimando el área muestreada (Figura 8-157).



Figura 8-157. Sustratos muestreados y estimación del área total muestreada.

Muestreo sobre macrófitas: Para este muestreo se escogen macrófitas enraizadas emergentes o sumergidas (no errantes). Se requiere coleccionar secciones de tallos y hojas, evitando las partes que hayan estado fuera del agua o las que se encuentren muy cerca del sedimento (Martín et al., 2010). Agitar las partes coleccionadas y enjuagarlas en una bolsa plástica con etanol, con el fin de desprender las diatomeas adheridas. Luego se retiran los restos de macrófitas y el volumen resultante del enjuague se transfiere a un frasco plástico debidamente rotulado.

Muestreo sobre sustratos no removibles: En los sustratos como muelles, estructuras de contención o de apoyo en puentes, se realiza el muestreo con una herramienta que permita remover el biofilm. Se transfiere el material coleccionado a un frasco plástico debidamente rotulado y luego se adiciona la solución fijadora. Se debe estimar el área muestreada y establecer la profundidad a la que se debe realizar el muestreo teniendo en cuenta los cambios de nivel del agua (por efecto del oleaje o por cambios en la profundidad de la corriente). Es conveniente seleccionar un área que no haya quedado expuesta al aire.

Finalmente, se registran los datos con las principales características del sitio de muestreo y de los sustratos muestreados en el *formato captura de datos en campo* (Anexo 8-21). Es recomendable la generación de una ficha descriptiva para cada una de las estaciones, con el registro fotográfico y la descripción detallada de la vegetación de ribera, cambios de uso del suelo, perturbaciones del ambiente (Anexo 8-18).

• Laboratorio

Se deben tener en cuenta los siguientes materiales, equipos, reactivos y preparación para el análisis en los diferentes tipos de sustratos:

Materiales: Para el análisis de las muestras se debe contar con los siguientes materiales:

- Pipetas Pasteur.
- Tubos de centrifugación.
- Cinta o etiquetas.
- Marcador permanente.
- Cubreobjetos.
- Resina Naphrax®.
- Vasos de precipitados o tubos de ebullición (uno por muestra).

Equipos: A continuación, se enlistan los equipos necesarios para realizar el análisis en los diferentes tipos de sustratos:

- Centrifugadora
- Cabina de extracción de vapores.
- Microscopio óptico con contraste de fases.
- Placa de calefacción.

Reactivos: Para realizar el análisis en los diferentes tipos de sustratos se requieren los siguientes reactivos:

- Peróxido de hidrógeno al 30 %.
- Ácido clorhídrico diluido.
- Ácido sulfúrico concentrado.
- Agua destilada.
- También algunos autores utilizan permanganato potásico y ácido oxálico saturado, sin embargo, su manipulación requiere condiciones de seguridad más estrictas por su alta toxicidad.

Preparación de la muestra: Se deben seguir los siguientes pasos para hacer la preparación de la muestra:

- Evitar la contaminación de las muestras y trabajar con material propio cada una de ellas, por lo tanto, las pipetas, frascos o tubos se deben marcar con el código asignado en laboratorio.

- Homogeneizar la muestra, dividir en dos alícuotas: una de ellas, debidamente rotulada entra al inventario de muestras sin digestión y se almacena en caso de necesitarse un análisis complementario o reproceso; con la segunda alícuota se procede a realizar la digestión de la materia orgánica.
- Antes de iniciar la digestión, se realiza una observación preliminar de la muestra para establecer la presencia y densidad de frústulos (pared celular de las diatomeas compuesta de sílice, conformada por dos valvas) vacíos. La valva es el componente estructural del frústulo (European Standard, 2004). Si se observa más de un 50 % de frústulos vacíos, descartar la muestra y revisar las condiciones del muestreo. Los valores de las variables fisicoquímicas o alteraciones específicas del entorno permiten establecer los factores que pudieran estar determinando el elevado porcentaje de mortalidad.
- Finalmente se procede a retirar la solución fijadora, se realizan tres lavados sucesivos, centrifugando a 1000 g por 20 min (APHA et al., 2012) sección 10200C.3, y se remueve el sobrenadante. Es pertinente, observar al microscopio una alícuota de sobrenadante a ser descartada para asegurar que no se están desechando diatomeas.

Digestión de la materia orgánica: La digestión de la muestra se hace con peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

30 % bajo una cabina de extracción de vapores. El volumen de H_2O_2 , tiempo y temperatura requeridos para la digestión depende de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. En muestras con gran cantidad de materia orgánica la reacción puede ser fuerte, por lo tanto, inicialmente se realiza la digestión a temperatura ambiente, agregando un volumen de H_2O_2 a un volumen de muestra en proporción 1:1.

Si la reacción no es muy fuerte, se continúa la adición de H_2O_2 hasta completar cinco volúmenes de la muestra inicial. En caso contrario se debe esperar (horas a días) para que la reacción ocurra antes de adicionar más H_2O_2 .

Las muestras se mantienen a una temperatura por debajo del punto de ebullición de la muestra (normalmente entre 50-80 °C). Si la materia orgánica no se ha digerido por completo, se sustituye el H_2O_2 al retirar el sobrenadante, sedimentar por centrifugación a 1000 g por 15 minutos o dejar la muestra en reposo por 24 horas.

Se observa una alícuota en el microscopio y si llega a detectarse la presencia de frústulos con materia orgánica, se hace un ciclo de digestión en frío con un volumen de ácido nítrico concentrado (Figura 8-158). Al finalizar la digestión deben adicionarse 13 gotas de HCl 1N para eliminar el carbonato de calcio.



Figura 8-158. Muestra antes de la digestión (izquierda: *Suriella* sp) y después de digestión de materia orgánica (derecha: *Suriella angusta*). Se ve el detalle necesario para la determinación taxonómica.

Cuando se observen los frústulos sin materia orgánica, realizar tres lavados resuspendiendo el pellet en agua destilada. Después del último lavado, es necesario re suspender el pellet en 5 ml de agua destilada y transferir a un frasco de almacenamiento. Esta muestra debidamente rotulada se ingresa al inventario de muestras digeridas. Se observa una preparación al microscopio y si presenta alta densidad de diatomeas, se diluye agregando más agua; si la preparación tiene baja densidad de diatomeas, se centrifuga y re suspende en un volumen menor al que se tenía inicialmente. Con esta muestra se procede a realizar la preparación de láminas. Finalmente, debe adicionarse solución fijadora para conservar la muestra a largo plazo.

Preparación de láminas: Se debe evitar la presencia de partículas de gran tamaño en la preparación, homogeneizar la muestra y esperar unos segundos para tomar la alícuota. Sobre una lámina cubreobjetos se dispone una gota de muestra con una pipeta Pasteur distribuyéndola de manera homogénea.

Cuando se haya secado la muestra (la evaporación se puede acelerar con calor, máximo 50 °C), verificar que la distribución de las valvas en la lámina cubreobjetos permita su conteo en un campo de 400X, es decir, que las valvas no estén superpuestas y se puedan observar con claridad sus características morfológicas.

Luego se alistan las láminas portaobjetos marcadas con el código de la muestra, ponerlas sobre la placa de calefacción (máximo 130 °C) y depositar sobre ellas una gota del medio de montaje. Cuando se observe la formación de burbujas en el medio de montaje, se coloca la lámina cubreobjetos de tal forma que la cara que contiene la muestra quede inmersa en el medio de montaje.

Luego se procede a retirar la lámina del calor y esperar que la resina se distribuya de manera homogénea sobre toda la lámina cubreobjetos; si permanecen burbujas, hay que eliminarlas con presión suave (Figura 8-159). Se preparan como mínimo dos láminas por muestra las cuales se ingresan debidamente rotuladas al inventario de la colección de diatomeas.



Figura 8-159. Sobre una lámina cubreobjetos se dispensa una gota de muestra A. Sobre una placa de calefacción se coloca la lámina portaobjetos con una gota del medio de montaje. Cuando se observa la formación de burbujas en el medio de montaje B, se coloca la A.

Recuento y determinación taxonómica de diatomeas: Una vez calibrado el sistema de medición del microscopio se definen las reglas de conteo y el nivel taxonómico que se va a trabajar (European Standard, 2004). Los organismos deben ser determinados hasta el nivel de especie.

Las características morfológicas de las valvas son importantes para la clasificación y determinación taxonómica de las diatomeas y por ello se realiza el conteo de valvas a 1000X, siguiendo los siguientes criterios:

- Contar al menos 400 valvas para tener un límite de confianza del 10 %, para un nivel de significancia del 95 %, (Venrick, 1978).
- La unidad natural de conteo corresponde a una valva si se presenta en vista valvar (posición en la que se observa la superficie de la valva).
- Contar dos unidades si en vista valvar se logra establecer la presencia de un frústulo intacto.
- Contar dos unidades si se observa un frústulo en vista pleural (posición en la que se observa el ángulo, bandas de sílice que unen las dos valvas que conforman el frústulo) y se logra la determinación taxonómica a nivel de especie.
- Contar todas las valvas en el campo.
- Realizar el conteo por transectos horizontales o verticales, considerando una debida separación entre ellos de tal forma que no haya superposición de las unidades que ya han sido contadas.
- Conservar siempre la misma dirección del conteo: por ejemplo, inicio en el extremo superior izquierdo con desplazamiento hacia la derecha.
- Incluir una unidad en el conteo si se observan tres cuartas partes de la valva.
- Contar las formas anormales de manera separada a la especie que se reporta, en el caso de que pueda ser determinada (ej., *Gomphonemalagenula* y *Gomphonemalagenula* teratológica).
- Registrar preparaciones y muestras.
- Etiquetar las preparaciones con un código que permita identificarlas inequívocamente en una base de datos que contenga todos los datos del sitio de muestreo.
- Guardar en frascos etiquetados la suspensión de las valvas-frústulos digeridas (limpias), para permitir hacer más preparaciones en el caso que sea necesario.

- Prevenir el crecimiento microbiano o la disolución química de los frústulos, añadir un fijador como el etanol o el formaldehído. También se recomienda guardar las muestras fijadas por si fuera necesario comprobar resultados anómalos (Vicente et al., 2005).

Las preparaciones de diatomeas se pueden guardar indefinidamente, hecho que permite revisar los resultados en el futuro. Por eso, es importante almacenar las preparaciones de forma correcta, como por ejemplo en un herbario.

8.2.2.4 Macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados acuáticos son todos aquellos invertebrados, en general, visibles al ojo humano y que habitan los ecosistemas de agua dulce, estuarinos y marinos. Entre estos, de acuerdo con el espacio que habitan en el cuerpo de agua y/o afinidad por el sustrato, se encuentran los macroinvertebrados bentónicos, que habitan en el sedimento u otros sustratos de fondo (rocas, arena, grava, troncos sumergidos, restos orgánicos, entre otros), y los macroinvertebrados asociados a macrófitas que, como su nombre lo indica, se encuentran sobre las diferentes estructuras de las plantas acuáticas que hacen parte del ecosistema, principalmente en sus raíces (Heckman, 1998), (Figura 8-160).

Estos dos grupos son los más utilizados para el monitoreo, pues aportan una gran representatividad a la muestra, sin embargo, es importante señalar que entre los macroinvertebrados acuáticos también existen individuos que prefieren la superficie de la lámina de agua (*neuston*), como es el caso de los *patinadores* (Gérridos y Mesovélidos), así como otros que nadan libremente en la columna de agua (*necton*), como

aquellos de las familias Dytiscidae y Gyrinidae, entre otros (Roldán & Ramírez, 2008). Igualmente, algunos

individuos construyen refugios, como tubos, o redes en donde viven durante parte del ciclo de vida.



Figura 8-160. Algunas especies de macroinvertebrados bénticos, A: *Ithytrichiasp.* B: *Hidroptitasp.* C: *Psephenosp.* D: *Anacroneuriasp.* E: *Microcilloepus.* F: *Anacroneuriasp.*

Los macroinvertebrados acuáticos han sido ampliamente usados como bioindicadores ya que cumplen con las siguientes características ecológicas: a) son organismos ubicuos; b) no muestran patrones de migraciones extensos y tampoco son organismos sésiles; c) son sensibles a los cambios ambientales por lo cual responden de manera más rápida a estos; d) su identificación taxonómica es relativamente sencilla; e) su colecta es fácil, así como la logística en campo, lo que hace económico el monitoreo; f) existe documentación extensa sobre los efectos de contaminantes específicos en las especies más comunes; g) cumplen un rol importante en el flujo de energía de los ecosistemas acuáticos, en donde son el eslabón entre productores primarios y depredadores superiores en la red trófica (Power, 1990), (Gray L., 1993), (Sheil et al., 1998), (Lampert & Sommer, 2007).

En consecuencia, estos organismos, junto con las algas planctónicas y perifíticas, se utilizan frecuentemente en la estimación de la calidad del agua (AQEM CONSORTIUM, 2002), debido a que la estructura de esta comunidad se altera por cambios físicos y químicos generados por diferentes tipos de impacto. (Roldán, 2003).

Los métodos propuestos en el presente protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos tales como: (Roldán, 1996), (Barbour et al., 1999), (AQEM CONSORTIUM, 2002), (Alba-Tercedor et al., 2005DMA), (Domínguez & Fernández, 2009), (Wantzen & Rueda, 2009), (Barbour et al., 2006), (Zúñiga, 2009), (Comité Europeo de Normalización [CEN], 2012), (Pinilla, 2017).

Selección de puntos de monitoreo

El diseño del muestreo para la comunidad de macroinvertebrados se realiza según los objetivos del

estudio (levantamiento de información de línea base, seguimiento rutinario de la calidad hidrobiológica, evaluación de impactos de una actividad específica, entre otros) y del tipo de métrica que se vaya a utilizar.

Si no es posible definir las estaciones de monitoreo en una salida de campo de reconocimiento, independiente del tipo de estudio, durante la campaña de toma de muestras se debe procurar seleccionar un tramo del ecosistema acuático que contenga las características más representativas del lugar. Es decir, alta heterogeneidad ambiental (formas del lecho, tipo de sustrato, velocidad de la corriente: umbrales, hoyas, tramos de profundidad media, grava, cantos, arena, entre otros), ya que la variabilidad de especies encontradas dentro de una población, está relacionada con la disponibilidad del recurso, el cual variará dependiendo de las características estructurales del hábitat (Darrigan et al., 2007).

Para monitoreos de largo plazo es importante asegurar que la muestra sea representativa del ecosistema y que el acceso al lugar seleccionado sea permanente.

En el caso en que se solicite un análisis comparativo para evaluar disturbios en los cuerpos de agua, es necesario establecer una estación de control (sitio de referencia) que no tenga influencia relevante de la afectación por evaluar (por ejemplo, puntos de vertimiento), y que deberá estar localizada dentro de la zona de estudio o pertenecer a la cuenca de la zona analizada. Es importante igualmente tener en cuenta la ubicación de los centros urbanos como posibles fuentes de contaminación.

Según el tipo de sistema se deben considerar las siguientes indicaciones para la selección de estaciones de muestreo:



Afluente al río Chinchiná, Vereda Montaña, Antigua Vía al Nevado - Manizales, Caldas

Richard Muñoz

- **Sistemas lóticos (aguas corrientes)**

Siempre establecer una o varias estaciones de referencia fuera de la influencia de la intervención (descargas de aguas residuales, ocupaciones de cauce, actividad ganadera, industrial o agrícola, entre otras) pero en la misma masa de agua. Esto será la base para comparar la biota en áreas intervenidas y no intervenidas. De preferencia, seleccionar al menos dos estaciones de referencia: una alejada de la descarga efluente y la otra cerca de la descarga, pero no sujeta a su influencia.

Aguas abajo de la intervención también es recomendable establecer más de una estación por evaluar (por ejemplo, a 100 y a 300 m aguas abajo), tener en cuenta el gradiente ambiental con el fin de determinar la extensión lineal de la afectación. En caso de vertimientos, tener presente que el muestreo debe ser realizado a una distancia donde ocurra el proceso de mezcla con el agua del río.

Igualmente, debe evitarse seleccionar tramos que por pulsos de inundación queden desconectados del canal principal en alguna temporada del año.

- **Sistemas lénticos (aguas quietas o estancadas)**

Si se desea evaluar una intervención puntual (por ejemplo, vertimientos) se deben muestrear varios puntos que reflejen la integridad del sistema (incluyen principalmente el sitio de la intervención). Entre otras indicaciones independientes del tipo de ecosistema, es importante tener en cuenta:

Para permitir la comparación de las comunidades de macroinvertebrados, todas las estaciones de muestreo son ecológicamente similares. El tipo de sustrato (limo, arena, arcilla, grava, rocas, macrófitas, etc.) y la velocidad de la corriente son características especiales determinantes en el caso de los macroin-

vertebrados acuáticos. De la misma manera, procurar condiciones similares de profundidad, presencia de fibras y anchura de la corriente, gradiente, cobertura de la orilla o del banco, entre otras.

- **Frecuencia de monitoreo**

Los ciclos generales de producción y consumo de los ecosistemas tropicales se consideraban anteriormente como constantes a lo largo de todo el año, no obstante, el régimen climático constituye el factor altamente condicionante de su estructura y productividad. (Galvis et al., 1989). De este modo, la precipitación, su cantidad y distribución a lo largo del año y la temperatura estrechamente asociada a la altitud, constituyen los principales componentes que enmarcan los ecosistemas dulce acuícolas tropicales (Ramírez & Viña, 1998).

De acuerdo con lo anterior, lo más recomendable es realizar al menos dos monitoreos al año durante los períodos climáticos estables de alta precipitación (aguas altas) y baja precipitación (aguas bajas), aunque esto no siempre es necesario y dependerá del diseño del estudio. En general, el período más crítico para los macroinvertebrados se caracteriza por condiciones de alta temperatura y bajo flujo. Por lo tanto, si el tiempo y los recursos financieros disponibles limitan la frecuencia de muestreo, se debe realizar al menos una medición durante la época de aguas más bajas (APHA et al., 2012). En caso de que el ecosistema sea intermitente, es decir, que pierda totalmente el flujo de agua y se seque total o parcial durante la temporada de aguas bajas, se recomienda realizar el monitoreo finalizando la época de transición entre las lluvias y la sequía.

Por otra parte, si los efluentes cambian de características u ocurren derrames se hará necesario

un muestreo más frecuente (semanal, quincenal, trimestral). Se debe tener en cuenta las colectas nocturnas cuando los organismos de *deriva* o de alimentación nocturna sean motivo de especial interés.

De otro lado, si el estudio pretende analizar el desarrollo poblacional de algunas especies en particular, el diseño de muestreo debe adaptarse a sus ciclos de vida (Domínguez & Fernández, 2009).

Asimismo, como en el trópico las variaciones del caudal (crecientes) son uno de los más importantes factores que intervienen en la dinámica de las poblaciones de macroinvertebrados acuáticos (Liévano, 2007), no se deben realizar muestreos después de lluvias intensas, ya que puede haber pérdida de organismos locales o encontrarse otros arrastrados por la corriente (Álvarez, 2005).

Además, durante estos eventos el caudal y la turbulencia de la corriente tiende a incrementar, lo que puede conllevar a crecidas repentinas (sobre todo en ecosistemas lóticos de pequeña magnitud) y poner en peligro al equipo de trabajo.

Después de una crecida o de una sequía se debe esperar entre 2 y 4 semanas para realizar el muestreo (Matthaei et al., 2000), (Wantzen & Pinto-Silva, 2006).

Tipos de muestras

Las muestras de macroinvertebrados acuáticos pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo.

• Muestra cuantitativa

Se pretende expresar la densidad de individuos por metro cuadrado m^2 . Estos datos son muy útiles para establecer la calidad del agua. Este tipo de muestras pueden ser colectadas con los diferentes tipos de dragas (Ekman, Peterson) y el corazonador en ríos

no vadeables, sistemas lénticos, con la red Surber y muestreador Hess en ríos vadeables.

• Muestra cualitativa

Permiten hacer las identificaciones de los organismos y un registro o listados de los morfotipos presentes en el cuerpo de agua. Los organismos en este caso solo se reportan como presencia-ausencia. Estas muestras también pueden ser colectadas con las diferentes dragas y el corazonador, así como con los diferentes tipos de redes de acuerdo con las características físicas del ecosistema.

Equipos

Los equipos necesarios para realizar la muestra de macroinvertebrados acuáticos son:

- ♦ Cámara fotográfica.
- ♦ Aparato de localización geográfica, GPS.
- ♦ Red tipo Surber: Se utiliza para la toma de muestras cuantitativas, en corrientes de agua vadeables. Se coloca sobre el sustrato con los dos marcos abiertos en ángulo recto, uno de ellos marca el área de sustrato donde se toman las muestras y el otro soporta una red para poner los organismos procedentes de la zona de toma de muestras. La malla es de tamaño estándar de 9 hilos/cm. Aunque una malla menor podría conseguir más cantidad de invertebrados pequeños y componentes jóvenes, también se obturaría más fácil y ejercería una mayor resistencia a la corriente que la malla más grande, lo que podría dar lugar a la pérdida de organismos debido a un lavado hacia atrás desde la red de muestra (Figura 8-161).



Figura 8-161. Red tipo Surber.
Fuente: (Laboratorio de Calidad Ambiental IDEAM, 2017).

- ♦ Dragas: Se usan para la toma de muestras cuantitativas en cuerpos de agua no vadeables:
- ♦ La draga Ekman: es útil para tomar muestras de cieno, lodo, fango arenoso con poca corriente.
- ♦ La draga de Peterson se utiliza ampliamente para tomar muestras de fondos duros, como arena gravilla, marga y arcilla en corrientes rápidas y aguas profundas (Figura 8-162).



Figura 8-162. Draga Peterson.

- ♦ El acorazonador se utiliza en sustratos lodosos, fangosos, arenosos y mide cuantitativamente la cantidad de material colectado por volumen. (Figura 8-163).



Figura 8-163. Acorazonador.

- ♦ La red de mano tipo D sirve para realizar el muestreo cualitativo en la zona litoral en la vegetación de ribera.
- ♦ La red circular o rectangular sirve para realizar el muestreo cualitativo en corrientes de agua vadeables (Figura 8-164).
- ♦ Muestreador Hess de $\approx 400 \mu\text{m}$ de poro.



Figura 8-164. Red rectangular.
Fuente: (Alba-Tercedor et al., 2005).

Materiales, equipos y reactivos

A continuación, se especifican los materiales, equipos y reactivos que se van a utilizar para el monitoreo de macroinvertebrados acuáticos.

• Protección personal

Para realizar el monitoreo de macroinvertebrados acuáticos se deben tener los siguientes materiales de protección personal:

- Overol plástico o fontanero (en caso de acceder al cuerpo de agua caminando).
- Botas impermeables.
- Chaleco salvavidas con línea de vida.
- Guantes de nitrilo.
- Gorro.
- Intercomunicadores.
- Equipo de primeros auxilios.

• Materiales

Se debe contar con los siguientes materiales para realizar el monitoreo de macroinvertebrados acuáticos:

- Neveras portátiles de icopor y/o plástico para transporte de las muestras.
- Bolígrafo o rotulador permanente (o cualquier otro método para etiquetar las muestras). Si se usan etiquetas, estas deben ser resistentes a la humedad.
- Lápiz.
- Pinceles de cerda suave y pinzas entomológicas.
- Lupa.
- Juego de tamices de poro desde 200 hasta 2000 μm .
- Frascos de plástico de boca ancha de 500 ml, doble rosca.
- Bolsas de cierre hermético.
- Bote o lancha adecuada para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.
- Frasco lavador.
- Cuerda trenzada.

- Decámetro.
- Cinta de enmascarar y transparente ancha.
- Balde de 10 litros.
- Bandejas de color blanco.
- Tijeras podadoras.
- Formatos de campo.
- Formato de custodia.

• Reactivos

A continuación, se enlistan los reactivos necesarios para realizar el monitoreo de macroinvertebrados acuáticos:

- Alcohol al 95 % o formalina al 1 o 4 %.
- Transeau.
- Agua destilada.
- Solución fijadora: Etanol al 96 % o formalina al 1 o 4 %.
- Alcohol al 95 o 70 %.

Toma de muestras

Para la definición de puntos o áreas de muestreo y la toma de muestras al interior de la estación seleccionada, es importante tener en cuenta lo siguiente:

• Esfuerzo de muestreo

Durante la fase de diseño de muestreo el equipo de profesionales debe definir el esfuerzo del mismo teniendo en cuenta el tipo de estudio por realizar. Lo anterior, con el fin de mantener la consistencia y reducir la variación en campo (Stark et al., 2001), pues la riqueza de especies reportada para un determinado cuerpo de agua es realmente una referencia al esfuerzo de muestreo realizado, más que la composición real de la comunidad (Wantzen & Junk, 2000). El esfuerzo de muestreo puede medirse en tiempo y/o área y/o volumen, en concordancia con el equipo de muestreo seleccionado.

Aunque no está claro y definido un valor mínimo o máximo de área de muestreo, se sugiere para ecosis-

temas de referencia o buen estado ecológico un área mínima de 1.0 m² (por ejemplo 16 Surber de área 25 x 25 cm) y para ecosistemas altamente impactados 0.5 m² (por ejemplo, 8 Surber de área 25 x 25 cm).

- **Correlación con aspectos físicos y químicos**

La toma de muestras de la comunidad de macroinvertebrados se debe realizar al mismo tiempo y en los mismos puntos en donde se recopilen las muestras para análisis físicos, toxicológicos (si procede) y químicos, con el fin de poder asegurar la correlación de los hallazgos.

- **Morfología del ecosistema acuático y composición del hábitat**

Los puntos de muestreo deben reflejar la composición del hábitat del tramo. Para esto se recomienda identificar los diferentes tipos de hábitat (tipos de sustrato y velocidad de la corriente) y asignar a cada uno de ellos el porcentaje de acuerdo con su frecuencia en el tramo de muestreo. Teniendo en cuenta el porcentaje estimado para cada tipo de hábitat, se establece el número de unidades de muestreo para cada uno de ellos.

- **Evitar que el canibalismo afecte la muestra**

Algunos individuos como los megalópteros, plecópteros y odonatos, entre otros, suelen comerse a los demás cuando se ingresan a los frascos de colecta, por lo que es recomendable utilizar recipientes separados para cada uno de estos con el fin de evitar el canibalismo.

- **Limpieza de material y preservación de la muestra**

Debe realizarse una primera limpieza en campo del material recolectado, la cual se hará con ayuda de los tamices sobre el balde o bandeja, con el fin de no transportar demasiado sedimento o sustrato que pueda dañar las estructuras claves para la identificación de los individuos en laboratorio.

Si encuentra organismos de gran tamaño (cangrejos, bivalvos o camarones de agua dulce) cuéntenlos en campo y devuélvalos al ecosistema, o lleve un par de individuos al laboratorio, si es dudosa su identificación. Depositar en el mismo recipiente de colecta el material obtenido en las unidades de muestreo que corresponden al mismo tipo de hábitat, adicionar agua carbonatada para adormecerlos y luego agregar la solución fijadora (para la preservación se utilizará etanol al 96 % o formalina al 1 o 4 %) hasta sobrepasar el volumen de la muestra.

- **Composición del sustrato y análisis de granulometría de fondos**

Teniendo en cuenta la importancia de las características del sustrato en la composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos (Minshall, 1984), (Tabla 8-25), de ser factible, se recomienda coleccionar muestras de sustrato para análisis físico-químicos de los primeros 15 cm superiores (en donde viven la mayoría de estos organismos).



Ciénaga Barbacoas- Yondó, Antioquia
▣ Juan José Montoya

Tabla 8-25. Sustratos típicos que deberían ser muestreados en los ecosistemas acuáticos para obtener una muestra representativa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos.

Ecosistema Habitat	Arroyos (vadeable)	Canal de río y su planicie de inundación	Planicies inundables de ríos y lagos	Pantanos permanentes	Lagos
Rocas	X	x			X
Cantos rodados	X	x			X
Gravas (superficial)	X	x	x		X
Gravas (intersticiales)	X	x	x		x
Arena	x	X	x		x
Limo	x	x	x	x	x
Arcilla	x	X			X
Fango				x	x
Hojarasca	X	x			X
Superficie del agua (Pleuston, organismos de la superficie)	x	x	x	x	x
(Insectos acuáticos emergentes)	X	x	x	x	x

Fuente: (Domínguez & Fernández, 2009).

• **Lavado de equipos**

Al finalizar el muestreo de una estación, lave todo el material y los equipos utilizados para evitar contaminación con organismos de otras estaciones y asegúrese que las redes hayan quedado completamente limpias.

• **Ficha o formato descriptivo de la estación**

Es necesaria la generación de una ficha descriptiva para cada una de las estaciones, con el registro fotográfico y la descripción detallada de aspectos mínimos como la posición de GPS, fecha, hora, tiempo atmosférico, estructura física del hábitat (la profundidad del agua, velocidad, composición del sustrato

y la exposición solar), descripción de la zona riparia (tipo de cobertura vegetal, uso humano y vertimientos), calidad de agua (el pH, oxígeno, conductividad, temperatura, turbiedad y contaminantes visibles), fauna y flora asociada (Anexo 8-18). Para estudios ecológicos o fisiológicos, incluido el ecotoxicológico habrá que definir otras variables de relevancia para incluir en la descripción de la estación.

• **Ficha o formato de captura de datos en campo**

En este se registrarán unidades de medida de los equipos utilizados (volumen y/o área), así como la estimación del área de muestreo (Anexo 8-21) y el

reactivo que utilizó para fijar las muestras. Esto último con el fin de que el personal del laboratorio utilice elementos de protección personal para el procesamiento de la muestra según sea el caso.

Toma de muestras en ecosistemas lóticos

Para la toma de muestras en los ecosistemas lóticos se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Longitud del tramo de muestreo**

Luego de hacer el recorrido en el sitio de muestreo, definir un tramo a lo largo del cuerpo de agua para realizar la colecta de organismos. La longitud de este depende del tamaño del cuerpo de agua, en general, se define como cinco veces el ancho del sistema lótico (en la zona de mayor amplitud en la estación seleccionada), sin embargo, en los grandes sistemas

fluviales (con una longitud de 1000 m de ancho) esta consideración no aplica. La *Environmental Protection Agency* (EPA) señala que el tramo sea de una longitud de 100 m, en el caso de una quebrada (con una longitud de 3 m de ancho), no aplica. En todo caso, el criterio profesional y técnico será quien establece esta condición.

- **Área de muestreo**

Estará compuesta por los puntos en donde se van a tomar las muestras hidrobiológicas y deberá ser representativa del tramo para ser evaluado. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de hábitats disponibles en el tramo (Figura 8-165), una combinación de diferentes métodos e instrumentos de muestreo podría dar un cuadro más realista de la comunidad de invertebrados.

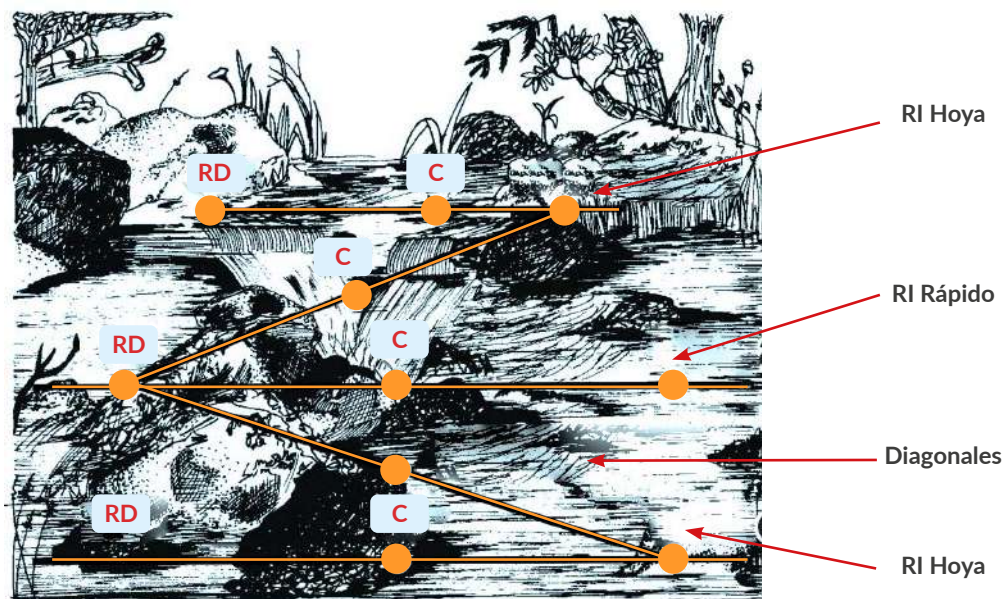


Figura 8-165. Hábitats típicos en un tramo de río de bajo orden. C=Centro, RD=Ribera derecha, RI=Ribera izquierda. Fuente: (Dominguez & Fernández, 2009).

- **En caso de vertimientos**

De ser evidente que la descarga no se mezcla por completo al entrar en el cuerpo de agua, sino que se canaliza a lo largo de un lado o se dispersa en una dirección específica, entonces ubique los puntos de muestreo en la sección evidentemente afectada (orillas o canal medio).

Es importante tener en cuenta que, a partir de la selección del punto inicial, se debe realizar el muestreo en dirección río arriba, evitando así generar disturbio en el área que aún no se ha muestreado.

A continuación, se describen las indicaciones específicas para el muestreo de cada uno de los diferentes tipos de hábitat que pueden ser colonizados por la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, tener en cuenta el uso de los equipos adecuados en cada caso:

- **Microhábitat: Superficie del agua**

Consideraciones iniciales: Ninguna.

Red circular o tipo D: Desplace la red sobre un área determinada para colectar los organismos presentes en la superficie. Este tipo de hábitat solo se tiene previsto dentro del porcentaje cuando hay presencia de organismos sobre la superficie.

- **Microhábitat: Arenas-limos-arcillas (tamaño de partícula menor a 2 mm)**

Consideraciones iniciales: Ninguna.

Red Surber: Coloque el marco de la red Surber sobre el fondo y en contra de la corriente, agite vigorosamente con la mano el sustrato que se encuentra al interior del recuadro, hasta una profundidad entre 5 y 15 cm. Los individuos serán arrastrados por la corriente y quedarán atrapados en la red. (Figura 8-166).



Figura 8-166. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con Red Surber-río Bogotá, antes de Villapinzón. Fuente: (Laboratorio Ambiental CAR, 2017).

Red rectangular: Fije con ambas manos la red rectangular al sustrato y con una mano o el pie remueva el sustrato contracorriente hasta una profundidad entre 5 y 15 cm. En zonas de remanso o pocetas genere flujo hacia la red. El material removido se acumula en la red.

Muestreador Hess: Introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro, asegúrese de estar contracorriente.

Draga Eckman: Abra el dispositivo y envíelo al fondo, una vez sienta que toca el fondo suelte el testigo

y espere que esta se cierre. Llévela a la superficie y vacíe su contenido en un balde para su posterior limpieza.

Consideraciones finales: Deposite los sedimentos y demás partículas atrapadas en la red en un balde de 10 l, enjuague suavemente con agua sobre los tamices los cuales pueden tener un tamaño de poro entre 2000 y 200 μm . Evite en lo posible llevar grandes cantidades de arena u otro tipo de sedimentos al laboratorio ya que se pueden dañar algunas estructuras importantes para la determinación taxonómica de los organismos.

- **Microhábitat: Gravas-cantos rodados (tamaño de partícula entre 2 y 250 mm)**

Consideraciones iniciales: Solo tenga en cuenta aquellos bloques y superficies que se encuentren totalmente sumergidas o siempre húmedas.

Lleve los cantos más grandes a un balde de 10 l, para retirar los organismos adheridos con pinzas entomológicas o un pincel.

Red Surber: Abra el marco de muestreo, con una mano agite los sustratos y los cantos llévelos a la superficie y retire los organismos adheridos con unas pinzas entomológicas o un pincel.

Red rectangular: Coloque la red y manténgala vertical, con el pie o la mano (depende de la profundidad) remueva los sustratos y calcule un área de muestreo de 25 x 25 cm. Los cantos llévelos a la superficie y retire con pinza entomológica o un pincel los organismos adheridos (Figura 8-167).



Figura 8-167. Toma de muestra de macroinvertebrados acuáticos con red rectangular.
Fuente: (Alba-Tercedor et al., 2005).

Muestreador Hess: Introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro, asegúrese de estar contracorriente. Lleve los cantos rodados a la superficie y retire con pinza entomológica o un pincel los organismos adheridos.

Draga Petersen: Utilícela cuando la profundidad del ecosistema evaluado sea mayor a 2 m y el lecho esté conformado principalmente por rocas. Abra la draga y déjala caer al fondo, cierre la draga y llévela a la superficie, ábrala y deposite el contenido en un balde para su posterior limpieza (Figura 8-168).



Figura 8-168. Draga tipo Petersen utilizada para la toma de muestras de bentos.
Fuente: (UJTL, 2018).

Consideraciones finales: Al utilizar la red Surber, verifique que el barrido del material se realice en toda el área de manera uniforme, de tal forma que se frote la superficie y la base del sustrato (gravas, cantos rodados).

• **Microhábitat: Bloques**
(tamaño de partícula > 250 mm)

Consideraciones iniciales: Solo tenga en cuenta aquellos bloques y superficies que se encuentren totalmente sumergidas o siempre húmedas.

Red Surber y red rectangular: Abra el marco de muestreo, con la palma de la mano frote suave la superficie del bloque y ponga la red contracorriente. Si se observan organismos que están adheridos fuertemente, se remueven con ayuda de unas pinzas entomológicas o un pincel.

Colecta manual: Retire el bloque de la columna de agua manteniéndolo dentro de una red (Surber o rectangular), para evitar la pérdida de organismos. Ubique el bloque en una bandeja blanca y retire los

macroinvertebrados manualmente con ayuda de pinzas entomológicas o un pincel.

Consideraciones finales: Ninguna.

- **Microhábitat: Sustratos artificiales (ladrillos, baldosas)**

Consideraciones iniciales: Ninguna.

Colecta manual: Retire el sustrato artificial y manténgalo dentro de una red (Surber o rectangular), para evitar la pérdida de organismos. Ubique el bloque en una bandeja blanca y retire los macroinvertebrados manualmente con ayuda de pinzas entomológicas o un pincel.

Consideraciones finales: Sumerja de nuevo el sustrato extraído.

- **Microhábitat: Macrófitas emergentes**

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las macrófitas

y escriba estos datos en el formato de campo. Si es necesario fije aquellas que no logre identificar para su posterior identificación en laboratorio por parte del experto. Seleccione únicamente las macrófitas enraizadas, no se debe realizar el muestreo sobre macrófitas errantes.

Red tipo D y rectangular: Apoye el marco de la red sobre el grupo de macrófitas y luego agite, garantice que los organismos que se desprendan quedan atrapados en la red (Figura 8-169). Evite que la red se colmate de material orgánico o sedimentos, vacíe su contenido cada vez en un balde para su posterior limpieza.

Consideraciones finales: Lave el material vegetal colectado en campo depositándolo en un balde de 10 l, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 200 y 2000 μm .



Figura 8-169. Muestreo de macrófitas con la red D.

- **Microhábitat: Macrófitas sumergidas**

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las macrófitas y escriba

estos datos en el formato de campo. Si es necesario, fije aquellas que no logre identificar para su posterior identificación en laboratorio por parte del experto.

Seleccione únicamente las macrófitas enraizadas, no se debe realizar el muestreo sobre macrófitas errantes.

Red Surber: Aplica en el caso que las macrófitas estén adheridas a rocas. Abra el marco de muestreo, con la mano agite vigorosamente el grupo de macrófitas en contracorriente.

Red tipo D y rectangular: Ubique la red y aproxímelas a 10 cm del grupo de macrófitas, agítelas vigorosamente con la mano o pie generando flujo hacia la red. Arrastre la red desde el fondo hasta la superficie, de tal forma que la red remueva el material biológico que se encuentra adherido a las macrófitas. No repita el procedimiento en la misma planta.

Muestreador Hess: Introduzca el dispositivo y remueva el sustrato atrapado dentro del cilindro. Retire

las macrófitas y ubíquelas sobre una bandeja blanca para retirar aquellos organismos que aún quedan adheridos a las hojas o tallos. Este método es aplicable en cuerpos de agua someros (menos de 1 m) y en macrófitas de tamaño pequeño.

Corazonador: Introduzca el corazonador a una profundidad de 15 cm, en el sedimento blando (arcilla, limo, arena) de forma manual. Enrosque el tapón en la parte superior del tubo y hale, en ocasiones cuando el sedimento es muy blando, el vacío generado no es suficiente y se debe poner una mano en la parte inferior del tubo para mantener la muestra dentro (UJTL, 2018), (Figura 8-170).



Figura 8-170. Toma de muestras de bentos con corazonador.
Fuente: (UJTL, 2018).

Consideraciones finales: Lave el material vegetal colectado en campo y deposítelo en un balde de 10 l, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 200 y 2000 μm .

- **Microhábitat: Vegetación inundada**

Consideraciones iniciales: Identifique con nombre científico o con nombre común las especies vegetales y escriba estos datos en el formato de campo. Se debe

realizar el muestreo sobre la vegetación inundada que ya ha sido colonizada por organismos. No se debe realizar el muestreo sobre vegetación terrestre que tiene poco tiempo de haber sido inundada como producto de una crecida reciente del nivel del río.

Red tipo D y rectangular: Tome firme el cabo, sumerja la red, ubíquela debajo de las raíces y fuertemente lleve hacia la superficie.

Consideraciones finales: Lave el material colectado en campo, deposítelo en un balde de 10 l, enjuague suavemente con agua sobre un juego de tamices de entre 200 y 2000 μm .

- **Microhábitat: Restos vegetales (madera, ramas, hojarasca)**

Consideraciones iniciales: Escoger restos vegetales que sean propios de la estación, es decir, que lleven unas semanas en ese punto y que no hayan sido arrastrados recientemente por la corriente, para evitar el muestreo de material proveniente de aguas arriba.

Escoja solo material vegetal con evidencia de actividad microbiana sobre este, es decir, con presencia de una biopelícula en su superficie.

Red Surber: Abra el marco de muestreo, ubicar la red sobre los restos vegetales, tomar con una palita o con la mano los restos vegetales que ocupan el área del cuadrante y llévelos dentro de la red.

Red tipo D y rectangular: Ubique la red a 10 cm de los restos vegetales, colectar con una palita o con la mano y llévelos dentro de la red.

Consideraciones finales: En todos los casos evite tomar grandes restos de madera que pueden estropear la red.

Se puede colectar cerca de 1 m² de este material en varios puntos del tramo: hojarasca depositada en corriente rápida, lenta y pozos.

Lavar el material vegetal colectado en campo, depositarlo en un balde de 10 l, enjuagar suave con agua sobre un juego de tamices de entre 200 y 2000 μm .

- **Microhábitat: Salpicadura**

Indicaciones para el muestreo: Realizar una colecta manual de las zonas de salpicadura o zonas de *spray*, las cuales son interfaces entre el medio acuático y terrestre, ubicadas cerca a cascadas (pequeñas o grandes). Generalmente estas zonas están habitadas por organismos que no se encuentran dentro del agua. Utilice pinzas entomológicas o un pincel y haga la colecta manual por 15 minutos.

En todos los casos mencionados anteriormente, adicionar agua carbonatada para adormecer los organismos. Inmediatamente después, fijar las muestras con etanol (96 %), formalina (1 o 4 %) o solución Transeau.

- **Toma de muestra en ecosistemas lénticos**

En este apartado se mencionan dos metodologías comunes para la toma de muestras de macroinvertebrados asociados a macrófitas y bentónicos de sedimentos en ecosistemas lénticos.

De acuerdo con el programa de monitoreo, objeto y objetivo del estudio se debe aplicar la técnica y el dispositivo de muestreo adecuado, que permita caracterizar las comunidades arriba mencionadas.

Es importante prever que el punto de colecta inicial se debe seleccionar teniendo en cuenta que se debe evitar generar disturbio en el área que aún no se ha muestreado.

A continuación, se describen las indicaciones fijadas para el muestreo, en cada caso específico:

- **Macroinvertebrados asociados a macrófitas**

Área de muestreo: Establezca un área de muestreo, 1 m² puede ser una medida de referencia, ya

sea paralela a la zona litoral del cuerpo de agua en el caso de ser macrófitas enraizadas con tallos y hojas flotantes, o para praderas flotantes desde el centro hasta el límite. Esta área puede ser mayor o menor dependiendo de la densidad de la cobertura vegetal, queda condicionada con base en el criterio profesional y técnico de la persona que realiza el muestreo.

- **Red cuadrangular:** Es el principal método de captura de macroinvertebrados asociados a macrófitas de sistemas lénticos y consiste en realizar barridos o pasadas con la red cuadrangular sobre las macrófitas, los presentes pasos fueron tomados y modificados de (Alba-Tercedor et al., 2005), (Figura 8-171).



Figura 8-171. Representación gráfica de la toma de muestras de macroinvertebrados asociados a macrófitas.
Fuente: (Domínguez & Fernández, 2009).

1. Una vez seleccionada el área de muestreo, acercarse lento para no perturbar el área con el fin de evitar que los organismos huyan del lugar.
2. Tomar la red cuadrangular y realizar un barrido de forma pendular e ingresar desde la superficie, luego hacia el fondo y retornar de nuevo a la superficie cubriendo aproximadamente un metro de longitud con este movimiento.
3. Jamear el sustrato tres veces (al comienzo, en el medio y al final) con el fin de desprender y atrapar en la red los organismos.
4. Realizar cada barrido de manera rápida para evitar que los organismos escapen. El barrido deberá completarse en alrededor de tres segundos.
5. Al final de cada barrido o pasada, llevar la red a la superficie y depositar el material atrapado en un balde limpio de 10 l. Inspeccionar visualmente que no quede ningún organismo enredado en la red.
6. El esfuerzo de muestreo medido en el número de barridos o pasadas de la red, se establece de acuerdo con la riqueza de macrófitas y biotipo dominante.
7. El esfuerzo puede dividirse el 50 % en la especie o biotipo dominante y el restante 50 % se puede fraccionar basado en los dos criterios mencionados.
8. Anotar en el formato de campo el nombre de la especie (si se conoce) o común de los cuales se tomó la muestra y el esfuerzo aplicado.
9. Colectar un individuo de cada morfotipo para su identificación en el laboratorio, si es necesario.
10. Lavar el material que se encuentra en el balde sobre dos tamices de poro entre 2000 μm (primer tamiz) y 250 μm (segundo tamiz) micras.

11. Realizar el lavado con abundante agua, agregar el agua de forma cuidadosa sobre el material situado en el primer tamiz.
12. Visualmente inspeccionar que no queden organismos atrapados en el material lavado.
13. Depositar los organismos observados en el frasco o bolsa rotulada para la colecta.
14. Descartar el material grueso (macrófitas o restos de estas, tallos, etc.) ya lavado e inspeccionado del primer tamiz. Retener solo el material fino del segundo tamiz como algunas raíces y detritus.
15. Depositar todo el material retenido del segundo tamiz en el frasco plástico o bolsa rotulada para la colecta.
16. Adicionar agua carbonatada para adormecer los organismos.
 - Agregar para la preservación de la muestra etanol al 96 % o formalina (1 o 4 %), hasta asegurar que quede sumergida la muestra y llevar a cabo esta actividad de forma inmediata para evitar la acción de los carnívoros.
17. Lavar el material utilizado antes de continuar en el próximo hábitat.

• Macroinvertebrados bentónicos de sedimentos

Área de muestreo: Esta se debe seleccionar de acuerdo con el objetivo del estudio. Por ejemplo, se puede establecer un transecto paralelo a la zona litoral del cuerpo de agua, o, en caso de vertimientos, una opción de diseño de muestreo puede ser el establecimiento de puntos en arcos concéntricos a la intervención.

Metodología: En la captura de esta comunidad se utiliza generalmente la draga. En el mercado existen varios tipos de dragas y de diferentes dimensiones, la escogencia de una u otra se basa principalmente en el tipo de sustrato de fondo (blando o duro) y tamaño del ecosistema léntico.

La draga tipo Ekman es la más frecuente, vienen en diferentes dimensiones y se adapta bien para sustratos blandos (limos, arcillas, detritus y eventualmente arenas), es un dispositivo con forma de caja. La parte superior consta de una tapa dividida en dos, permite que el agua pase a través de estas cuando se sumerge la draga. La parte inferior es un sistema de tapa-cuchilla curva, es aquella que se cierra para atrapar la muestra. Las dimensiones de la draga son variables, pero la muestra tomada puede expresarse en cm^3 (alto x ancho x largo), (Figura 8-172).



Figura 8-172. Muestreo de macroinvertebrados bentónicos en sedimentos con la draga Ekman.

Una vez definidos el o los puntos de muestreo:

1. Abrir las dos tapas inferiores de la draga y asegúrelas a los pines.
2. Lanzar la draga al fondo del cuerpo de agua, y en el momento en que esta toque el fondo envíe el mensajero con fuerza para cerrar el dispositivo.
3. Halar hacia la superficie para obtener la muestra.
4. Retirar los residuos de mayor tamaño, valiéndose de los tamices y la bandeja o balde, tenga cuidado de depositar los organismos encontrados en el recipiente de la muestra. Si colecta en detritus es recomendable que lleve la muestra completa al laboratorio para su inspección.
5. De ser necesario realice diferentes lances de la draga, los diferentes lances serán mezclados para obtener una única muestra compuesta.
6. No hay un esfuerzo de muestreo establecido, pero se recomienda mínimo tres lances. Hágalo al menos a un metro de distancia un lance del otro.
7. Agregar agua carbonatada para adormecer los organismos.
 - Adicionar a la muestra etanol al 96 % o formalina (1 o 4 %) para la preservación, asegúrese que quede sumergida la muestra y hágalo de forma inmediata para evitar la acción de los carnívoros.
8. Lavar el material utilizado antes de continuar en el próximo hábitat.

Limpieza de material y preservación en campo:

Realizar la limpieza de las muestras sobre bandejas blancas y de manera separada para cada tipo de hábitat. Evite que en los recipientes de colecta queden ramas, troncos, cantos rodados, gravas o grandes cantidades de arena y sedimentos, los cuales puedan dañar las estructuras claves para la determinación taxonómica. Para facilitar la identificación taxonómica

en el laboratorio, separe los organismos frágiles que puedan perder estructuras claves para su identificación, por ejemplo, los efemerópteros.

En lo posible, cuente en campo y retorne al ecosistema los organismos de tamaño grande (cangrejos, bivalvos o camarones de agua dulce), o lleve un par de individuos al laboratorio, si es dudosa su identificación.

Si utilizó formol para fijar las muestras en campo, haga la anotación en las observaciones del formato de campo, con el fin de que el personal del laboratorio utilice elementos de protección personal para el procesamiento de la muestra.

Deposite en el mismo recipiente de colecta el material obtenido en las unidades de muestreo que corresponden al mismo tipo de hábitat y agregue la solución fijadora hasta sobrepasar el volumen de la muestra. Rotule debidamente la muestra con un marcador resistente al agua y al alcohol; agregue otro rótulo marcado con lápiz o micro punta indeleble punta fina dentro del recipiente.

Por último, embale las muestras en una nevera portátil plástica y manténgala en condiciones adecuadas de temperatura (menos de 25 °C) y humedad.

Al finalizar el muestreo de una estación, lavar todo el material de muestreo para evitar contaminación con organismos de otras estaciones y asegúrese que las redes hayan quedado completamente limpias.

Finalmente, para el proceso de etiquetado, registro fotográfico, transporte y recepción, seguir las instrucciones consignadas en la sección de trabajo de campo de la comunidad fitoplanctónica.

Laboratorio: En este aparte se relacionan los equipos, materiales y reactivos que se deben disponer en el laboratorio para el análisis de las muestras.

- **Materiales:**

Para realizar el análisis de las muestras se debe contar con los siguientes materiales:

- Pinceles.
- Brocha suave.
- Frascos plásticos blancos tapa rosca de boca ancha de 1000 ml.
- Pinzas de disección de punta fina, agujas de disección y minutillos.
- Agujas y pinzas entomológicas.
- Cajas de Petri.
- Láminas cubre y portaobjetos.
- Pipetas plásticas de 3 ml.
- Frasco lavador (uno con alcohol y otro con agua destilada).
- Viales de vidrio de 25 ml, con tapa rosca hermética para depositar especímenes.
- Etiquetas internas con la siguiente información: código de la muestra, fecha de colecta, fecha de revisión, localidad, información taxonómica, (datos de quien revisa).
- Papel kimberly blanco ártico de 90 g libre de ácido.
- Rapidógrafos.
- Bandeja blanca.
- Bandeja pequeña blanca.
- Claves taxonómicas especializadas.
- Formato registro taxonómico y número de organismos.
- Tamices de ojo de malla: 75, 100, 250, 500, 1000 μm .
- Claves taxonómicas especializadas.

- **Equipos:**

Los equipos necesarios para realizar el análisis de las muestras son los siguientes:

- Estereoscopio.
- Microscopio óptico tradicional.

- Tamiz de ojo de malla de 250, 500, 1000, 2000 μm .
- Cámara fotográfica.

- **Reactivos**

Para realizar el análisis de las muestras se requieren los siguientes reactivos:

- Agua destilada.
- Etanol al 96 %.
- Formol.
- Rosa de bengala.

Con el fin de evitar un aumento de la tasa de error, no se recomienda hacer selección e identificación taxonómica en campo; la muestra completa debe ser transferida al frasco correspondiente (Haase et al., 2010), para ser analizada en laboratorio. Después es conveniente:

- Ensamblar como mínimo dos tamices, dejar en la parte superior el tamiz de 1000 μm y en la parte inferior el de 75 μm .
- Lavar pequeñas porciones de la muestra, colocar sobre el primer tamiz y lavar con un flujo suave de agua.
- Inspeccionar visualmente en el primer tamiz donde quedan retenidos los organismos más fáciles de observar para su posterior preservación.
- Examinar el material obtenido de cada uno de los tamices, al estereomicroscopio para seleccionar los macroinvertebrados. Los organismos se pueden agrupar en cajas de Petri a nivel de orden para su posterior determinación taxonómica y conteo.

Procedimiento de laboratorio: En el laboratorio se deben realizar los procedimientos siguientes:

- Identificar los organismos en el estereomicroscopio mediante claves especializadas hasta el mínimo nivel taxonómico posible (familia, género, especie). Así mismo, los morfotipos presentes siguiendo la

secuencia de: género con una sola morfoespecie = género sp. Género con más de una morfoespecie = género sp.1, sp.2, sp.3, etc.

- En el caso de efemerópteros, dípteros y coleópteros, puede llegar a ser necesario el montaje de placas para microscopía, de estructuras claves para la determinación de géneros.
- Teñir los individuos con rosa de bengala para facilitar su observación en laboratorio, si lo requiere.
- Registrar el taxón y el número de organismos en el *formato de laboratorio*. Anotar el estadio de vida de los mismos (adulto, larva) y las dificultades encontradas durante la determinación (organismos incompletos, carencia de branquias, carencia de estructuras relevantes en la determinación taxonómica, estadio juvenil).
- Realizar el respectivo registro fotográfico.
- Depositar los organismos separados en viales de vidrio y preservar en etanol al 70 %.
- Rotular los viales con la identificación de la muestra (código), fecha de colecta, fecha de determinación,

nombre del cuerpo de agua, grupo taxonómico y nombre del analista.

- Separar los especímenes por taxón, fecha de colecta y microhábitat, previo a ser incluidos en una colección de referencia siguiendo los protocolos establecidos para colecciones biológicas del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Es recomendable, examinar el nivel de etanol de estos frascos periódicamente y llenarlos de nuevo cuando sea necesario, antes que ocurra la evaporación del etanol.

Los datos registrados en el *formato de registro de especímenes* deben ser pasados a una hoja de cálculo. Para la comunidad de macroinvertebrados, los datos deben ser expresados en número de individuos por metro cuadrado (Ind/m²), para lo cual se debe tener en cuenta el área total de muestreo (Ecuación 8-64):

$$\frac{\text{Ind}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Número de individuos contados}}{\text{Área de muestreo (m}^2\text{)}}$$

Ecuación 8-64

En el caso de muestreos cualitativos, la información será expresada como presencia-ausencia.

8.2.2.5 Macrófitas

El término macrófitas se refiere a diferentes tipos de plantas acuáticas macroscópicas (plantas vasculares, briófitos, macroalgas) presentes en la zona litoral de humedales, lagos, lagunas, embalses

o ríos (Figura 8-173). Ellas pueden localizarse en la zona de interfase agua-tierra, sobre la superficie del agua o totalmente sumergidas, con diferentes formas de vida: flotantes, de hojas flotantes, sumergidas, adheridas al sustrato y emergentes. Las plantas vasculares sumergidas pueden estar enraizadas o pueden encontrarse errantes en la columna de agua.

Las macrófitas, son una comunidad importante para la ecología acuática (ciclo de nutrientes, cadena trófica, alta productividad, hábitat para otras comunidades, aporte a la complejidad estructural y metabolismo).

Esta comunidad tiene valor para la indicación de la calidad del agua, ya que son sensibles a los cambios de calidad fisicoquímica (nutrientes, mineralización, temperatura, transparencia) al igual que las microalgas. No obstante, a diferencia de estas tienen un tiempo de respuesta mayor, o sea que son indicadores de cambios a mediano y largo plazo. La densidad de

poblaciones de macrófitas acuáticas está en relación con el área de la orilla, sus condiciones topográficas y el estado del contenido de nutrientes del agua o suelo (Cirujano et al., 2005).

Los métodos propuestos en este protocolo se derivan de la revisión de diferentes documentos y fuentes que se referencian en la bibliografía: (APHA et al., 2012), (Cirujano et al., 2005), (Schmidt, 1998), (Bowden et al., 2006), (Esquivel, 1997), (Braun, 1932) y del consenso de diferentes investigadores colombianos expertos en este tema.



Figura 8-173. Algunas macrófitas acuáticas.
Fuente: (UJTL, 2018).



PNN El Cocuy.
📍 Jorge Luis Ceballos

Selección de puntos de monitoreo

De igual forma que para el resto de comunidades hidrobiológicas, el diseño del muestreo para las macrófitas se realiza dependiendo de los objetivos del estudio (levantamiento de información de línea base, seguimiento rutinario de la calidad hidrobiológica, evaluación de impactos de una actividad específica, entre otros) y del tipo de métrica que se vaya a utilizar.

En estudios cuyo objeto sea evaluar los impactos de actividades antrópicas sobre esta comunidad, se deben establecer zonas y/o cuerpos de agua de referencia y seleccionar otros que estén sometidos a diferentes grados de alteración físico-química e hidromorfológica. El propósito es conocer los posibles cambios en la composición y abundancia relativa de la comunidad.

Se requiere identificar estaciones de muestreo que sean representativas de la diversidad de hábitats. De preferencia, se debe contar con ortofotos (fotografías aéreas rectificadas) recientes que complementen el trabajo en campo.

En grandes lagos (>50 ha) se deben seleccionar varias estaciones de muestreo, en las cuales realizar transectos perpendiculares a la orilla. Estos pueden ser de dimensiones (ancho y largo) variable, pero deben

estandarizarse para estudios comparativos (Cirujano et al., 2005).

Además de los aspectos científicos es importante reconocer las condiciones de acceso y seguridad de la zona para seleccionar una estación de muestreo. Así mismo, se deben evitar lugares que presenten condiciones peligrosas, como bancos empinados o inseguros, condiciones de profundidad e inestabilidad del fondo, entre otras (AQEM CONSORTIUM, 2002).

Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de monitoreo debe obedecer a los objetivos del proyecto. Se recomienda abarcar diferentes periodos climáticos (lluvias y sequía) para comunidades permanentes. En ecosistemas acuáticos temporales se recomienda un muestreo al año durante la fase de inundación. En caso de realizar un solo muestreo anual escoja la fecha en que la vegetación macrofítica presente el mayor desarrollo.

Tipos de muestra

El muestreo de macrófitas debe ser semicuantitativo para determinar el porcentaje de cobertura de cada una de las especies. Se realiza con la ayuda de un cuadrante de 1 x 1 m (dividido en cuadrículas de 10 x 10 cm). De esta manera, el transecto es de un metro de ancho (Figura 8-174).



Figura 8-174. Cuadrante para cobertura de macrófitas.
Fuente: (Moreno, 2013).

Materiales, equipos y reactivos

En el trabajo de campo es necesario disponer de los equipos, materiales y reactivos que se relacionan a continuación:

• Protección personal

Para la recolección de las muestras de macrófitas se requiere del siguiente equipo de protección personal:

- Overol plástico o fontanero (en caso de acceder al cuerpo de agua caminando).
- Botas impermeables.
- Chaleco salvavidas con línea de vida.
- Guantes de carnaza y/o guantes de látex largos.
- Gorro con protección solar.
- Tapabocas.
- Intercomunicadores.
- Equipo de primeros auxilios.

• Materiales

A continuación, se enlistan los materiales necesarios para la toma de las muestras de macrófitas:

- Decámetro.
- Cuerda trenzada de polipropileno, estacas y boyas para fijar los límites de los transectos.
- Cuadrante de PVC de 1 m² (con subcuadrantes de 25 x 25 cm o de 10 x 10 cm).
- Rastrillos.
- Pita.
- Tijeras podadoras.
- Navaja.
- Prensas de cartón corrugado de cuarto de pliego o prensa botánica.
- Atomizador.
- Papel periódico.
- Papel pergamino.
- Sobres de papel kraft.

- Bolsas de cierre hermético.
- Bolsas negras industriales.
- Frascos plásticos de 500 ml.
- Cinta transparente ancha (para asegurar las etiquetas).
- Neveras de icopor y/o plásticas (para transporte de muestras).
- Bolígrafo o rotulador permanente.
- Etiquetas resistentes a la humedad.
- Guías especializadas de campo.
- Claves de identificación y claves visuales complementarias.
- Binoculares.
- Lupa botánica.
- Visor subacuático.
- Bandeja plástica o esmaltada blanca.
- Fotografías aéreas.
- Bote adecuado para las condiciones locales con el equipo de seguridad apropiado.
- Hielo sintético (para preservación de muestras vivas).
- Cartografía del área.
- Formatos de campo.
- Formato de custodia.

• Equipos

Los equipos necesarios para la toma de muestras son:

- GPS.
- Cámara fotográfica.
- Ecosonda.
- Micromolinete.

• Reactivos

Para realizar la toma de las muestras de macrófitas se requieren los siguientes reactivos:

- Alcohol etílico (75 %).
- Formol (4 %).

- Solución FAA (formaldehído 10 % - alcohol 50 % - ácido acético 5 % - agua 35 %).
- Solución etanol (65 %) - glicerina (5 %) - agua (30 %).

Procedimientos para la toma de muestras

En el muestreo de estos organismos es importante observar las siguientes recomendaciones:

- ♦ En el caso de humedales con grandes extensiones de macrófitas (ciénagas o áreas inundables de grandes ríos), visualizar las unidades de cobertura y seleccionar los sitios de muestreo con ayuda de binoculares.
- ♦ Dependiendo del ecosistema y la cobertura vegetal existente, el muestreo se puede realizar con transectos ubicados de forma perpendicular a la orilla, en el sentido de la interfase tierra-agua.
- ♦ En zonas riparias de pequeños ríos o quebradas y lagos de pendiente fuerte, ubicar los transectos de forma paralela, debido a que la zona de litoral puede ser muy angosta (menor a 1 m).
- ♦ En lagos profundos y ríos no vadeables, llevar a cabo el muestreo desde un bote con ayuda de un visor subacuático y un rastrillo con mango extensible para muestrear las zonas más profundas.
- ♦ El punto inicial del transecto debe estar debidamente georreferenciado, acompañado de un esquema del lugar de muestreo para evidenciar las características particulares con el fin de facilitar los muestreos posteriores.
- ♦ Las dimensiones del transecto (ancho y largo) y el número de cuadrantes dispuestos en el (área de muestreo) se definen según los requerimientos, objetivos del estudio, características generales

de composición y estructura de la comunidad de macrófitas existente.

- ♦ La identificación de las especies de macrófitas en el sitio de muestreo se debe realizar únicamente cuando exista un alto grado de confianza en la determinación por parte de un experto. Para las especies no identificadas en campo, tienen que colectarse ejemplares para su posterior identificación en laboratorio y colecciones de referencia en herbarios.
- ♦ Con la ayuda de una lupa botánica, identificar en campo los caracteres diagnósticos no observables a simple vista (estructuras florales ranunculáceas, pontederiáceas, elatináceas, alismatáceas, entre otras), debido a que ellos se pueden ver afectados después de ser procesados en laboratorio.
- ♦ Realizar un inventario de las plantas presentes en el ecosistema, recolectar muestras de individuos para efectuar la determinación taxonómica y mantener registros de referencia.
- ♦ Cuantificar la cobertura de las macrófitas emergentes mediante evaluación visual.
- ♦ Realizar la cuantificación de las macrófitas sumergidas, con un visor subacuático o por inmersión del observador, dependiendo de la turbiedad del agua. En el proceso de cuantificación se deben estimar los porcentajes de cobertura por medio de las cuadrículas del cuadrante (Figura 8-175), asignando un valor en la escala que relaciona la abundancia relativa de cada especie presente. Se propone usar la siguiente escala de coberturas (Tabla 8-26):

Tabla 8-26. Evaluación visual y por medio de una escala de cinco niveles.

Escala	Porcentaje de cobertura
1	< 5%
2	6 - 25%
3	26 - 50%
4	51- 75%
5	76 - 100%

Fuente: (Braun, 1932).

- ♦ Recopilar datos físico-químicos e hidromorfológicos de las estaciones de muestreo que permitan conocer la ecología de las especies de macrófitos (Cirujano et al., 2005).
- ♦ Designar los ejemplares con un código de campo (compuesto por dos iniciales del primer nombre y dos del apellido del colector y el número consecutivo de colección), en caso de que no se pueda realizar la determinación taxonómica en el sitio, para evitar confusiones en etapas posteriores de análisis.
- ♦ Identificar, con la ayuda de una lupa botánica, los caracteres diagnósticos no observables a simple vista (estructuras florales ranunculáceas, pontederiáceas, elatináceas, alismatáceas, entre otras), debido a que muchos de ellos se pueden afectar después de ser procesados en laboratorio.
- ♦ Anotar las características de la cobertura vegetal, morfología de las orillas y coordenadas de los transectos en el formato de campo.
- ♦ Registrar anotaciones específicas del muestreo de cada transecto en la libreta de campo de cada transecto con respecto a:



Figura 8-175. Uso de cuadrante para la evaluación de cobertura de macrófitas. Fuente: (Moreno, 2013).

- Coordenadas de los transectos (inicial y final).
- Morfología de las orillas.
- Porcentaje de cobertura para cada una de las especies presentes por cuadrante.
- Características que pueden perderse en el procesamiento del material y que son relevantes tanto para la determinación taxonómica como para la elaboración de etiquetas para ingreso a colecciones de referencia en herbarios: coloración de hojas, flores o frutos, aroma, exudados, asociaciones con otras especies.
- Hábito, altura, forma de vida, abundancia, aspectos fenológicos, condición general de la vegetación (estado fitosanitario, fisiológico).
- Esquema del perfil de vegetación del transecto muestreado.
- Presencia de parches normalmente enraizados que se observen errantes en la corriente.
- Descripción del hábitat específico del lugar de colecta: tipo de ecosistema, tipo de sustrato (gravas, arenas, limos, arcillas), exposición solar, flujo del agua, profundidad.

- Valoración de la cobertura de especies invasoras o potencialmente invasoras con respecto a las especies nativas. Esta valoración debe realizarse en términos de magnitud de la invasión: muy abundante, abundante, frecuente, poco frecuente, rara.

En la colecta y fijación debe considerarse:

- ♦ Cortar con las tijeras podadoras los ejemplares para ser colectados, manteniendo la mayor cantidad de partes de la planta: raíz, flores, fruto.
 - ♦ Lavar el área radicular para eliminar el sedimento antes de ser colectado. En algunos casos, la colecta de ejemplares se realiza por fuera de los sitios de muestreo, ya que se requiere material fértil (individuos con flores y frutos) para la identificación, el cual es necesario buscar en los alrededores del lugar de muestreo.
 - ♦ Colectar algunos especímenes de raíces delicadas como juncagináceas o podostemáceas, utilizar una navaja para facilitar la extracción del sustrato.
 - ♦ Depositar las macrófitas grandes en una bolsa plástica hermética, debidamente etiquetada. Para el caso de *Nymphaea* o *Victoria*, se requiere partir los frutos por la mitad.
 - ♦ Colectar en frascos plásticos debidamente etiquetados, las macrófitas pequeñas, tales como las errantes emergentes (*Azolla*, *Salvinia*, *Lemna*) o errantes sumergidas (*Riccia*, *Wolffiella*, *Wolffia*).
 - ♦ Facilitar el montaje por flotación de macrófitas con estructuras débiles (algas macroscópicas, pontederiáceas, potamogetonáceas, cabombáceas, entre otras), seguir el método de flotación en bandeja sobre papel secante para lograr un mejor prensado.
- ♦ Colectar debajo del agua sobre papel pergamino las plantas sumergidas de estructuras delicadas (*Characeae*), arreglar las estructuras de la planta sobre el papel; luego, sacar el ejemplar del agua de tal manera que la planta quede lista para ser prensada o secada. En caso de que las estructuras de las plantas sean muy pequeñas o desprendibles es preferible usar bolsillos o sobres de papel kraft, debidamente marcados en la parte inferior con la identidad (ID) asignada dentro del periódico que prensa el ejemplar.
 - ♦ Ubicar cada uno de los ejemplares sobre papel periódico acomodando la planta de manera que no quede montada una parte sobre la otra. Luego atomizar con alcohol etílico (75 %), debido a que las plantas tienen abundante agua y colocar en medio de cada una de ellas, varios papeles periódicos que absorban la humedad.
 - ♦ Rotular y marcar cada ejemplar (morfoespecie) con el número de identificación que le corresponda según el formato de captura de datos.
 - ♦ Prensar los ejemplares para que, al iniciar el proceso de preparación, estén protegidos y se pueda facilitar su transporte al laboratorio. Se recomienda usar la solución FAA (90 ml de alcohol 70 %, 5 ml de ácido acético y 5 ml de formol al 4 %) cuando se fijan colectas especiales como algas macroscópicas o para el caso de orquídeas acuáticas, para las que se requieren conservar sus flores.
 - ♦ Preservar especímenes de podostemáceas con alcohol 70 % o formol al 4 %.

Laboratorio

En el laboratorio se debe contar con prensa botánica, papel periódico, estereoscopio, equipo de disección, balanza, horno o estufa de secado, alcohol etílico (75 %) y claves taxonómicas específicas para los procesos de prensado y secado, determinación taxonómica y montaje de ejemplares.

Así mismo, atender las recomendaciones siguientes:

- ♦ Pensar las macrófitas entre papel secante y papel periódico durante cinco días, cambiar el papel secante cada dos días hasta que la planta quede completamente deshidratada. Dependiendo del tipo de planta, el secado se puede realizar también en un horno a 70 °C durante 2 o 3 días.
- ♦ Secar los briofitos al ambiente en bolsas de papel, por una semana.
- ♦ Realizar la determinación de los ejemplares mediante claves especializadas hasta el mínimo nivel taxonómico posible e identificar los morfotipos presentes utilizando estereoscopio. Sin este equipo es imposible observar ciertas características de estructuras reproductivas como aquenios en ciperáceas, donde se requiere conocer la forma, el tamaño o el tipo de superficie.
- ♦ Tener en cuenta que el nivel taxonómico de especie es esencial para poder utilizar estos organismos como indicadores. Por tanto, la identificación de estos organismos es una tarea para realizar por un experto botánico (Cirujano et al., 2005).
- ♦ Verificar la distribución con ayuda de páginas electrónicas como las del Herbario Amazónico Colombiano (COAH) del Instituto Sinchi y Bio-virtual del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, mientras

que la taxonomía puede verificarse a través de la página web TRÓPICOS que se presenta según la sistemática APGIII: Angiosperm Phylogeny Group III (UJTL, 2018).

- ♦ Registrar el género-morfoespecie en el *formato de registro taxonómico* y número de organismos (Anexo 8-19).
- ♦ Repetir este proceso con cada uno de las macrófitas por clasificar.
- ♦ Montar cada ejemplar y asegurarlo sobre una cartulina blanca con su respectiva etiqueta donde se debe registrar información según: lugar y fecha de muestreo, datos taxonómicos, nombre de colector, nombre de experto que realiza la determinación, descripción de caracteres que se pierden al secado, coordenadas geográficas de ubicación de la colecta, altitud, número de colección y referencia de la ubicación del registro fotográfico.
- ♦ Montar los ejemplares pequeños en sobres.
- ♦ Depositar en una colección de referencia de un herbario, los ejemplares montados. Los datos registrados en el formato se deben pasar a una matriz de Excel. En caso que se solicite la cobertura de cada morfoespecie, este se estima según la siguiente expresión (Ramírez, 2006):

$$\text{Cobertura especie} = \frac{\sum \text{cobertura especie}}{\text{Total de cuadrantes}}$$

$$\text{Cobertura comunidad} = \frac{\sum \text{cobertura de todas las comunidades}}$$

- ♦ Presentar los resultados en mapas de coberturas por especies o asociaciones, en perfiles de vegetación o en términos de composición y estructura

con el fin de estimar valores de diversidad. Los listados de las especies en lo posible, deben ir acompañados de datos referentes al estado de conservación, amenaza o endemismo.

- ♦ Finalmente, consignar los datos en el Sistema de Información Biológica (SIB), administrada por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt⁹.

8.2.2.6 Recomendaciones generales para el monitoreo de las comunidades hidrobiológicas

Para facilitar la organización del monitoreo se debe elaborar un plan de muestreo en el que se detallan todos los recursos por considerar para llevar de forma efectiva el desarrollo de las actividades (Anexo 8-17).

El plan de muestreo debe tener en cuenta como mínimo la siguiente información:

- Objetivo del muestreo.
- Rango de fechas en las que se llevará a cabo el muestreo.
- Identificación del personal designado con sus roles y responsabilidades. Se debe verificar que estén debidamente autorizadas y capacitadas, teléfonos de contacto en caso de emergencia.
- Período hidrológico en el que se va a realizar el muestreo: por ejemplo, altas precipitaciones, época de estiaje.
- Nombre o código de la ubicación, con las coordenadas y descripción detallada del acceso. Si cuenta con un contacto en el sitio de muestreo, se debe registrar la información de contacto.

- Tipo de muestra que se va a tomar y matriz que se va a evaluar.
- Tipo de variables o comunidades a muestrear.
- Controles de calidad de campo.
- Riesgos en los que van a estar expuestos el personal de campo.
- Tipo de transporte del personal y de las muestras. Es importante conocer los horarios de entrega y recogida de las muestras, el peso y área aproximada de los contenedores de las muestras para tener un valor aproximado del flete. Además de las desviaciones, adiciones o las exclusiones del método y del plan de muestreo.

Es necesario que el personal que va a ejecutar el muestreo cuente con la suficiente experiencia y debida competencia técnica. Al personal es necesario darle una inducción sobre las actividades por realizar y las normas del sistema de gestión integrado de la organización que incluya la gestión de la calidad, ambiental, de la seguridad y salud en el trabajo. Para proceder a autorizar dicho personal, se debe hacer una evaluación de la inducción o capacitación.

Antes del trabajo de campo se deben preparar los reactivos para la preservación de las muestras, revisar que los equipos se encuentren en óptimas condiciones para ser operados; en caso de no cumplir con los criterios de verificación, se debe informar al personal encargado. De ser necesario, efectuar un mantenimiento rápido o cambiar las baterías puede ser suficiente; si el problema persiste, es necesaria la consecución de otro equipo.

Así mismo, se debe verificar la disponibilidad, estado actual y limpieza de los materiales con los que se va a trabajar, por ejemplo, las redes y los elementos de protección personal para campo.

⁹ Disponible en: <https://www.sibcolombia.net/>.

La elección del tipo, tamaño y número de los recipientes requeridos para las colectas, depende de cada comunidad biológica.

Las etiquetas para la identificación de los recipientes en los que se van a colectar las muestras, deben elaborarse de manera que sean resistentes a la humedad, garantizar que permanezcan legibles y deben incluir como mínimo la siguiente información:

- Comunidad hidrobiológica muestreada.
- Fecha de colecta.
- Ubicación geográfica o sitio de muestreo.
- Tipo de muestra.
- Modo de preservación.
- Colector.

Queda a criterio del personal de campo si llevan los recipientes con sus etiquetas impresas o si las diligencia en el sitio de muestreo.

Siempre que sea posible y depende de los objetivos del proyecto, los biólogos deben recolectar sus propias muestras. Gran parte del valor de un biólogo experimentado radica en las observaciones personales que hace de las condiciones de campo y en su capacidad para registrarlas.

Una vez definidas las estaciones, se procede a realizar una descripción del punto de muestreo. Se deben incluir datos de turbidez, profundidad, tipo de sustrato, vegetación circundante, condiciones climáticas, presencia de animales y cultivos cercanos al área, entre otros. Estos datos se deben registrar en el *formato ficha descriptiva estaciones de muestreo* (Anexo 8-18), (UJTL, 2018).

Simultáneo a la colecta de muestras de fitoplancton, zooplancton, algas perifíticas, macroinvertebrados bentónicos, macrófitas, se recomienda registrar los parámetros fisicoquímicos.

Para utilizar con seguridad los diferentes reactivos que se usan en campo y en el laboratorio, se deben revisar de acuerdo con las recomendaciones señaladas en las hojas de seguridad de cada uno de ellos. Incluir entre los documentos, que se deben llevar a campo una copia de las hojas de seguridad de los reactivos que se van a usar.

Los formatos de captura de información de campo y laboratorio deben estar diseñados y diligenciados para garantizar la integridad de la muestra desde su recolección hasta que se genere el informe de los resultados. El formato debe permitir el rastreo de la tenencia y el manejo de la muestra desde el momento de la recolección y pasa por el análisis hasta la disposición final de la misma. Este proceso se conoce como *cadena de custodia* y se requiere para demostrar el control de la muestra; es particularmente útil cuando los datos se colectan para ser usados por las autoridades ambientales, para la regulación o para resolver un litigio. Los procedimientos de cadena de custodia son útiles para el control de rutina de las muestras.

Un formato de captura de datos debe acompañar cada muestra o grupo de muestras. El registro incluye como mínimo la siguiente información:

- Código de muestra o identificación exclusiva de la muestra.
- Firma del colector.
- Fecha, hora y ubicación geográfica de la recolección.
- Tipo de muestra.
- Requisitos de preservación de la muestra.
- Nivel de la corriente.
- Observaciones del entorno y de las condiciones ambientales.
- Información correspondiente al envío de la muestra al laboratorio.

- Firmas de las personas involucradas en la cadena de custodia de la muestra e incluir las fechas de custodia.
- Observaciones.

Las observaciones podrían constituir una ficha descriptiva del sitio, en la que se haga una descripción general, con la ubicación exacta, incluyendo los datos de las variables fisicoquímicas medidas, vegetación circundante, condiciones climáticas, presencia de animales y cultivos cercanos al área, entre otros. También puede contener esquemas del sitio señalando referencias de ubicación clave tales como carreteras y calles, un registro de fotografías pano-

rámicas y detalladas del lugar de colecta, así como de cada uno de los procedimientos realizados en campo durante la toma de las muestras.

Finalmente, es importante verificar la distribución de las diferentes comunidades hidrobiológicas con ayuda de páginas electrónicas como las del COAH del Instituto Sinchi y Biovirtual del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, mientras que la taxonomía puede verificarse a través de la página web TRÓPICOS que se presenta según la sistemática APGIII (UJTL, 2018).





Monitoreo de niveles de aguas subterráneas.
Finca La Leyenda, Quimbaya (Quindío)

9. Monitoreo de aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen un recurso vital en muchas regiones del país, que presentan condiciones restrictivas de oferta hídrica superficial o vulnerabilidades relacionadas con los periodos secos o de sequía propiamente dicho. Desde esa perspectiva, la utilización sostenible del agua subterránea y su gestión se vuelve crucial para el suministro de agua potable de algunas zonas rurales y urbanas, así como para el desarrollo de actividades industriales y de riego.

Para soportar dicha gestión con estrategias de aprovechamiento sostenible y políticas de protección y conservación, es necesario realizar un *monitoreo sistemático y permanente de las aguas subterráneas*, que permita contar con información oportuna y confiable del estado, y dinámica de los recursos subterráneos.

Este capítulo trata los aspectos concernientes al monitoreo del recurso hídrico subterráneo y de manera particular se abordan temas relacionados con requisitos de personal, selección de puntos, fre-

cuencia de monitoreo, procedimientos, materiales e instrumentos relacionados con la toma, transporte y almacenamiento de muestras.

En términos generales, el monitoreo de aguas subterráneas se entiende como un programa diseñado científicamente de continua supervisión que incluye observaciones, mediciones, muestreo y análisis estandarizado metodológico y técnico de variables físicas, químicas y biológicas. En este sentido, el monitoreo demanda procesos técnicos y financieros, lo que implica desarrollar programas de monitoreo con un enfoque claro, que permita limitarse a puntos definidos a partir de un proceso de interpretación de información hidrogeológica y de la situación hidrológica.

Se pueden implementar programas de monitoreo a nivel regional y nacional, los cuales comprenden la recolección de datos sobre el estado natural y el estado intervenido de las aguas subterráneas, en can-

tidad y calidad, de los principales sistemas acuíferos. Esta información soporta la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (MAVDT, 2010) y su Programa Nacional de Aguas Subterráneas que lidera el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. A la vez, permite incorporar información a los modelos hidrológicos nacionales para fines de gestión y evaluación de los recursos hídricos. Normalmente representa las condiciones hidrogeológicas naturales y se complementa con redes específicas que proporcionan información sobre fuentes de contaminación u otros propósitos de índole local.

Además, el monitoreo de aguas subterráneas satisface las necesidades de información que permiten definir estrategias y acciones en marcos de planificación y tomas de decisiones regionales en las autoridades ambientales para el manejo y protección de este recurso.



Monitoreo de calidad en manantiales.
 ■ Jairo Veloza

Para la implementación de un programa de monitoreo de aguas subterráneas se deben plantear los objetivos y los requerimientos de información primaria o agregada. Los objetivos, pueden variar dependiendo de las necesidades de información, el grado de precisión requerida, nivel (nacional, regional, local), de las prioridades o intereses de los usuarios, del presupuesto y organización institucional.

Es indispensable conocer a detalle las condiciones hidrogeológicas del área de estudio, que permita saber qué se está monitoreando. Es preciso contar con un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), el cual se realiza con base en la recolección de datos, análisis e

interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica, lo cual permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área específica a la escala deseada (IDEAM, 2014b).

En la Figura 9-1, se presentan los componentes que se deben considerar para la elaboración de un MHC, fundamentales para poder sintetizar las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de aguas superficiales y los aportes atmosféricos (IDEAM, 2014b).

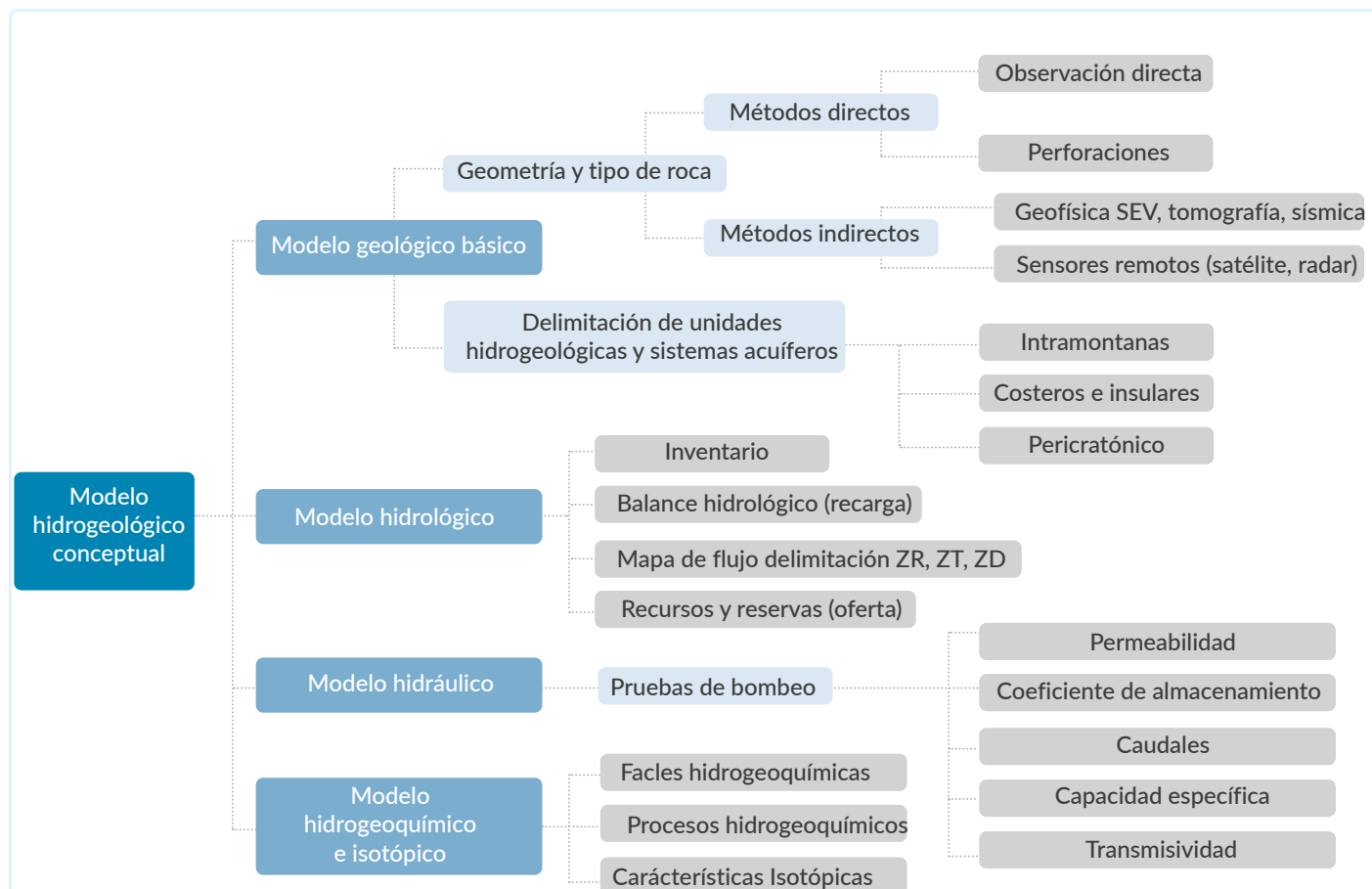


Figura 9-1. Componentes de un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC). Fuente: (IDEAM, 2015).

Dentro del MHC, es muy importante contar con la información de la dirección de flujo del agua subterránea y del inventario de puntos de agua, necesaria para ubicar y seleccionar aquellos puntos que pueden hacer parte de una red de monitoreo.

Para realizar el inventario de puntos de agua subterránea se utiliza el **Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS)**¹⁰, en donde se registran pozos, aljibes y manantiales, con su respectiva localización geográfica e información sobre: datos del propietario, uso del pozo, profundidad del nivel estático, profundidad del nivel dinámico, caudal de producción, tiempo de bombeo, características del pozo (profundidad, diámetro, profundidad de los filtros, columna litológica) y conductividad eléctrica del agua. Se recomienda dedicar el máximo esfuerzo a esta actividad, tanto en personal con experiencia, como en recursos económicos; de ser necesario, se debe considerar completar la información que no se obtuvo en campo, a partir de información secundaria como la que se presenta ante las autoridades ambientales para solicitar la concesión de un punto de captación.

El diseño de las redes de monitoreo depende del propósito que se establezca al inicio del programa de monitoreo. Estas redes pueden constituir sistemas primarios, los cuales sirven para detectar cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con el objetivo de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso de agua subterránea; además de sistemas secundarios y terciarios, los cuales permiten evaluar y controlar el impacto de riesgos específicos del agua subterránea (Tuinhof et al., 2006).

En función de los propósitos establecidos en la planificación, un monitoreo ya sea de cantidad o de calidad, puede considerar un muestreo a pozos de observación (piezómetros), pozos abandonados o pozos de producción (Figura 9-2), además de un monitoreo de aljibes-barrenos o manantiales (Figura 9-3). También es una práctica común el muestrear cuerpos de agua superficial y precipitación, para establecer relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas, que permiten una integración de aportaciones al caudal base o relaciones entre la química del agua. También, se suele monitorear la zona no saturada o zona vadosa con el propósito de establecer las dinámicas de los contaminantes en este tipo de ambiente (Figura 9-4).

10. Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS), disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15028/Formulario+de+Inventario+Puntos+de+aguas+subterranneas.pdf/cd704e1b-c03a-418f-9448-08af6755a2c8>



Figura 9-2. Izquierda: Toma de niveles en pozo profundo-CARSUCRE. Derecha: Toma de niveles de piezómetro-Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)



Figura 9-3. Izquierda: Determinaciones de parámetros in situ para un manantial-CORPOCESAR. Derecha: Medición de niveles de aljibes-CORPOGUAJIRA.



Figura 9-4. Muestreo en la zona no saturada, con el uso de tensiómetros y de lisímetros-CVC.

Los pozos de monitoreo o piezómetros, normalmente son de diámetro pequeño y tienen longitudes de filtro cortas (2 a 5 metros) y son utilizados con fines únicos de monitoreo. Existen tres tipos de piezómetros: sencillos, dobles y múltiples (piezómetros anidados), los cuales se instalan dependiendo del tipo de acuífero por evaluar. Para su perforación e instalación, se requieren procedimientos adecuados,

los cuales se encuentran disponibles en la Norma Técnica Colombiana-ICONTEC, NTC 3948 (ICONTEC, 1996a), la cual detalla las metodologías para la construcción, perforación, materiales, procesos de limpieza y desarrollo. La OMM (2011), en su documento *Guía de prácticas hidrológicas*, capítulo 6, presenta algunas consideraciones en la instalación de pozos de observación.

El diseño de los pozos de monitoreo, no solo debe cumplir con los requisitos para el desarrollo del muestreo, sino además contar con las especificaciones para evitar la contaminación y perturbación del acuífero. Como ejemplo, si se fueran a monitorear compuestos orgánicos, el pozo escogido debe evitar en lo posible, el uso de desengrasantes, lubricantes, lodos, aceites y bentonita durante la perforación (ICONTEC, 1996b).

Los pozos abandonados son una buena opción para el monitoreo, ya que bajan los costos; estos deben ser adecuados y cumplir con las especificaciones mínimas, como conocer su diseño y contar con disposiciones sanitarias que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie. También se pueden utilizar pozos de producción, construidos para abastecimiento de agua subterránea; en estos casos los procedimientos de muestreo y toma de datos pueden considerar un estado dinámico o estático, el cual dependerá de los objetivos de muestreo.

Se debe considerar que estos pozos pueden captar el agua subterránea de una o de varias unidades acuíferas, dependiendo de los objetivos se elegirán aquellos que capten de una sola unidad o capa acuífera cuando se trate de reconocer características hidráulicas o químicas del agua almacenada en esta unidad particular.

En todos los casos, los pozos de monitoreo (piezómetros, pozos de producción y aljibes-barrenos), deben cumplir con especificaciones técnicas de monitoreo como:

- Estar georreferenciados y nivelados a un BM (base medida) único o una red de puntos del IGAC referenciados al datum nacional, es recomendable su medición con precisión centimétrica.

- Permitir el libre paso de una sonda para medición de niveles y el acceso de un equipo de recolección de muestras para monitoreo de calidad.
- Cumplir con las disposiciones sanitarias como cerramiento, tapa de seguridad y sello sanitario, que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie.



Nivelación topográfica de pozos. Parque Gibraltar Bosa. [Asesorías Técnicas Geológicas-ATG Ltda.](#)



Nivelación topográfica pozos. Vicariato Apostólico Puerto Gaitán. [SIAM](#)

A continuación, se tratan por separado las consideraciones para realizar un monitoreo de cantidad y calidad de aguas subterráneas. Tanto los datos de

cantidad como los de calidad deben ser considerados a la par, ya que el uno depende del otro para su respectiva interpretación. En este caso la selección final de las estaciones de monitoreo y las frecuencias de medición dependerán de la integración de ambos diseños en los cuales los criterios superpuestos se combinarán para alcanzar el sistema de monitoreo de aguas subterráneas más efectivo y económico (Uil et al., 1999).

Desde el punto de vista técnico, se recomienda un equipo de profesionales y técnicos, que permitan buenas prácticas de monitoreo; algunos de los roles pueden ser ejecutados por la misma persona dependiendo del tamaño del proyecto. Sin embargo, el personal debe ser idóneo en cuanto a contar con el conocimiento, la experiencia y la disponibilidad de tiempo para realizar las prácticas de monitoreo. En lo posible, disponer de un profesional experto en aguas subterráneas que debe tener formación base en geología, ciencias de la tierra y/o afines, un profesional del

área química con experiencia en calidad de aguas y técnicos para el apoyo operativo, logístico y en campo.

9.1 Monitoreo de cantidad

Cuando se realiza un monitoreo de cantidad de aguas subterráneas, los parámetros que en este caso se consideran para ser medidos son niveles (presiones hidráulicas), la dirección y la cantidad de los flujos (se considera el abatimiento del nivel freático del acuífero en cualquier punto, cuando se está extrayendo agua y caudales de explotación), índices de recarga y descarga naturales, recarga inducida por sistemas de distribución, alcantarillado, entre otros (Uil et al., 1999).

A continuación, se presentan los pasos por seguir para la medición de los parámetros mencionados, teniendo en cuenta diferentes aspectos.

9.1.1 Selección de puntos de monitoreo

La selección de los sitios se debe diseñar a partir del modelo de flujo y transporte, obtenido del MHC



Monitoreo de niveles

■ Izquierda: CORPOCALDAS. Derecha: CRQ

de los sistemas acuíferos presentes en cuencas y/o subcuencas hidrogeológicas. Se debe considerar la información del inventario de puntos de agua subterránea, para seleccionar los puntos que pueden hacer parte de una red de monitoreo; también se puede optar por la construcción de piezómetros en los sitios de interés.



Monitoreo de niveles
CORALINA

Existen diferentes criterios para determinar los puntos que se deben muestrear en un monitoreo de cantidad; según (Livni et al., 2015), los puntos deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Una distribución espacial, que permita una representación razonable dentro del acuífero, ya sea libre o confinado. Es recomendable muestrear

una sola unidad acuífera. Una distribución espacial que favorezca el desarrollo de las secciones transversales paralelas y perpendiculares a las trayectorias del flujo regional de aguas subterráneas.

- Los puntos deben muestrear unidades acuíferas que tengan características similares, tanto en la hidrodinámica y la hidroquímica, como en el régimen de las aguas subterráneas.
- Una distribución que permita describir la recarga, la naturaleza y alcance de la interacción de agua subterránea-superficie. Por lo tanto, los puntos pueden seleccionarse cerca de sitios de agua superficial (arroyos, lagos, humedales y esteros) o estar próximos a fuentes de recarga.
- Una distribución que permita una representatividad del uso del agua subterránea en el área, la cual debe incluir riego, ganadería y suministro de agua para el sector doméstico y urbano.
- Cuando se seleccionan puntos de monitoreo para abastecimiento de agua, se recomienda monitorear algunos pozos alejados del sitio de extracción, para evaluar el efecto del bombeo sobre las características dinámicas del acuífero.
- Se deben conocer las características de construcción y régimen de extracción.
- Una distribución que permita un buen desarrollo de situaciones logísticas, tales como funcionamiento, condición y acceso del punto.

Considerando lo anterior, la localización y el número de los puntos de observación dependen de: I) los objetivos técnicos definidos, II) la representatividad espacial del punto de monitoreo, III) la escala espacial requerida, IV) la magnitud y la frecuencia de la variable medida en el espacio y tiempo, y V) la frecuencia de las mediciones (Uil et al., 1999).

Se pueden aplicar métodos estadísticos de interpolación para proyectar los puntos de monitoreo en el caso que se disponga de información histórica de variables que influyan sobre el régimen hidrodinámico del sistema; también se pueden utilizar para la optimización de redes de monitoreo en caso que ya se tengan.



Monitoreo de niveles
CORPOGUAJIRA

9.1.2 Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de mediciones en cantidad depende de los objetivos planteados, el uso previsto para la información y del nivel de análisis requerido de los datos (Taylor & Alley, 2001). Lo más importante es que esta frecuencia refleje la respuesta del sistema acuífero de forma adecuada ante condiciones naturales y/o antrópicas.

Hay que considerar que la frecuencia de monitoreo puede variar para distintas zonas o regiones dependiendo de la situación y conflictos de cada sistema y las condiciones climáticas (Advisory Committee on Water Information [ACWI], 2009). La Figura 9-5 ilustra los factores que deben ser considerados en la determinación de la frecuencia de medición de cantidad de agua subterránea; como ejemplo, debe tener una mayor frecuencia los pozos que estén monitoreando acuíferos no confinados y que tengan una alta recarga, aquellos acuíferos confinados de alta conductividad hidráulica y en donde exista una mayor variabilidad climática.



Figura 9-5. Factores para determinar la frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea. Fuente: (Taylor & Alley, 2001. Tomado y modificado de ACWI, 2009).

Según International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC), 2006, las condiciones climáticas definen la frecuencia, así:

- En regiones áridas, donde las fluctuaciones son prácticamente ausentes, se recomienda una frecuencia de observación muy baja, una o dos veces al año.
- En climas húmedos y regiones semiáridas, se pueden hacer mediciones con una frecuencia de cuatro veces al año.

Considerar que en el país se observan tres tipos de regímenes de precipitación que influyen en la elección de la frecuencia de monitoreo: la zona interandina y la llanura del Caribe con un régimen bimodal, es decir, dos períodos de lluvia intercalados con dos períodos secos; las llanuras orientales y la Amazonía colombiana con un régimen típicamente monomodal, es decir, un

gran período de lluvias seguido de un período seco; y un régimen poco contrastado, correspondiente a la llanura del Pacífico. Se busca que las mediciones correspondan a los regímenes de precipitación que se presentan en cada área; es decir, que cada lectura se haga en el mes más seco y más húmedo en cada sitio, de acuerdo con los registros de precipitación.

La Tabla 9-1, presenta un ejemplo de cómo la frecuencia puede ser ajustada dependiendo del tipo de monitoreo que se busque desarrollar. En este caso, se considera un monitoreo primario y un monitoreo de vigilancia. Si se está desarrollando una línea base de cualquier tipo de acuífero, se recomienda un ciclo de muestreo con una alta frecuencia, similar al del monitoreo de tendencias, el cual puede ser reducido cuando se complete la información de la línea base (ACWI, 2009).

Tabla 9-1. Ejemplo de frecuencia de monitoreo de niveles de agua subterránea teniendo en cuenta factores ambientales.

Categoría de monitoreo	Tipo de acuífero	Descensos de acuíferos cercanos a largo tiempo		
		Descensos pequeños	Descensos moderados	Descensos grandes
Monitoreo de tendencias	Libre			
	Baja recarga (< 5 in/año)	Una vez por trimestre	Una vez por trimestre	Una vez por mes
	Alta recarga (> 5 in/año)	Una vez por trimestre	Una vez por mes	Una vez por día
	Confinado			
	Baja conductividad hidráulica (< 200 ft/día)	Una vez por trimestre	Una vez por trimestre	Una vez por mes
	Alta conductividad hidráulica (> 200 ft/día)	Una vez por trimestre	Una vez por mes	Una vez por día
Monitoreo de vigilancia	Libre			
	Baja recarga (< 5 in/año)	Cada tres años	Una vez al año	Dos veces al año
	Alta recarga (> 5 in/año)	Cada tres años	Dos veces al año	Trimestre
	Confinado			
	Baja conductividad hidráulica (< 200 ft/día)	Cada tres años	Cada dos años	Una vez al año
	Alta conductividad hidráulica (> 200 ft/día)	Cada tres años	Cada dos años	Una vez al año

Fuente: (ACWI, 2009).

También se pueden tener en cuenta técnicas estadísticas, las cuales ofrecen posibilidades para extrapolar una óptima frecuencia, siempre y cuando se tengan disponibles las series de medición (Uil et al., 1999).

De la misma manera, cuando se definen las frecuencias de monitoreo, se debe tener en cuenta su duración, según el uso previsto para los datos de nivel de agua. En caso de necesitarse un mapa de flujo de una unidad acuífera, los datos deben ser colectados en el menor tiempo posible, de manera que se midan las cabezas hidráulicas en el acuífero

bajo las mismas condiciones hidrogeológicas; se debe buscar que los datos de nivel de agua destinados para este propósito duren un periodo de días o semanas, con base en la logística para tomar mediciones en varios puntos de observación.

La Tabla 9-2 presenta la frecuencia de medición de niveles de agua dependiendo de uso previsto para el programa. Los datos a corto plazo son colectados en periodos de días, semanas o meses, mientras que información recolectada para largos periodos de tiempo abarcan medidas anuales o por décadas.

Tabla 9-2. Longitud típica de recolección de datos de nivel de agua en función del uso previsto.

Uso previsto de datos de nivel de agua	Longitud típica de registros hidrológicos requeridos			
	Días-semanas	meses	años	décadas
Para la determinación de propiedades hidráulicas de un acuífero (pruebas de bombeo).	X	O		
Mapeo de la altura de la tabla de agua o superficie potenciométrica.	X	O		
Monitoreo de los cambios a corto plazo en recarga y almacenamiento.	X	X	O	
Monitoreo de los cambios a largo plazo en recarga y almacenamiento.			X	X
Monitoreo de los efectos de la variabilidad climática.			X	X
Monitoreo de los efectos regionales de desarrollo de aguas subterráneas.			X	X
Análisis estadístico de las tendencias de los niveles de agua.			X	X
Monitoreo de los cambios de dirección de flujo de las aguas subterráneas.	O	X	X	X
Monitoreo de las aguas subterráneas y la interacción con el agua superficial.	X	X	X	X
Modelación numérica del flujo y/o transporte de contaminantes del agua subterránea.	O	X	X	X

Nota: (X) más aplicable para uso previsto, (O) a veces aplicable para el uso previsto.

Fuente: (Taylor & Alley, 2001).

Cabe resaltar que la frecuencia de monitoreo podrá ser ajustada en la medida en que se obtengan y analicen los datos, existan cambios drásticos en las condiciones climáticas y surjan o se solucionen problemas en cuanto a la contaminación y/o la sobreexplotación del acuífero.

9.1.3 Tipo de mediciones

El monitoreo de cantidad, involucra mediciones del nivel piezométrico y variables hidráulicas, las cuales pueden ser tomadas de forma continua o periódicas.

Las mediciones continuas son aquellas que se programan en tiempos específicos y requieren la instalación de sensores automáticos, recolectan la información a una frecuencia determinada para proporcionar datos con una muy alta resolución. Las mediciones periódicas, son las realizadas en intervalos programados (semanas, meses o años); estas pueden reflejar costos de desarrollo más bajos en comparación con la instalación de equipos automáticos.

Es recomendable que algunos puntos donde las respuestas hidráulicas del acuífero son rápidas, cuenten con equipos que permitan mediciones continuas para evitar pérdida de información o sesgos de la misma. Tal es el caso de monitorear acuíferos cársticos, sujetos a respuestas rápidas a episodios de lluvia, áreas de difícil acceso o pozos de irrigación o suministro de agua (Uil et al., 1999).

9.1.3.1 Medición de niveles

Los niveles de agua en muchos acuíferos siguen un patrón cíclico natural de fluctuación estacional; normalmente los niveles aumentan durante la época de lluvias, debido a la recarga del sistema por mayores precipitaciones, y descienden durante el verano debido a una menor recarga y una mayor evapotranspiración (Taylor & Alley, 2001).

Para poder detectar estos cambios en el régimen del flujo del agua subterránea, se realiza una medición de niveles freáticos o piezométricos, que pueden ser de tipo estático o dinámico.

Es recomendable en este tipo de medición, tener una referencia de las tendencias de los niveles piezométricos para poder validar la información que se recolecta en campo. Si se cuenta con datos existentes de nivel piezométrico para el punto, se pueden hacer gráficos de la relación entre el nivel y el tiempo para identificar tendencias y validar valores observados. En el caso de que el dato no concuerde con la tendencia, se tiene la oportunidad de investigar ese mismo día cuales fueron las causas probables del desfase.

9.1.3.2 Medición de parámetros hidráulicos

La evaluación de parámetros hidráulicos como permeabilidad, transmisividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc., es una de las tareas básicas en cualquier estudio hidrogeológico para definir el tipo de acuífero, filtraciones entre acuíferos o desde la superficie del terreno, comunicación del pozo con otras captaciones próximas, caudales óptimos de bombeo, tiempos de tránsito de contaminantes, existencia de bordes impermeables y zonas de recarga, conexión con cuerpos de agua superficiales, entre otros.

Lo más útil y fiable para este tipo de evaluación es realizar ensayos de bombeo que permitan obtener conocimientos de las variables hidrogeológicas, así como también tener control de los caudales de explotación. Estos ensayos consisten en bombear el pozo, a caudal constante o caudal variable, y analizar el descenso de los niveles piezómetros tanto en el pozo de bombeo como en los pozos o piezómetros circundantes hasta alcanzar un estado de equilibrio,

para luego apagar el equipo de bombeo y medir la recuperación del nivel a diversos intervalos de tiempo. También se pueden hacer pruebas de bombeo en aljibes, sin embargo, estas requieren

de una atención especial debido a su gran diámetro, en los cuales se genera un almacenamiento de agua que afecta la interpretación de los datos por métodos tradicionales.



Pruebas de bombeo
 ■ Asesorías Técnicas Geológicas-ATG Ltda.

Existen dos tipos básicos de métodos de ensayo: ensayos de bombeo en régimen permanente y ensayos de bombeo en régimen transitorio o variable (Figura

9-6). Para pozos de pequeño diámetro se utilizan pruebas denominadas slug test que cumplen con los mismos objetivos de las pruebas de bombeo.

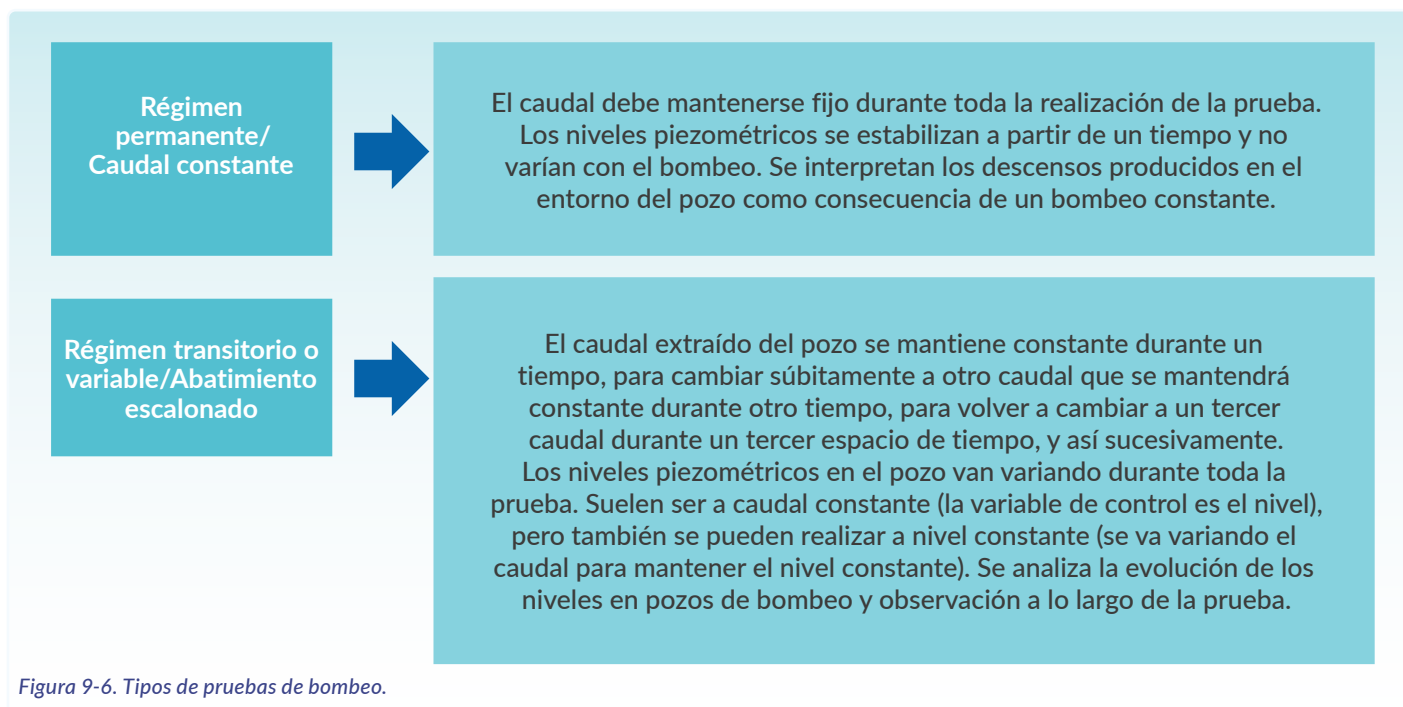


Figura 9-6. Tipos de pruebas de bombeo.

La Figura 9-7, presenta un diagrama esquemático de la instalación de un ensayo típico en un acuífero confinado de espesor b , con tres pozos de observación denominados A, B y C, los cuales están situados a distancias variables (r en el caso del pozo B) del pozo bombeado. La localización de los pozos de observación con respecto a los de control, depende de la precisión que se necesite según sea el caso del programa de monitoreo.

Cuando se pone en marcha la bomba, el nivel de agua desciende, crea un cono de depresión en la superficie piezométrica del acuífero e induce un

descenso de nivel s , medido en el pozo B, que es la diferencia entre la altura piezométrica inicial h_0 , y la altura piezométrica de bombeo h (OMM, 2011).

Los ensayos de bombeo suelen durar desde ocho horas hasta un mes o más, dependiendo del tiempo necesario para lograr un nivel estable de agua durante el bombeo; cuando este inicia, se observa un descenso del nivel, el cual disminuye de manera no lineal con la distancia al pozo bombeado y aumenta también, de manera no lineal, con el tiempo. Los valores observados son las variaciones del descenso de nivel a lo largo del tiempo (OMM, 2011).

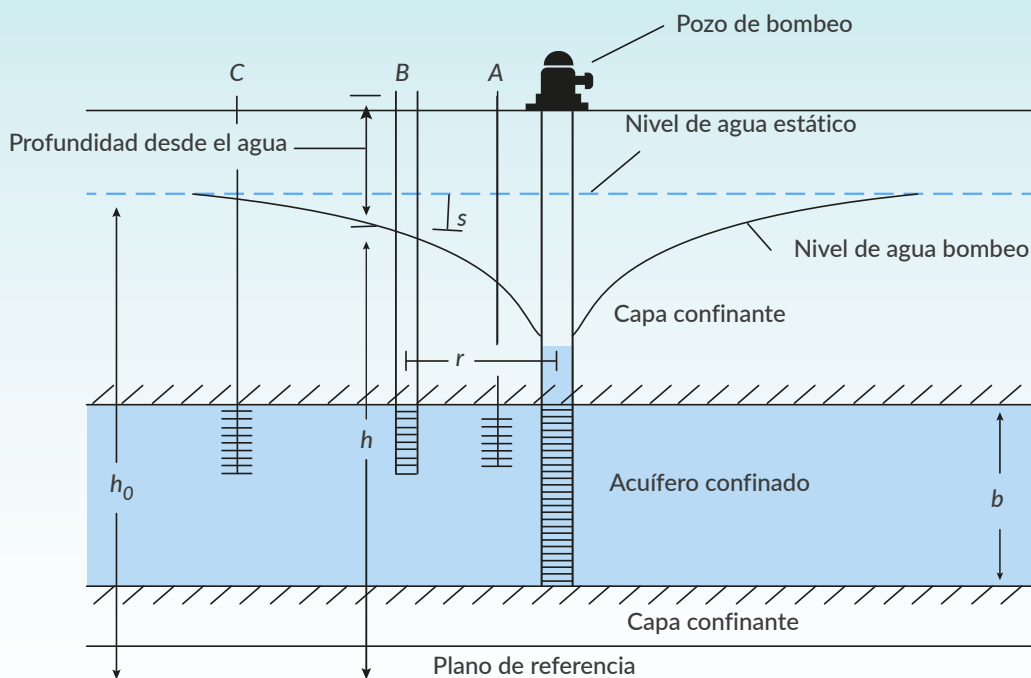


Figura 9-7. Diagrama esquemático de un ensayo de bombeo típico en el que aparecen indicadas las diversas mediciones. Fuente: (OMM, 2011).

Pueden consultarse referencias como (Custodio & Llamas, 1983), (Krusseman & de Ridder, 1994), (Batu, 1998), (Stallman, 1976), (Martínez & López, 1984), (Comisión Nacional del Agua, 2007), las cuales cubren

desde los conceptos básicos, métodos generales de ensayos de bombeo, interpretación de resultados, además de algunas consideraciones de preparativos previos a una prueba y su ejecución.

9.1.3.3 Medición de caudal y flujos de corriente subterránea

Considerando que el caudal de un pozo o aljibe varía en función de los cambios de nivel de agua subterránea, es necesario efectuar mediciones repetidas para determinar el ritmo de variación (OMM, 2011).

Los métodos de medición más comunes incluyen el llenado temporizado de un volumen calibrado, caudalímetros y mediciones del caudal del orificio (*American Society for Testing and Materials International*, 2000), en OMM (2011).

Volumen calibrado

Según la OMM (2011), el volumen calibrado consiste en medir el tiempo necesario para llenar dicho volumen con el agua que es bombeada del punto de observación; la exactitud depende de la precisión en la medición del tiempo y de las operaciones de llenado. Estas operaciones pueden variar dependiendo de los niveles de bombeo, ya que cuando se presentan niveles muy bajos, las mediciones pueden hacerse mediante el uso de alguna cubeta o bidón graduados; mientras los caudales son altos, se puede pensar en redirigir los flujos a un depósito o recipiente de mayor envergadura.

Caudalímetros

Corresponden a instrumentos mecánicos, eléctricos y electrónicos que miden el flujo en el interior de un tubo y que proporcionan ya sea una lectura instantánea del caudal o una lectura totalizada.

Medición de caudal mediante orificio

Consiste en un montaje que incluye un orificio que se fija con una brida al extremo de una tubería de descarga horizontal. Al ser el diámetro del orificio menor a la tubería de descarga, se crea una contrapresión proporcional al caudal, la cual se mide utilizando un tubo manómetro situado a unos tres diámetros de

tubería del orificio, corriente arriba, en el centro de la conducción.

Si es de interés conocer la dirección y velocidad de flujo de las aguas subterráneas, es posible emplear las mediciones continuas que resultan del uso de trazadores químicos (tinturas, microbiológicos o trazadores radiactivos). El método consiste en introducir en un pozo o piezómetro, un trazador adecuado y observar la disminución de su concentración en función del tiempo. La variación de la concentración depende principalmente de cualquier tipo de flujo que exista dentro del pozo y, en menor escala, de la difusión del trazador (Rodríguez, 1975).

También, para el cálculo de velocidad, es posible el uso de técnicas ultrasónicas o electromagnéticas.

9.1.4 Materiales y equipos

En el monitoreo de cantidad de aguas subterráneas, se pueden realizar mediciones directas en los puntos de observación como pozos, aljibes o manantiales, con instrumentos de operación manual o con instrumentos automáticos de registro continuo. Se presentan algunas descripciones de algunos de los instrumentos más empleados.

9.1.4.1 Equipos para medición de niveles

La medición directa de los niveles de agua subterránea puede realizarse con instrumentos de operación manual o con herramientas automáticas de registro continuo (MAVDT & IDEAM, 2011).

Existe una amplia gama de medidores disponibles en el mercado; a continuación, se describen algunos de ellos, sin embargo, es de anotar que los equipos referenciados son solo ejemplos; la elección del uso de los equipos dependerá de los objetivos de muestreo y de los recursos financieros del programa de monitoreo:

Instrumentos de medición manual

Conocidos como sondas de nivel, las cuales constan de una cinta muy resistente marcada con intervalos de un milímetro (mm) y longitudes hasta de 1000 metros, dispuestas en carretes balanceados con manija para transporte y freno (Figura 9-8). Poseen un sensor que, en el momento de tener contacto con un líquido conductor, emite una señal acústica y luminosa clara.

Algunas de estas sondas, cuentan con cables más delgados y sensores más pequeños, ideales para usar

en pozos con diámetros estrechos o se debe pasar a través de las bombas instaladas en los pozos.

Existen modelos con cintas, carretes motorizados y que no se adhieren a superficies mojadas al interior de los pozos; además, algunos incorporan sensores de conductividad eléctrica, temperatura u otros, dependiendo de las necesidades del usuario; en estos sensores la unidad reacciona al contacto del agua con un piloto y una señal sonora, en una pantalla LCD se muestran los valores de los parámetros de calidad medidos (Figura 9-9).



Figura 9-8. Sonda de nivel de agua con señal acústica y luminosa, con marco y carrete.
Fuente: (OTT, 2019) (Maser, 2021)



Figura 9-9. A. Sonda para medición de niveles con carrete motorizado. B. Sonda compacta, de carrete liviano con cable y punta delgada para usos en pozos de poco diámetro. C. Modelo de sonda que mide temperatura, nivel, conductividad.
Fuente: (Solinst, 2021)

Algunas de estas sondas, cuentan con un sensor de fondo para medir la profundidad del sondeo, el cual consiste en un cilindro metálico con el fondo cóncavo

que va atado al final de un cable o cuerda; al chocar el cilindro en su bajada con la superficie del agua, se oye un claro sonido (*pop*), (Figura 9-10).



Figura 9-10. Tipo de sondas con sensor de fondo.
Fuente: (HYDROTECHNIK, s.f.).

Si se requieren mediciones de pozos artesianos, se debe instalar un sello hermético en la boca del pozo. La superficie de presión (o el nivel de agua equivalente) se puede medir con un manómetro, ya sea mediante observaciones visuales o acoplado a un sistema de registro (OMM, 2011).

Instrumentos de registro continuo

Se encuentran en el mercado los registradores automáticos o dataloggers, que no solo miden niveles de agua, sino que pueden contar con sensores de temperatura y conductividad (Figura 9-11). Estos instrumentos presentan una alta capacidad de memoria,



Medición de niveles piezométricos con sonda de señal acústica.
■ CARSUCRE



Instrumentación automática de medición de niveles.
■ CVC

un funcionamiento definido por el usuario que permite muestreo lineal y basado en eventos y, un diseño sellado que permite que el mantenimiento y la limpieza sean rápidos. Son útiles para cualquier región con diferentes condiciones climáticas y para todo tipo de pozos o aljibes, ya que ofrecen protección a sobrecargas eléctricas causadas por las bombas o los rayos.

Pueden ser usados con lectura directa en el punto de monitoreo o también pueden registrar la información de manera remota, a través de conexión de sistemas de telemetría con interfaces de estaciones remotas a través de sistema celular análogo, digital, por línea telefónica o por radar.



En la Figura 9-12, se presenta un ejemplo de los sensores Divers que permiten la medición y registro de niveles, temperaturas y, en algunos casos, de conductividad y presión. En el mercado existen varias opciones de estos equipos; el uso depende de capacidad financiera del programa de monitoreo.

Estos instrumentos están conformados por un sensor de presión, diseñado para medir la presión del agua, un sensor de temperatura, una memoria interna para almacenar las mediciones y una batería. Para su operación, es necesario el uso de un computador portátil o cualquier otro equipo de campo como un celular o Pocket PC, por medio de conexión óptica; puede ser programado por el usuario según las necesidades de trabajo (Schlumberger Water Services, 2014). El uso de estos equipos permite

una recopilación de datos más eficiente y una alta precisión, es práctico y favorece una gestión, análisis y visualización fácil de información, con muchos formatos de salida.

Los dispositivos cuentan con una longitud entre 90 y 135 mm, un diámetro de 22 mm (18 mm para el Micro-Diver) dependiendo del modelo, y pueden emplearse en casi cualquier tipo de tubo de sondeo. Algunos de estos son ideales para ensayos de bombeo, ya que tienen la posibilidad de fijar su propia frecuencia. Otros pueden ser utilizados en ambientes bastante corrosivos y son apropiados para determinar intrusión salina, filtraciones de aguas residuales y aguas residuales contaminadas por químicos o vertederos. Estos instrumentos establecen la altura de una columna de agua, miden la presión del agua con el sensor de presión integrado.

Algunos, determinan la presión atmosférica como si fuera un barómetro y una vez que se sumerge el

sensor Diver, se complementan con la medición de la presión del agua.



Figura 9-12. Registradores compactos tipo Divers, para la medición y el registro automático del nivel del agua subterránea, conductividad y temperatura. Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014)

También pueden ser utilizados sensores o medidores de niveles por radar o ultrasonido, pero su uso es menos extensivo.

En general, estos instrumentos necesitan un manejo cuidadoso y un mantenimiento adecuado, ya que un mal funcionamiento o un uso indebido puede disminuir su eficacia. Junto con los Divers también se debe instalar en cada área a medir un Baro-Diver que permite compensar las medidas en función de las variaciones de la presión.

9.1.4.2 Equipos para medición de parámetros hidráulicos

Para medición de caudales, el equipo básico es una bomba que permite bombear agua del pozo y medir luego el volumen extraído, el tiempo de bombeo y una sonda de nivel para saber el abatimiento del nivel de agua en el pozo. Es importante que la bomba permita bombear a caudal constante y que sea adaptable para tubos de pequeño diámetro, por lo que es necesario conocer el caudal requerido y la altura dinámica total del sistema (Figura 9-13).



Figura 9-13. Prueba de bombeo a caudal constante Pozo Servicio Geológico Colombiano (SGC) Rihacha 2 (N: 1 765 265, E: 1 132 644). Fuente: (SGC, 2016a).

Bombas sumergibles

Pueden descargar, ya sea, grandes caudales (mayores de 30 l/s) o pequeños caudales y producir altas presiones (Figura 9-14). En caso de que ello no sea posible el uso de este tipo de bombas, se puede utilizar un compresor con manguera de extracción,

aunque en tal caso es difícil lograr caudal constante (Figura 9-15). En general, para seleccionar el tipo y la capacidad de la bomba hay que considerar las características de producción potencial y profundidad del pozo, de acuerdo con la información disponible sobre el acuífero (modelo conceptual).



Figura 9-14. Bomba sumergible para grandes caudales utilizada en pruebas de bombeo. Fuente: (DURMAN, 2018) (Valencia, s.f.).



Figura 9-15. A. Bomba sumergible tipo lapicero de hasta 200 gpm (galones por minuto) (Barnes de Colombia S.A, 2019). B. Bomba sumergible de hasta 60 gpm (Evans, 2021). C. Bomba sumergible de Caudal hasta 90 l/min (5,4 m³/h) (Pedrollo S.p.A, 2021)

En la medición de caudales se pueden utilizar dispositivos tales como: vertederos calibrados, orificios libres, descargas libres en tubería, canaletas Parshall o contadores (presión o sónicos). Normalmente, se hace pasar el flujo por una restricción, cuya curva de calibración es conocida. En los manuales de hidráulica hay abundantes descripciones y calibraciones para este tipo de instrumentos. En caso de no contar con dispositivos

semejantes, puede utilizarse un recipiente previamente tarado en el que se mide el tiempo de llenado del mismo. Estos sistemas permiten calcular en forma continua el caudal bombeado (volumen por unidad de tiempo).

Además, es necesario contar con una sonda eléctrica para medición de niveles de agua en el pozo de bombeo, cronómetros para cuantificar intervalos de tiempo y formatos para la descarga de información (Figura 9-16).



Figura 9-16. Uso de sonda eléctrica para medición de niveles de agua en el pozo de bombeo. Fuente: (Valencia, s.f.).

Medición directa del tiempo

La forma más sencilla de calcular los caudales es a través de la medición directa del tiempo que tarda en llenarse un recipiente de volumen conocido. La corriente que genera el bombeo del pozo o aljibe, o la corriente natural del manantial, se desvía hacia

un recipiente graduado adecuado o un espacio de volumen conocido; el tiempo que demora su llenado se mide utilizando un cronómetro, con especial precisión cuando sea de solo unos pocos segundos. Con la información se calcula el caudal a partir de la Ecuación 9-1:

$$Q = v/t$$

Ecuación 9-1

Donde,

Q: Caudal en litros por segundo ($\frac{l}{s}$).

v: Volumen en litros (l).

t: Tiempo en segundos (s).

Vertederos y canaletas

Otros métodos de medición, son los vertederos y canaletas que consisten en obstrucciones hechas en un canal para que el líquido retroceda un poco y fluya sobre o a través de ellas. Si se mide la altura de la superficie líquida corriente arriba, es posible determinar el flujo. Para el caso de manantiales, se debe muestrear su flujo en una sección uniforme y desviarlo hacia una cañería de manera que descargue a presión y permita calcular el caudal a partir de mediciones de chorro.

Caudalímetros

Se pueden utilizar ya sea los que arrojan mediciones instantáneas o totalizadas; lo más importante es que siempre se tengan en cuenta las instrucciones del fabricante, pues las lecturas de estos instrumentos están condicionadas a la presencia de turbulencias en el flujo. Las instrucciones de uso pueden estipular que el medidor esté precedido de una cierta longitud de tubería recta para reducir los efectos de las turbulencias (OMM, 2011).



Figura 9-17. Izquierda: medición de caudales por métodos volumétricos de aforo y medidor de corriente. Derecha: aforo de caudales pequeños. Fuente: (Valencia, s.f.).

9.1.5 Procedimiento para la toma de datos

A continuación, se describen los procedimientos para la toma de niveles y parámetros hidráulicos en aguas subterráneas.

9.1.5.1 Toma de niveles

En las mediciones de cantidad, es necesario tomar el registro de la profundidad de la tabla de agua, utilizando una sonda de niveles que debe ser introducida al piezómetro, pozo o aljibe (Figura 9-18).

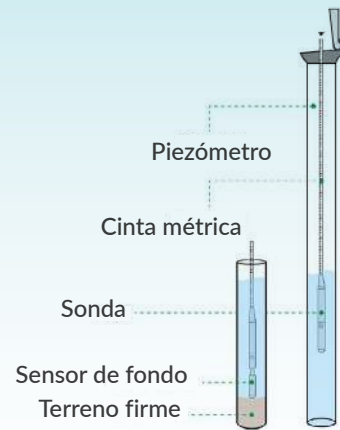


Figura 9-18. Izquierda: Monitoreo de niveles realizado en el municipio de Puerto Gaitán. Derecha: Esquema que ilustra la medición de niveles con el uso de una sonda manual.
Fuente: (CORMACARENA & SIAM S. A., 2016), (HYDROTECHNIK, s.f.).

La toma de niveles requiere que los pozos se encuentren nivelados a una cota de referencia y, además, que el sitio de medida en la boca del pozo esté claramente establecido. En la Figura 9-19 se

ilustran los principales elementos por medir durante el seguimiento (niveles, diámetro, altura de la boca del pozo y profundidad), si se monitorea en niveles estático o dinámico.

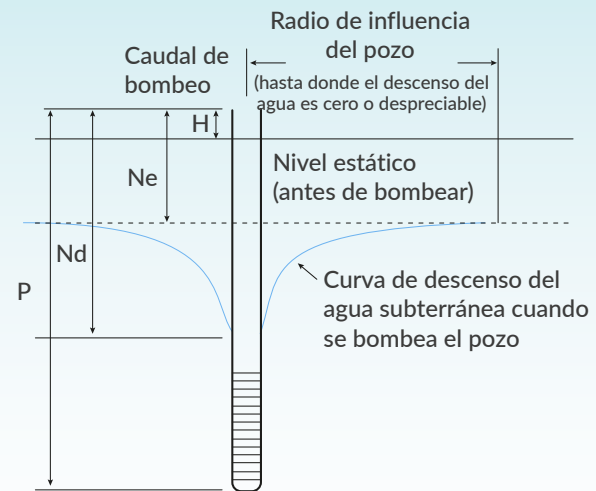
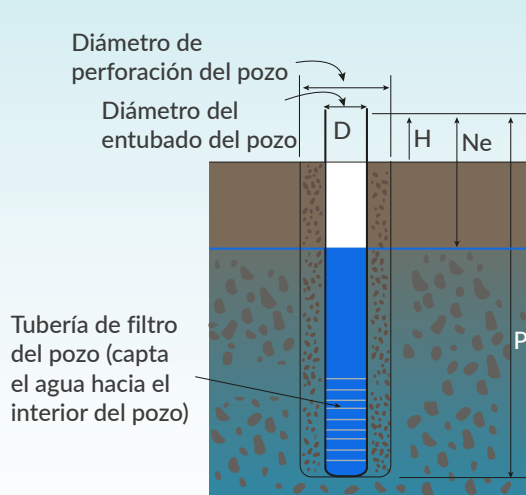


Figura 9-19. Izquierda: Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas en estado estático. Derecha: Características para medir durante el monitoreo de aguas subterráneas en estado dinámico.
Fuente: (CORPOCESAR, 2009).

Es necesario medir (CORPOCESAR, 2009):

- Diámetro de la perforación del pozo.
- Diámetro del entubado del pozo (D).

- Altura de la tapa sobre el nivel del terreno (H): se mide la altura del tubo del pozo o del anillo del aljibe sobre el terreno circundante, utilizando

una cinta métrica; el dato se expresa en metros (Figura 9-20).

- Nivel freático en estado estático (Ne): este se toma en condiciones de no bombeo; el dato se toma en relación con la superficie del terreno, se debe restar la distancia entre el punto de medición (dato dado por la cinta métrica de la sonda) y el dato de la cota del terreno.
- Nivel dinámico (Nd): este se toma en condiciones de bombeo; se toma en relación con la superficie del terreno, se debe restar la distancia entre el punto de medición (dato dado por la cinta métrica de la sonda) y el dato de la cota del terreno.
- Profundidad del pozo (P).
- Influencia del bombeo: en ocasiones se dispone de uno o varios pozos de observación o piezó-

metros, en los cuales realizar las mediciones de nivel, para establecer la extensión espacial del efecto del cono de bombeo (curva de descenso del nivel de agua subterránea resultante de la extracción de agua en un pozo). Estos pozos pueden estar contruidos a varias distancias del pozo de bombeo, con lo cual se podrá evaluar la influencia de dicho bombeo sobre los alrededores. Para esto, se deberá conocer la distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación.

Se puede medir lo que se denomina el nivel de recuperación, el cual se realiza cuando el equipo de bombeo se haya apagado reciente o de inmediato después de apagarse (CORPOCESAR, 2009).



Figura 9-20. Medición de la altura de la boca del pozo o del aljibe-CORPOCESAR.

Específicamente, para la medición de niveles, se apoya la sonda en el borde del tubo principal del pozo (aljibe) y se introduce lento en su interior hasta que el aviso luminoso-sonoro de la sonda indique que

el sensor de la misma ha alcanzado el nivel de agua (Figura 9-18); se sube y baja la cuerda unos pocos centímetros, se repite el movimiento unas cuantas veces, y se toma medida de la longitud de la cuerda

teniendo como referencia algún punto del borde del pozo (Figura 9-22), (IGRAC, 2006).

Algunos pozos cuentan con un tubo adicional de diámetro inferior al tubo principal para realizar este tipo de mediciones y evitar que la sonda quede atascada con el cableado de la bomba, o en los alambres de sostenimiento de la instalación de la bomba y tubería de succión. En el caso que no

exista esta tubería adicional, es conveniente introducir y fijar firme al interior del pozo, antes que la sonda, una serie de tubos de 3/4 de pulgada de diámetro interno hasta una profundidad cercana a la ubicación del punto de succión, para luego introducir en este tubo la sonda propiamente dicha, con el fin de evitar que se quede obstruida (Figura 9-21), (CORPOCESAR, 2009).



Figura 9-21. Tubería de 3/4 de pulgada de diámetro opcional para las mediciones de niveles con sonda-CORPOCESAR.

Toda esta información debe ser registrada en un formato (Anexo 9-1), el cual debe tener información adicional de las coordenadas y altura del punto, código de identificación, usuario o dirección del predio, fecha de toma del dato; el usuario puede incluir más información en el formato si lo considera necesario.

Para el caso en que se monitoree en niveles dinámicos, debe tomarse nota del tiempo transcurrido (horas, minutos) desde que inició el bombeo como el tiempo desde que se apagó la bomba, respectivamente (CORPOCESAR, 2009).

Para el caso en que se deseen tomar datos del nivel estático, y se monitoree un pozo o aljibe que sea de producción, antes de llevar a cabo la medición, se debe concertar con el propietario del pozo para que se detenga el bombeo por determinado tiempo (depende de las condiciones del acuífero); lo recomendable son 24 horas.

Al finalizar, la sonda debe ser lavada cuidadosamente con agua destilada para evitar la contaminación cuando se realice una nueva medición.



Figura 9-22. Medición de nivel piezométrico. Izquierda: CARSUCRE. Derecha: CORPOGUAJIRA.

En el caso de utilizar sensores Divers, estos deben suspenderse del pozo de monitoreo por debajo del nivel de agua, como se muestra en la Figura 9-23. La profundidad a la que se puede sujetar un Diver depende del rango de medición del instrumento; se

determina la longitud del cable de suspensión, en función del nivel freático más bajo, (Schlumberger Water Services, 2014).

Los Divers deben ser lavados con agua destilada y secados después de cada medición.



Figura 9-23. Medición de los niveles de agua subterránea utilizando un Diver. Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014) (IDEAM, 2015b).



Figura 9-24. Instalación de un Diver en un pozo de monitoreo-CORPOURABÁ.

9.1.5.2 Toma de parámetros hidráulicos

A continuación, se ilustra el proceso para la toma de datos de parámetros hidráulicos. Antes de iniciar el bombeo, es necesario contar con una descripción de los puntos de referencia, información del diámetro, tipo de camisa, tipo de rejilla, método de construcción de todos los pozos y una localización de todos los pozos en planta en relación con algún levantamiento topográfico o por coordenadas de latitud y longitud (la precisión depende de lo que se necesite en cada caso), pero sobre todo debe estar bien clara la posición de los pozos de observación respecto a los de control.

Para iniciar, se toman datos del nivel de agua en todos los pozos de observación, incluido el de bombeo, con el fin de determinar el nivel de agua estático antes del ensayo, utilizando una sonda. Si el pozo es de producción, es necesario detener el bombeo como mínimo 12 horas antes de la prueba; no puede estar en recuperación. Toda esta información debe ser registrada en el formato respectivo (Anexo 9-2).

Al poner en marcha la bomba y durante todo el ensayo, se deben tomar los datos del nivel en los pozos de observación y en el de control, además de medir el caudal de la bomba (OMM, 2011). El período de observación antes de comenzar la prueba (anterior a $t=0$), debe ser, como regla general, al menos del doble del tiempo que dure la prueba de

bombeo. Durante la prueba, la profundidad hasta el agua en cada pozo, debe medirse con frecuencia suficiente para que se pueda contar con un buen número de observaciones en cada ciclo logarítmico (alrededor de 8 a 10). Esto puede lograrse, por ejemplo, si se ejecutan mediciones del nivel en los tiempos $t=1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8$ y 10 minutos y en todos los múltiplos de 10 de esos tiempos en los ciclos siguientes. Durante las 2 o 3 primeras horas a partir del momento de inicio de la prueba ($t=0$), es preferible que haya un observador en cada uno de los pozos de observación y en el de control. Después de cinco horas, las mediciones se deben hacer a intervalos de 100 minutos o más; en ese caso, se puede utilizar un solo observador para tomar toda la información, ya que le resulta relativamente fácil trasladarse a los distintos lugares en un tiempo corto. El proceso debe hacerse siguiendo siempre la misma secuencia (MAVDT & IDEAM, 2011).

El caudal obtenido en el pozo principal se mide normalmente haciendo pasar el flujo por una restricción, para la cual se conoce la curva de calibración. En los manuales de hidráulica hay abundancia de descripciones y calibraciones de este tipo de dispositivos. En caso de no poder contar con dispositivos semejantes, puede utilizarse un recipiente previamente tarado en el que se medirá el tiempo de llenado del mismo (MAVDT & IDEAM, 2011).



Figura 9-25. Prueba de bombeo a caudal constante pozo SGC Hospital de Maicao.
Fuente: (SGC, 2016a).

Las tolerancias que se consideran generalmente aceptables en las mediciones de bombeo, son las siguientes:

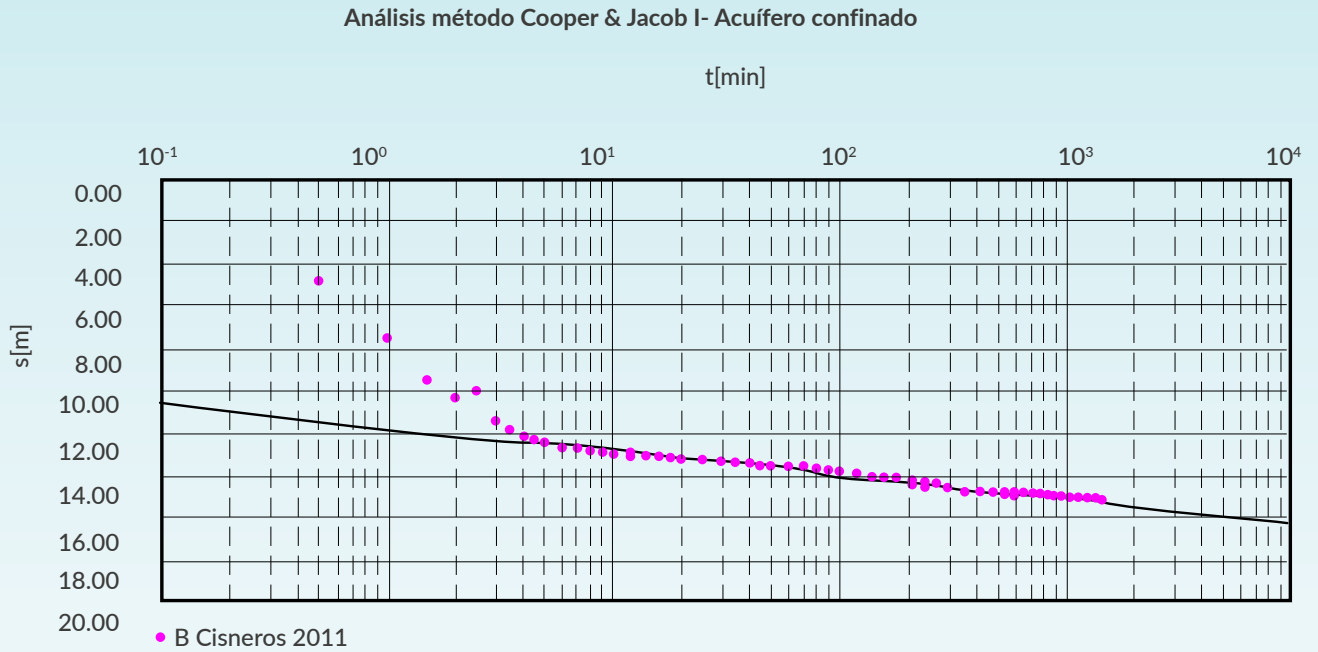
- Caudal del pozo de control: $\pm 10\%$.
- Profundidad hasta el agua en los pozos, por debajo del punto de referencia: ± 3 mm.
- Distancia del pozo de control a cada pozo de observación: $\pm 0.5\%$.
- Elevación de los puntos de referencia: ± 3 mm.
- Distancia vertical entre los puntos de referencia y la superficie del terreno: ± 30 mm.
- Profundidad total de los pozos: $\pm 1\%$.
- Profundidad y longitud de los intervalos con rejillas en todos los pozos: $\pm 1\%$.

Esta información debe ser representada por medio de gráficas log-log o semi-log que muestren la relación entre la distancia o el tiempo y el descenso de nivel. En la gráfica de distancia y descenso de nivel se reproducen los datos de todos los pozos en un determinado momento, mientras que, en la gráfica de tiempo y descenso de nivel se muestran todos los datos obtenidos en un pozo. Esta información es

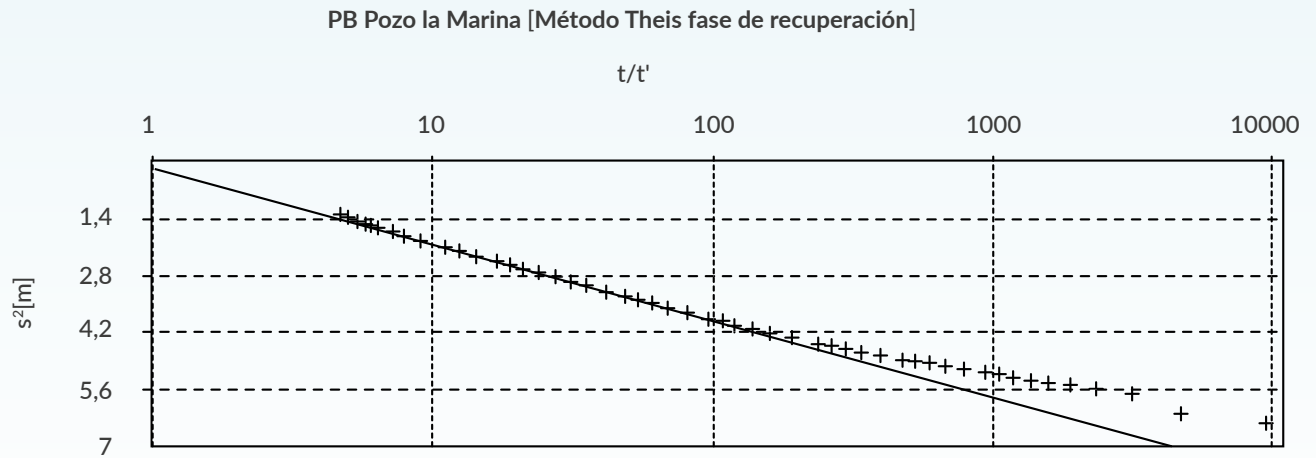
analizada mediante un método gráfico o manual. En el mercado se pueden encontrar varios programas que permiten ampliar el análisis y presentación de las pruebas de bombeo; el *Aquifer test* es el más utilizado, junto con otros cuyo uso depende de los recursos financieros disponibles (Figura 9-26).

Para cada tipo de acuífero (libre, semiconfinado o confinado) se han construido desarrollos matemáticos simples y modelos interpretativos (como el Método de Thiem para acuífero confinado, Método de Dupuit para acuífero libre, Método De Glee para acuífero semiconfinado), pueden ser consultados en cualquier texto de hidrogeología o en documentos especializados en este tema.

Dado que las características hidráulicas de un acuífero no cambian de manera significativa en el tiempo, estas pruebas pueden espaciarse para ser actualizadas por lo menos una vez cada cinco años, aunque deben ser siempre obligatorias en la fase de perforación de los pozos. Las pruebas escalonadas deben hacerse con mayor frecuencia pues brindan información sobre las condiciones del pozo.



Transmisividad [*m*²/*min*]: 1.25×10^{-1}



Transmisividad $1,38E + 2 \text{ m}^2/\text{d}$
 Conductividad $2,34E + 0 \text{ m/d}$

Figura 9-26. Arriba: Interpretación método Cooper-Jacob fase de bombeo a caudal constante del pozo, Batallón Cisneros. Abajo: Interpretación método Theis fase de recuperación pozo, La Marina 2011. Fuente: (SGC, 2016b).



Medición de niveles piezométricos.
■ Ana María Vesga

9.2 Monitoreo de calidad

La composición química de las aguas subterráneas puede aportar información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional, principalmente del flujo subterráneo. Sin embargo, acceder a este tipo de información presenta obstáculos debido a que las aguas subterráneas son más complejas y menos accesibles que los cuerpos de agua superficial.

En este sentido, el monitoreo de calidad de aguas subterráneas juega un papel importante al momento de realizar cualquier programa de monitoreo. Se deben precisar claramente los objetivos del mismo, los cuales pueden estar enfocados en (VRBA, 1998), (Candela, 2016):

- Establecer una línea base de calidad natural.
- Conocer el sistema de flujo (recarga, direcciones de flujo, tiempo de residencia, balance) e identificar los principales procesos geoquímicos que tienen lugar.
- Determinar cambios en la calidad de las aguas subterráneas en función del tiempo.
- Identificar tendencias en las concentraciones de los componentes de las aguas subterráneas.
- Proporcionar una alerta temprana sobre la calidad del agua subterránea de los impactos antrópicos y de las prácticas de manejo del suelo.
- Establecer relaciones causa-efecto, de acuerdo con los datos geoquímicos.
- La definición de estrategias de administración del recurso, en cuanto a protección y prevención.
- El planteamiento o redefinición de normas técnicas de calidad del agua.

El muestreo debe ser representativo, lo cual significa que los *resultados reflejen exactamente la*

condición de las aguas subterráneas en el acuífero o en un punto específico (Vargas & Bobadilla, s.f.). En este sentido, debe asegurarse que la muestra tomada no se deteriore ni se contamine antes de llegar al laboratorio para su respectivo análisis. Los elementos requeridos y las condiciones en que se realizará (envase, procedimiento y cuidados para la toma de la muestra, condiciones de traslado y conservación, etc.), deberán ser previamente revisados con el laboratorio encargado de realizar el análisis.

De igual manera son relevantes las características constructivas de la capacitación y la técnica de muestreo. El técnico que va a realizar el muestreo debe estar debidamente capacitado, cualificado y entrenado en la teoría y la práctica del muestreo específico, es responsable de poner en práctica el protocolo de muestreo. Cualquier desviación, con respecto al protocolo que él realice, debe quedar reflejada en los registros de campo.

9.2.1 Selección de puntos de monitoreo

Para el caso del monitoreo de la calidad del agua subterránea, la selección de puntos óptimos es más difícil y está condicionada por el propósito del muestreo, además de las características particulares del acuífero que se está muestreando; por ejemplo, la naturaleza del flujo de agua subterránea (si es intergranular o por fraccionamiento), el gradiente hidráulico y la dirección del flujo.

Además de considerar los criterios expuestos en la selección de puntos para un monitoreo de cantidad, se debe tener en cuenta que los puntos representen los cambios en la calidad de las aguas subterráneas.



Monitoreo de calidad.
 ■ CORPOGUAJIRA



Monitoreo de calidad.
 ■ CORALINA

9.2.1.1 Monitoreo de puntos para abastecimiento

Si se va a considerar un monitoreo para abastecimiento de agua (Figura 9-27), es recomendable monitorear algunos pozos alejados del sitio de extracción, con el fin de examinar las características fisicoquímicas y bacteriológicas del acuífero (ICONTEC, 1996b).

Si el objetivo es alertar sobre plumas de contaminación que puedan amenazar los campos de bombeo de agua potable o manantiales, se localizan pozos de monitoreo gradiente arriba, que sean capaces de detectar a tiempo alguna aproximación en el agua contaminada y así tomar las acciones de remediación necesarias (Foster et al., 2002).

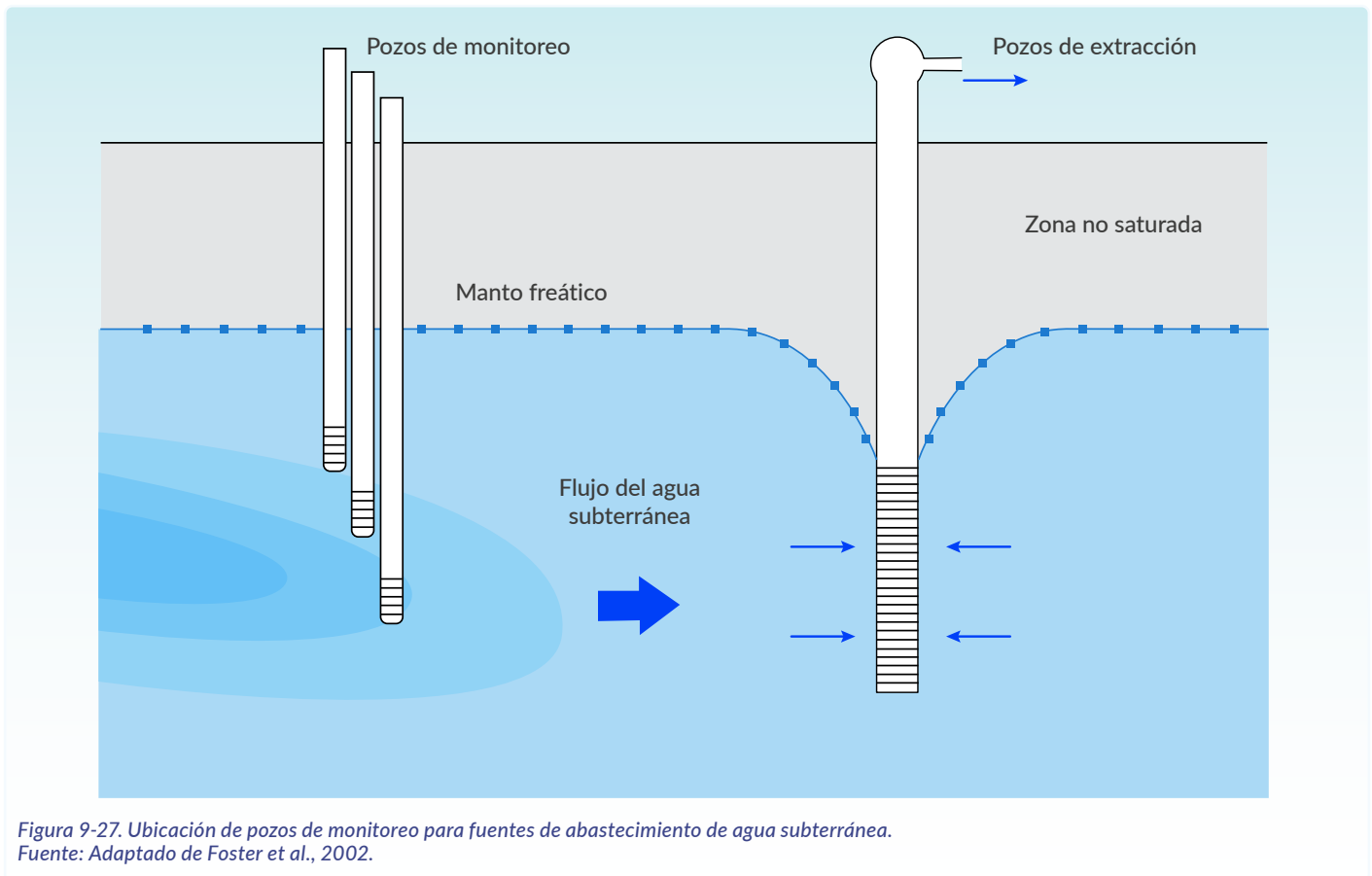


Figura 9-27. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de abastecimiento de agua subterránea.
Fuente: Adaptado de Foster et al., 2002.

9.2.1.2 Monitoreo de puntos de contaminación difusa de aguas subterráneas

Se deben escoger pozos ubicados en el área de interés, que representen las diferentes condiciones hidrogeológicas y de uso de la tierra, consideradas como particularmente vulnerables a contaminación.

Se recomienda monitorear en pozos de gran capacidad de producción o extracción, ya que pueden proveer muestras integradas de un gran volumen del acuífero. Sin embargo, en casos de contaminación de baja intensidad o contaminación localizada, el uso de este tipo de pozos puede reducir la contaminación a niveles por debajo del límite de detección analítica; en

estos casos, se recomienda el uso de pozos de menor capacidad de extracción (ICONTEC, 1996b).

9.2.1.3 Monitoreo de fuentes puntuales

Es preciso considerar la ubicación del sitio de contaminación en relación con la dirección de flujo del agua subterránea. Se recomienda instalar pozo para monitorear la calidad de agua bajo la fuente de contaminación (Figura 9-28), además de al menos un pozo de monitoreo con filtros en un intervalo estrecho de profundidad, inmediatamente encima de la tabla de agua, de forma que los contaminantes que son menos densos que el agua se puedan detectar fácilmente (Foster et al., 2002).

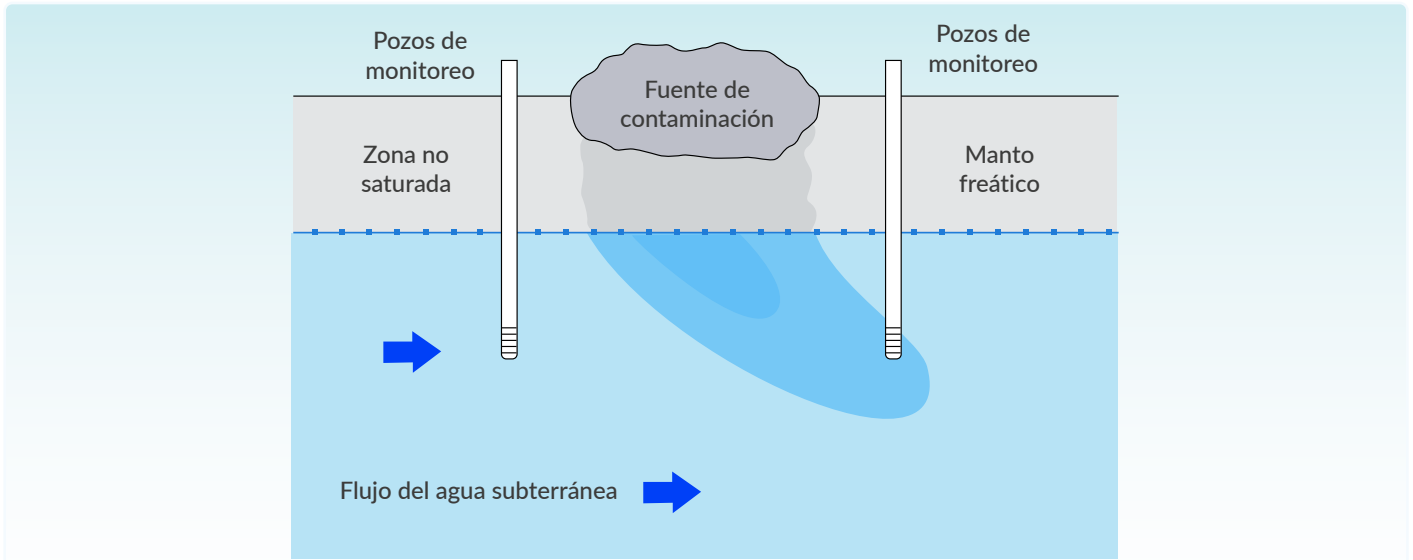


Figura 9-28. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster et al., 2002).

Se deben colocar puntos adicionales a distancias progresivas hacia abajo del gradiente hidráulico de la fuente de contaminación y tomar precauciones para el muestreo en un intervalo amplio de profundidades. También se debe considerar la colocación de uno o dos pozos de monitoreo hacia arriba del gradiente hidráulico de la fuente, para poder identificar la ex-

tensión del área de influencia de la contaminación (Figura 9-29). Estos pozos de monitoreo también sirven para estudios de control de calidad, ya que, mediante el procedimiento de muestreo, brindan información sobre el alcance de la contaminación potencial, en especial donde el análisis de trazas de material es importante (Foster et al., 2002).

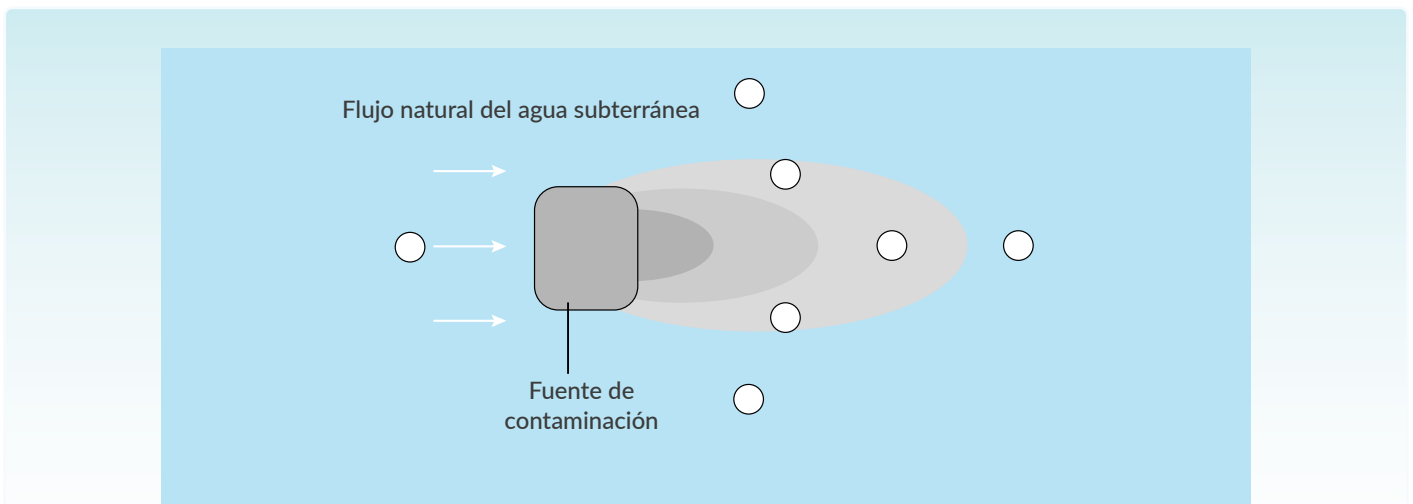


Figura 9-29. Ubicación de pozos de monitoreo para fuentes de contaminación puntuales. Fuente: (Foster et al., 2002).

9.2.2 Frecuencia de monitoreo

Para determinar la frecuencia de monitoreo de calidad se debe tener en cuenta el objetivo del monitoreo. Si lo que se busca es monitorear patrones de calidad del agua a largo tiempo, se puede sugerir una frecuencia mínima de monitoreo de una vez al año; si es el caso de monitoreos de vigilancia, en donde se espera tener una distribución de las características químicas, la frecuencia puede estar en un muestreo trimestral cuando sean redes pequeñas a cada cinco años para monitoreos más regionales (ACWI, 2009).

Sin embargo, estos valores no son fijos, pueden variar considerando que factores como el tipo de acuífero, flujos del agua subterránea, tasas de recarga, descenso en los niveles de agua subterránea, cambios en el uso de tierras y cambios climáticos pueden afectar la frecuencia de monitoreo de calidad (ACWI, 2009).

Auge (2006) recomienda que los muestreos se hagan al finalizar el período de exceso en el balance hídrico y al terminar el período de déficit. En áreas con uso del suelo agrícola es pertinente realizar muestreos en época de riego y en época de secano, para establecer si existen variaciones en la posición de la superficie freática y en la composición química del agua subterránea, derivada esta última, de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas.

La Tabla 9-3 sugiere algunas frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia, y cuando se cuente con un conocimiento previo del acuífero de interés. Estas frecuencias representan un punto de partida o recomendación y no deben ser consideradas como obligatorias, ya que, dependiendo de los objetivos del monitoreo de calidad, pueden adoptarse frecuencias alternativas que permitan un mejor entendimiento.



Medición de parámetros fisicoquímicos.
SIAM

Tabla 9-3. Frecuencias para el monitoreo de calidad del agua subterránea cuando se esté desarrollando monitoreo primario o de vigilancia.

Categoría de monitoreo	Tipo de acuífero	Características de flujo			
		Porosidad media	Porosidad media	Roca fracturada	Kast
		Pozo profundo	Pozo somero	Todos los pozos	Todos los pozos
Monitoreo de tendencia	Todo tipo de acuíferos, en toda la gama de conductividad hidráulica	Recomendado: anual	Recomendado: anual	Recomendado: anual	Recomendado: anual
Monitoreo de vigilancia	Libre				
	Baja recarga (< 5 in/año)	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio
	Alta recarga (> 5 in/año)	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Recomendado: anual, o por diseño del estudio	Dos veces por año
	Confinado				
	Baja conductividad hidráulica (< 200 pies/día)	Cada cinco años	Cada cinco años	Cada cinco años	Cada cinco años
	Alta conductividad hidráulica (> 200 pies/día)	Cada dos años	Cada dos años	Cada dos años	Cada dos años

Fuente: (ACWI, 2009).

En las normas ICONTEC se sugiere un muestreo mensual o quizás menos frecuente, cuando se está evaluando la calidad de las fuentes de agua potable, o para cualquier otro uso (ICONTEC, 1996b). En el caso de que se esté utilizando aguas subterráneas sin tratamiento, es necesario un muestreo más frecuente. Para el caso de plantas industriales generadoras de altas cargas contaminantes como curtiembres, papeleras, refinerías de hidrocarburos, textiles, lácteas, fincas con desarrollo pecuario, medicinales, agroquímicas, metalúrgicas, alimenticias, etc., las frecuencias son determinadas por el responsable de monitoreo.

En algunos casos particulares, el monitoreo temporal puede requerir una frecuencia diaria, horaria, de minutos y aún de segundos, aplicado a los casos en que es necesario establecer la incidencia del bombeo en la salinidad o en la composición bacteriológica del agua subterránea, en mediciones para verificar el funcionamiento hidráulico de la perforación y en la detección de trazadores para determinar la velocidad de flujo (Foster et al., 2002).

Si se escoge una frecuencia al inicio del programa de monitoreo, esta puede variar en el progreso del mismo, si se observan un aumento o disminución de la velocidad de los cambios en la calidad, para lo que debe ampliar o reducir la frecuencia de monitoreo.

9.2.3 Tipo de muestreo

Existen dos métodos de muestreo que pueden emplearse para obtener una muestra representativa de aguas subterráneas: muestreo por bombeo y el muestreo a profundidad (IDEAM, 2013b).



Monitoreo de calidad.
CVC

9.2.3.1 Muestreo por bombeo

Consiste en extraer la muestra del pozo, utilizando una bomba. Este método puede ser utilizado cuando se requieren muestras de una sola unidad acuífera que darán una calidad de agua subterránea uniforme y cuando se necesite una muestra vertical compuesta, de composición promedio, como puede ser el caso de muestras extraídas de un pozo para consumo potable.

Las muestras no se deben recoger de pozos de bombeo hasta que haya pasado el tiempo suficiente para retirar la columna de agua remanente del pozo y garantizar que el agua se esté sacando directo del acuífero.

9.2.3.2 Muestreo a profundidad

Consiste en hacer bajar un dispositivo de muestreo por el interior del pozo, dejar que se llene con agua a una profundidad conocida, y recuperar la muestra para transferirla a un recipiente apropiado, cuando sea necesario. Este método normalmente es adecuado solo para uso en pozos de monitoreo que no se bombean (pozos de monitoreo como piezómetros), aunque las muestras de profundidad se pueden recoger de los pozos durante el bombeo, si hay acceso libre por la bomba, con un tubo instalado para este propósito.



Muestreo con bailer.
CORPOCALDAS

9.2.3.3 Otros métodos de muestreo

Cuando los métodos 9.2.3.1 *Muestreo por bombeo* y 9.2.3.2 *Muestreo a profundidad* no se puedan utilizar, se recomienda tomar muestras de puntos discretos en el acuífero mediante diferentes dispositivos de muestreo en el sitio. Estos incluyen copas porosas o piezómetros puntuales de los cuales se extrae agua por vacío o desplazamiento de gas. Se pueden instalar varios instrumentos en un solo pozo de monitoreo y algunos son adecuados para uso en zonas insaturadas. Se pueden también tomar muestras de profundidades específicas para el muestreo de agua intersticial. Este método comprende extracción de agua (usualmente por centrifugación) de muestras de suelo o de roca obtenidas mediante métodos especiales de perforación. Este es el medio más efectivo para cuantificar las variaciones verticales en la calidad y también es un método muy efectivo para el muestreo de zonas insaturadas.

Sin embargo, para monitoreo periódico, tiene la desventaja de requerir perforación repetida y por esto es costoso. Además, se puede estar liberando agua que normalmente no se puede retirar del acuífero en condiciones naturales, por lo tanto, esta técnica solo debe utilizarse cuando la recomiende un especialista en hidrogeología.

9.2.3.4 Mediciones in situ

Es necesario la medición de parámetros in situ, la cual debe realizarse antes o en el momento después de la toma de muestras (Dirección Nacional de Medio Ambiente [DINAMA], 2004), (Figura 9-30).

- pH.
- Potencial redox.
- Oxígeno disuelto.
- Conductividad eléctrica.
- Temperatura.
- Alcalinidad.



Figura 9-30. Medición de parámetros in situ y toma de muestras en un manantial-CORPOCESAR.

Para este tipo de mediciones, se recomienda que el pozo sea bombeado hasta que se renueve el agua almacenada en su entorno. Como no hay un volumen específico de agua bombeada que asegure la representatividad de la muestra extraída, en muchos casos, será aconsejable apoyarse en mediciones continuas hasta que los parámetros sean estables, lo que indica que se ha renovado el agua almacenada tanto en el pozo como en sus inmediaciones.

9.2.3.5 Parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Para una selección de parámetros asociados a la calidad, se debe considerar la finalidad de la red y los recursos económicos que se tengan en el programa de monitoreo. Normalmente la selección de los parámetros por analizar estará impuesta por la interacción entre (Foster & Gomes, 1989):

- El uso principal de las aguas subterráneas.
- La posibilidad que los parámetros se encuentran presentes en concentraciones problemáticas como resultado del régimen hidrogeoquímico natural y/o el carácter de cualquier carga contaminante que está siendo descargada al subsuelo.

En la mayoría de los casos, el análisis para la selección se concentra en las principales especies de iones. Según Uil et al., (1999), los metales pesados y sustancias orgánicas son importantes en programas de monitoreo sobre la contaminación de puntos como vertederos y sitios contaminados. Por otro lado, los metales pesados y pesticidas son más importantes para la contaminación difusa por la agricultura.

En la Tabla 9-4, se presenta la lista de parámetros sugeridos para una red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas:

Tabla 9-4. Lista de parámetros sugeridos para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea.

Grupo	Parámetro
Parámetros descriptivos	Temperatura, pH, OD, CE
Iones mayoritarios	Ca, Mg, Na, K, HCO ₃ , Cl, SO ₄ , PO ₄ , NH ₄ , NO ₃ , NO ₂ , Carbono orgánico total.
Parámetros adicionales	La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada.
Metales pesados	Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr. La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada.
Sustancias orgánicas	Hidrocarburos totales, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados, fenoles, clorofenoles. La elección depende particularmente de la fuente de contaminación local identificada.
Pesticidas	La elección depende de las costumbres locales, el uso del suelo y las ocurrencias observadas en el agua subterránea.
Microbiológico	Coliformes totales, coliformes fecales.

Fuente: (Uil et al., 1999).

9.2.4 Materiales y equipos

En este aparte se especifican los materiales y

equipos de uso extendido para monitoreo de calidad de aguas subterráneas.



Medición de multiparámetros.
 ■ CORPOGUAJIRA

9.2.4.1 Equipos para mediciones in situ

Para la medición de parámetros in situ como pH, potencial redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica, se debe utilizar un instrumento que se introduzca dentro del pozo o dentro de una celda de flujo continuo, colocada en la línea de conducción, de forma que el agua no entre en contacto con el aire previo al pasaje a través de los sensores. Estos equipos son conocidos como sensores multiparámetros que con un visualizador digital de datos (LCD por sus siglas en

inglés) permiten ver las lecturas al instante (Figura 9-31). Usualmente son de operación sencilla, dependiendo de la marca y modelo pueden programarse y obtener datos con un PC o laptop a través de una interface infrarroja digital. Varía también, la capacidad de memoria y operatividad del software.

La alcalinidad debe determinarse en sitio, con el método de la titulación volumétrica con bureta o la potenciométrica. Algunos de los medidores multiparamétricos miden la alcalinidad.



Figura 9-31. Izquierda: Medidor multiparámetros de bolsillo.

Fuente: (Hanna Instruments, 2019).

Derecha: Sonda multiparamétrica que mide Temperatura, Conductividad, pH/ORP, Oxígeno Disuelto (LDO), Turbidez, Profundidad, entre otros.

Fuente: (OTT, 2019).

9.2.4.2 Equipos para medición de parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Para la medición de parámetros físico-químicos y bacteriológicos es necesario la extracción de agua en pozos de observación, para lo cual pueden emplearse dos métodos de muestreo: el primero es utilizando bombas que extraen el agua representativa del acuífero a través del revestimiento para ser recolectadas en envases previamente condicionados para el muestreo; el segundo es coleccionar una muestra directa de la perforación por medio de instrumentos como desagües-bailers, cuando no es posible realizar un bombeo.

A continuación, se describen algunos de los instrumentos utilizados para el muestreo de calidad de

aguas subterráneas; el uso de algunos de estos depende de los objetivos y de los costos planteados en el programa de monitoreo.

Bombas de succión

Existen en el mercado varios modelos de bombas de succión, sin embargo, se presentan algunos instrumentos como lo son: bombas peristálticas, bombas eléctricas sumergibles o bombas tipo-bladder (vejiga) las cuales son usualmente utilizadas para muestreos de aguas subterráneas.

- **Bombas peristálticas**

Están diseñadas para uso en terreno con un diseño liviano y compacto, son ideales para remoción de muestras en pozos poco profundos (4 a 10 m). Estas bombas operan por succión, permiten un bombeo al vacío o recuperación de líquidos o gases

por presión; su operación mecánica utiliza rodillos de rotación, crean un vacío que desplaza la columna de agua o gas en la dirección deseada (velocidad variable y reversible) haciendo que la muestra solo entre en

contacto con la manguera, lo que permite una integridad de la muestra (Figura 9-32, Figura 9-33). Algunas permiten una fácil conexión a casi cualquier fuente de poder; su uso es bastante práctico.



Figura 9-32. Bomba peristáltica.
Fuente: (Geotech Environmental Equipment, 2021)

Estas bombas pueden presentar una limitación ya que no pueden subir el agua desde ciertas profundidades, o si el objetivo es examinar el contenido de gases disueltos en el agua subterránea, su uso no es recomendado (ICONTEC, 1996b). Un bombeo excesivo puede ocasionar descensos pronunciados, con un

flujo turbulento sin permitir muestras representativas ya que puede originarse volatilización, oxidación o precipitación de contaminantes, además de ocasionar que se extraiga agua turbia y que se pueda alterar la dirección del movimiento de algún contaminante en caso de presentarse.



Figura 9-33. Ejemplo de uso de una bomba peristáltica.
Fuente: (Solinst, 2017).

- **Bombas eléctricas sumergibles**

Su uso es el más recomendado, son útiles cuando se requiere de un purgado de alto caudal y muestreo de bajo caudal. Son muy confiables y proporcionan tasas de muestreo continuas en periodos de tiempo extendidos

(Figura 9-34). Tienen una capacidad para muestrear a profundidades de 85 metros (280 pies) o más y son suficientemente resistentes para muestreo a largo plazo (Instrumentos del Sur S. A., 2017). La bomba se alimenta a baja tensión, lo que hace que sea segura de usar.



Se pueden encontrar una gama de bombas de plástico (Figura 9-35) y bombas en acero inoxidable, con una amplia gama de diámetros, que cuentan con un cable eléctrico para medida de bombeo máximo

y de doble conector de batería (algunas pueden ser conectadas al vehículo), además de contar con un regulador de caudal.



Figura 9-35. Bomba eléctrica sumergible de plástico.
Fuente: (Envirotechnics, 2021).

• **Bombas tipo-bladder (vejiga)**

Útiles cuando las muestras se deben tomar de pozos de poco diámetro, donde es imposible el uso de bombas sumergibles. Son bombas con membrana que se sumergen dentro del agua hasta el nivel de muestreo, y por medio de una presión hidrostática

permite que el agua de formación ingrese a la cámara central de teflón (la vejiga) a través del filtro de admisión y llene hasta el nivel estático (Figura 9-36). En la superficie un panel de control mide los ciclos de presión y depresión, los cuales son ajustables.



Figura 9-36. Izquierda. Bomba de muestreo de vejiga-bladder. Derecha: Bomba de vejiga de acero inoxidable para monitoreo de calidad y contaminación en aguas subterráneas. Fuente: (Envirotecnics, 2021) (Geotech Environmental Equipment, 2021)

Su funcionamiento se rige, cuando se aplica aire o gas comprimido a la línea de impulsión, presuriza el espacio alrededor de la vejiga, haciendo que colapse y empuje el agua hacia arriba dentro de la línea de muestra. Las válvulas de retención aseguran

que el agua no vuelva a fluir a través de la bomba o dentro de la formación. Estos ciclos se repiten y proporcionan un flujo de agua constante hacia arriba de la línea de muestra sin eliminar los compuestos volátiles (Figura 9-37).



Figura 9-37. Funcionamiento de la bomba vejiga. Fuente: (Solinst, 2021).

- **Bombas inerciales**

Son también muy utilizadas ya que son adecuadas para el purgado y muestreo. Son simples y confiables y ofrecen una opción efectiva de bajo costo. La bomba consiste de una manguera con una válvula de piso atornillada en la parte inferior. Se opera fácil de manera manual a profundidades

someras o con dispositivo para bombear, el cual al ser bajado dentro del pozo permite la entrada de un volumen de agua en la manguera que es retenido al cerrarse la válvula cuando se vuelve a subir. Esta operación permite que eventualmente el agua suba por la manguera hasta llegar a superficie (Solinst, 2021), (Figura 9-38).



Figura 9-38. Izquierda: Bomba inercial. Derecha: Mecanismo de operación de la bomba inercial. Fuente: (Solinst, 2021)

Bailers

Son una solución eficiente, rápida y conveniente para muestreos manuales sin perjudicar la calidad y representatividad de la muestra. Estos muestreadores fabricados ya sea en acero inoxidable o en plásticos (algunos biodegradables), (Figura 9-39), pueden reco-

ger la muestra en la perforación, cuando no es posible realizar un bombeo.

El muestreador actúa como una botella pesada (contenedor abierto) con una válvula de retención en la parte inferior y un asa en la parte superior, que es bajado por el pozo para tomar la muestra.



Figura 9-39. Tipos de bailers para muestreo de agua subterránea. Izquierda: Bailers en acero inoxidable. Derecha: Bailers en plástico. Fuente: (Envirotechnics, 2021)

Para recuperar una muestra de agua de un pozo se hace por medio de un cable de anclaje conectado a la manija en la parte superior del desagüe, el cual permite que este sea bajado en el pozo donde hace contacto con el agua subterránea (Figura 9-40). Posee unas válvulas de control que evitan que el agua a diferentes profundidades se mezcle con la muestra durante la recuperación. El peso del desagüe hace que este comience a sumergirse en el líquido. La presión

hidrostática del fluido empuja para arriba la válvula de retención (generalmente una válvula de bola) haciendo que la válvula abra y el agua fluya en el tubo; el agua que entra en un desagüe busca su propio nivel, por lo que un desagüe parcialmente sumergido es parcialmente llenado y un desagüe completamente sumergido es completamente llenado. Cuando el desagüe ha llenado su nivel sumergido, la válvula se cierra evitando que el agua escape.



Figura 9-40. Muestreo en pozo profundo Internado Aremasain-Riohacha utilizando un bailer-CORPOGUAJIRA.

Muestreadores discretos

Permiten obtener muestras por debajo de napas flotantes, sin necesidad de purgar (Figura 9-41). El muestreador se presuriza con una bomba manual antes de ingresar al pozo. Al estar el sistema pre-

surizado no fluye agua a través del muestreador cuando se dirige hacia abajo en el pozo. Cuando se alcanza el punto de muestreo, se libera la presión y el muestreador se llena con agua directamente de la zona de muestra (Solinst, 2021).



Figura 9-41. Muestreador de intervalo discretos.
Fuente: (Solinst, 2021)

Existen otros instrumentos que no son de uso extensivo, pero son útiles para monitoreos específicos tanto en zona saturada como no saturada. Entre estos se pueden encontrar:

Copas de succión para muestreo de agua del suelo-lisímetros

Permiten obtener información de calidad a diferentes profundidades, ya sea de la zona saturada

como la no saturada del acuífero a partir de muestreo intersticial, así mismo extrayendo el agua de muestras de roca de perforación por centrifugación o compresión por presión o por extracción de agua por vacío o desplazamiento de gas con el uso de copas porosas-lisímetros o piezómetros puntuales (Figura 9-42).



Figura 9-42. Copas de succión para muestreo de agua del suelo-lisímetros. Izquierda: Copas de succión (lisímetros) para el muestreo de agua del suelo para análisis químicos. Derecha: Muestreador de agua del suelo con almacenamiento en el vástago.
Fuente: (Instrumentos del Sur S. A., 2017).



Instalación de un lisímetro de succión.
 ▶ CVC

Estos lisímetros consisten en un sistema de vacío que permiten el muestreo de agua del suelo de la zona no saturada sobrepasando el potencial

agua del suelo. El sistema vacío es controlado con tensiómetros instalados en el suelo (Figura 9-43).

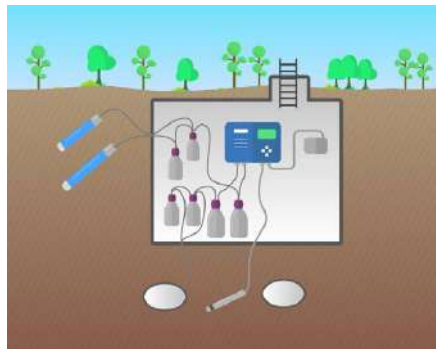


Figura 9-43. Sistemas de vacío para muestreo de agua del suelo-lisímetros.
 Fuente: (Instrumentos del Sur S. A., 2017).

Muestreadores multinivel

Son utilizados para muestrear los perfiles químicos de las aguas subterráneas, niveles de

agua y gases tanto en zonas saturadas como no saturadas (Figura 9-44).



Figura 9-44. Muestreadores multinivel que permiten el monitoreo de varias zonas en un sistema. Fuente: (Envirotecnics, 2021)

Estos permiten obtener datos en intervalos discretos aislados en varias profundidades de una única perforación. Son fáciles de usar y de bajo costo, con una instalación múltiple. Poseen flexibilidad de diseño en el campo, lo cual permite que el número de puertos de monitoreo, la ubicación de cada puerto y la estrategia de monitoreo sean definidas justo en el sitio (Solinst, 2021).

Piezómetros para hincar

Permiten la recolección de muestras y mediciones de agua subterránea o gases desde múltiples

puntos, monitoreo de tanques de almacenamiento subterráneo y como puntos de aspersión en una sola perforación, también proporcionan, de forma rápida, datos de alta resolución, generando perfiles verticales detallados. Son ideales para las investigaciones preliminares del sitio, suministran un método de bajo costo y con mínima alteración para determinar la existencia de contaminantes en perforaciones temporales. La punta del perfilador se conecta a la bomba peristáltica que enjuaga la punta del perfilador con agua desionizada durante la impulsión, para

evitar la contaminación cruzada y se revierte para obtener una muestra representativa. Esto permite una delineación detallada, rápida y económica de la pluma de contaminantes. Se pueden hincar con

martillo manual en terrenos blandos, o con martillo vibrador o con plataforma de perforación para profundidades mayores o terrenos más firmes (Solinst, 2017a), (Figura 9-45).



Figura 9-45. Tipos de piezómetros para hincar. Procedimiento de hincado de los piezómetros y toma de muestras. Fuente: (Solinst, 2021)

9.2.5 Procedimiento para la toma de datos

Se describen en este ítem los procedimientos utilizados para una adecuada toma de los datos.

9.2.5.1 Alistamiento

En la etapa previa a la salida de campo, se debe asegurar que los equipos se encuentren en buen estado y calibrados con anterioridad en caso de re-

querirse. Estas calibraciones deben hacerse periódicas con soluciones adecuadas, y en toda ocasión deben ser guardados en las soluciones recomendadas por el fabricante para preservar la integridad de los sensores y la calibración realizada.

En la Tabla 9-5, se indican las características recomendables para medidores, soluciones de calibración, periodicidad de calibración y puntos de lectura.



Calibración de equipos. SIAM

Tabla 9-5. Condiciones de calibración y uso de equipos portátiles.

Parámetro a medir	Periodicidad de calibración	Precisión de medidores y soluciones de calibración	Puntos de calibración
Oxígeno disuelto	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración.	< 0.1 mg/l	1
Cond. Eléctrica	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración.	< 1 ohm/cm	1
pH	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración.	0.1 a 0.01 unidades de pH	2 o 3
Eh (Potencial redox)	-Previo a cada campaña, en cada cambio de membrana, luego de 10 mediciones o ante un cambio brusco en valores. -Al final de la campaña se debe medir nuevamente un testigo de calibración.	<1mV.	1

Fuente: (DINAMA, 2004).

En el caso de utilizar equipos de medición como sondas, bombas, bailers, plantas eléctricas, etc., se debe, de igual manera, comprobar su correcto funcionamiento (pilas, cables, sensores, entre otros).

Toda actividad de calibración y/o funcionamiento de los equipos debe ser documentada. Se deben tener a la mano los manuales de uso de los equipos en caso de requerirse.

Se debe tener una lista de chequeo (Anexo 9-4) que permita preparar todos los elementos requeridos como:

- Medidores portátiles (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox y oxígeno disuelto).
- Celdas de circulación continua.
- Soluciones de calibración de equipos, agua destilada, reactivos, etc.
- Equipos de extracción y conducción de agua.

- Dispositivos de toma de muestras.
- Instrumental para filtrado.
- Elementos para medición de alcalinidad en campo.
- Envases para las muestras.
- GPS.
- Medidores de nivel piezométrico.
- Equipos para lavado y descontaminación del instrumental.
- Material de seguridad e higiene (guantes, lentes, cinta adhesiva, bolsas de plástico, etc.). Se deben tener presentes los requerimientos de cada muestra para el laboratorio.
- Formatos de captura de información.
- Libreta de campo.
- Información de las características del punto de muestreo.

9.2.5.2 Recipientes

Los recipientes utilizados deben ser de un material que no reaccione con la muestra, generalmente son de polietileno, polipropileno, policarbonato y vidrio, los cuales son los más recomendados. Los recipientes deben contar con tapa y/o contratapa que permitan un cierre hermético y su capacidad se debe definir en función de los requerimientos del laboratorio.

Para muestreo biológico se recomienda el uso de recipientes de vidrio opacos que eviten penetración de luz y no generen cambios en la composición fisicoquímica del agua.

Si se desean medir gases disueltos, se deben utilizar botellas de cuello ancho con tapón esmerilado y biselado para poder cerrar sin dejar ninguna burbuja de aire (Custodio & Llamas, 1983).

Cuando se realiza un muestreo para determinar compuestos orgánicos, se debe considerar que el material empleado en la construcción del pozo y en el equipo de muestreo sea en vidrio, acero inoxidable u otro material que no permita la contaminación de la muestra con compuesto orgánico (ICONTEC, 1996b).

En cualquier caso, el laboratorio recomendará el tipo o proporcionará los recipientes dependiendo del análisis.

9.2.5.3 Toma de muestras

Cuando se muestrea cualquier punto de captación de agua subterránea, estos deben estar adecuadamente identificados y ubicados con coordenadas y cota. En el pozo, se debe determinar el diámetro de la boca de pozo y la altura (respecto del punto de referencia), además de ser necesario conocer los detalles de construcción, para así saber la profundidad del acuífero o nivel del que se debe extraer la muestra (DINAMA, 2004).

Se debe considerar lo siguiente:

Purga del pozo

Se debe realizar una purga del pozo para eliminar el agua estancada dentro de la perforación (la cual puede ser de composición química diferente a la contenida en el acuífero), la presencia de aire sobre la columna de agua (que genera un gradiente de concentración de oxígeno y CO₂ disuelto), la pérdida de gases por la tubería, la lixiviación desde la superficie y cambios químicos producidos por el sello de arcillas o el material del filtro y prefiltro (DINAMA, 2004).

Se debe realizar un bombeo continuo y medir parámetros como el pH, temperatura y conductividad eléctrica, seguidos por potencial redox, oxígeno disuelto y turbiedad, hasta que estos se estabilicen, lo que indica el final de la purga. En estos casos, las muestras no se deben tomar hasta que dejen de observarse variaciones significativas ($< \pm 10\%$ en términos de calidad -masa/unidad de volumen- o $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en términos de temperatura).

La Tabla 9-6, presenta los rangos de estabilización para cada parámetro, cuando al menos se han realizado tres lecturas consecutivas con más de dos minutos de separación o por la mitad del volumen almacenado en el pozo.



Purga de pozo antes de realizar la toma de muestra de agua subterránea.  CORPOGUAJIRA

Tabla 9-6. Criterios usuales para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros.

Parámetro a medir	Criterio de finalización de purga
Oxígeno disuelto	+/-0.2 mg/l.
Conductividad eléctrica	+/-5.0 $\mu\Omega$ /cm si los valores son inferiores a 1000 Ω /cm. +/-10.0 $\mu\Omega$ /cm si los valores son superiores a 1000 Ω /cm.
PH	+/-0.1 unidad de Ph.
Temperatura	+/-0.1 °C.
Turbiedad	< 5 NTU (Unidades Nefelométricas de turbiedad). (Requerido para metales en muestras sin filtrar; recomendado para compuestos adsorbidos: opcional para otros compuestos o elementos).
Eh (Potencial redox)	+/-30 mV.

Fuente: (DINAMA, 2004).

Se recomienda que deben eliminarse por lo menos tres volúmenes de la cubierta de agua antes de muestreo (EPA, 2015). A menudo, la estabilidad se alcanza antes de la purga del pozo de los tres volúmenes, reduciendo así el volumen de residuos a ser eliminados. Si, por el contrario, después de que se han retirado los tres volúmenes del pozo, los parámetros químicos no se han estabilizado según los criterios anteriores, deberán eliminarse volúmenes adicionales. Si los parámetros no se han estabilizado en cinco volúmenes, es a discreción del líder del proyecto el no recoger una muestra o continuar purgando (Livni et al., 2015).

El bombeo excesivo puede disminuir o aumentar las concentraciones de contaminantes, aumentar la turbidez y generar grandes cantidades de aguas residuales (EPA, 2015). Para este caso, se recomienda que el bombeo provoque pequeños descensos del nivel del agua para que se generen las mínimas alteraciones en el flujo subterráneo.

En el caso de pozos con un caudal bajo, es inevitable que esta extracción de volúmenes genere un descenso en los niveles. En estos casos es recomendable extraer el volumen almacenado por encima de la zona filtrante y esperar la recuperación del pozo al menos una vez antes del muestreo (DINAMA, 2004).

Se debe tener en cuenta que la velocidad de purga debe ser a una velocidad y mediante un método que no cause aireación de la columna de agua, no debe exceder la velocidad a la que se completó el desarrollo del pozo (EPA, 2015).

Durante la purga, las mediciones de nivel de agua pueden tomarse regularmente a intervalos de 15 a 30 segundos, los cuales pueden utilizarse para calcular la transmisividad del acuífero y otras características hidráulicas (Livni et al., 2015).

Todos los datos deben ser documentados en el formato respectivo (Anexo 9-3).

Medición de parámetros in situ

La medición de parámetros in situ debe realizarse antes o inmediatamente después de la toma de muestra. La muestra de agua debe ser colada en un recipiente, el cual debe estar previamente lavado, y después debe ser introducido el medidor multiparamétrico para el registro de los parámetros pH, temperatura, conductividad eléctrica, alcalinidad, potencial redox y oxígeno disuelto (Figura 9-46).

Una vez registrados los parámetros de la muestra, se deben consignar los datos en el formato correspondiente (Anexo 9-3).



Figura 9-46. Medición in situ con un medidor multiparámetro en un pozo profundo de extracción.
Fuente: (CORMACARENA & SIAM S. A., 2016).

Tras cada medida se lavan los electrodos con agua desionizada-destilada, guardándolos convenientemente cerrados y apagados hasta nueva medida.

Recolección de la muestra

Una vez se ha completado la purga y se han preparado los recipientes limpios de laboratorio para las muestras, se puede proceder al muestreo en función de los elementos o parámetros por determinar.

La escogencia del método de muestreo depende del diseño que se desarrolle en la etapa de planificación del monitoreo, en donde se debe tener en cuenta el tipo de pozo, nivel estático del agua, características físicas del pozo, química del agua subterránea y los parámetros que desea estudiar; lo importante es poder tomar una muestra representativa que tipifique las características del agua de interés (Figura 9-47).

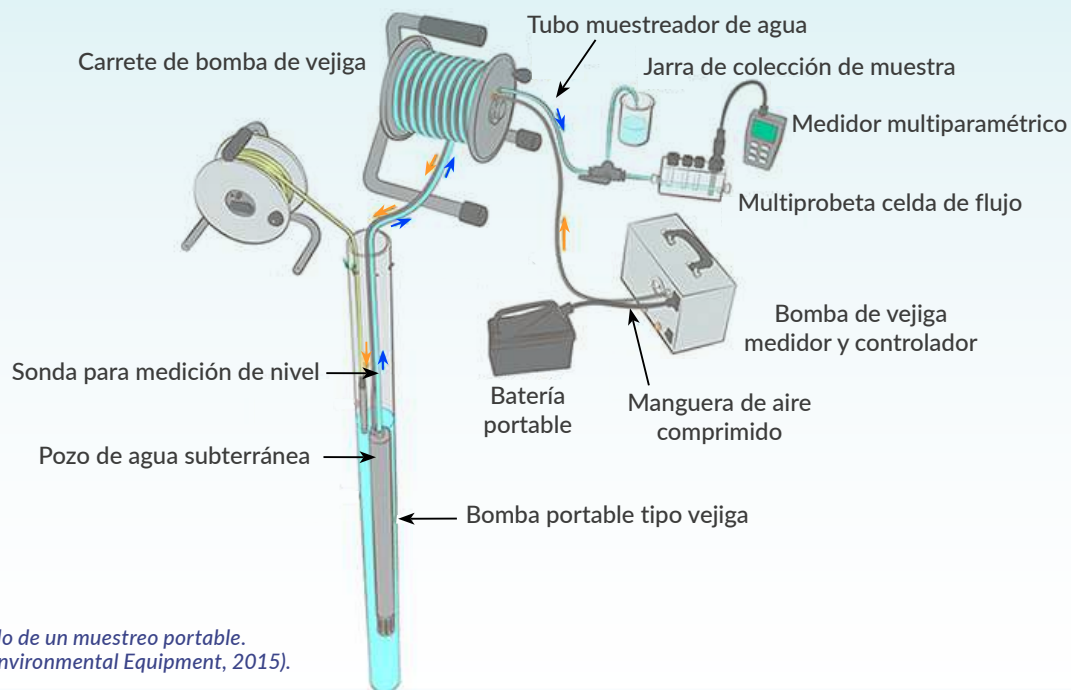


Figura 9-47. Ejemplo de un muestreo portable.
Fuente: (Geotech Environmental Equipment, 2015).



Figura 9-48. Medición de parámetros in situ con medidores multiparamétricos-CORPOCALDAS.

La muestra puede ser tomada en un muestreador que capta el agua de forma directa del pozo o aljibe, o a partir de una bomba de succión que permite recoger el agua en un recipiente o balde (Figura 9-49).

Para cada caso, se recomienda:

- **Uso de muestreador**

Se recomienda no tomar las muestras en los intervalos con tubería lisa, ya que en este punto el agua no es representativa de la profundidad a la que se activa el dispositivo de muestreo. Tampoco en la sección de filtros, debido a que los flujos naturales o inducidos dentro de la perforación pueden dar origen a muestras inciertas (ICONTEC, 1996b).

- **Uso de una bomba de succión**

La bomba debe colocarse próxima a la parte ranurada, o frente a la zona de aporte con el objetivo de minimizar la re suspensión de los sedimentos que se encuentran en el fondo del pozo (DINAMA, 2004).



Figura 9-49. Muestreo en pozos profundos utilizando un bailer-CORALINA.



Si la captación está equipada y no es posible el muestreo en la boca del sondeo, ni la introducción de un sistema toma-muestras, el agua se recoge del grifo más cercano al sondeo, antes de pasar por cualquier sistema de cloración. La muestra es por tanto

representativa del agua extraída de la captación, pero no necesariamente de la perteneciente a un determinado nivel o profundidad de toma. El grifo no debe tener accesorios y debe ser esterilizado antes de recolectar la muestra por medio de una llama. El

material del tubo se debe seleccionar adecuadamente en relación con los requisitos de ensayo, por ejemplo, un tubo de cobre puede conducir a un incremento en la concentración de cobre en el agua y a una disminución en el conteo bacteriano. Es necesario que los diversos sistemas de distribución estén cla-

ramente identificados para reducir la incertidumbre en el muestreo (ICONTEC, 1995).

Si la bomba no está en funcionamiento cuando se va a tomar la muestra, basta con dejar correr el agua para desplazar la contenida en la tubería, tras su puesta en marcha (Maestro, 2016).



Esterilizado de tubería con fuego, antes de recolectar la muestra.
 ▶ CARSUCRE



Toma de muestra en la salida más cercana a la boca del pozo.
 ▶ CORPOCALDAS

Las muestras recolectadas pueden ser filtradas para separar las partículas suspendidas que pueden venir con el flujo, sin embargo, la decisión de utilizar el filtrado depende de los objetivos del muestreo, sin ser tomada como una operación fija en el programa ya que el uso de filtros puede quitar cualquier elemento o especie que se encuentre natural en el flujo del agua. Para la medición de cationes y aniones (IAEA, 2014),

recomienda que las muestras deben ser filtradas al momento de ser recolectadas. El filtro debe ser de membrana de 0.45 micras (o más pequeño) que está disponible en muchas configuraciones convenientes (por ejemplo, filtros de jeringa, vacío, barril, filtros de cartucho). En el caso de muestrear aguas muy turbias, se debe hacer uso de un prefiltro de (100-300 μm), el cual evita que se tapone el filtro de 0.45 μm .

En DINAMA (2004), se recomienda el uso de membranas preferiblemente de difluoruro de polivinilideno (DVDF), poliamida o acetato sobre porta filtro de policarbonato, las cuales deben ser enjuagadas previamente con agua destilada y ser cambiadas entre cada muestreo.

En la Tabla 9-7, se presentan algunas consideraciones para tener en cuenta al momento de realizar un muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea.

Tabla 9-7. Procedimientos para muestreo de parámetros de calidad del agua subterránea.

Parámetros	Procedimiento de muestreo
Iones mayores Cl, SO ₄ , F, Na, K	<ul style="list-style-type: none"> • Solamente filtro de 0.45 µm. • No acidificar.
Metales traza Fe, Mg, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, V, As, Mo, Se	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro sellado de 0.45 µm. • Acidificar (pH <2) (agregar unas gotas de ácido nítrico concentrado). • Evitar aireación por salpicado o por no llenar completamente el frasco de muestreo.
Especies de N NO ₃ , NH ₄ (NO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro sellado de 0.45 µm.
Microbiológicos TC, FC, FS	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones estériles. • Muestra no filtrada.
Equilibrio de carbonatos pH, HCO ₃ , Ca, Mg	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra no filtrada. • Ca/Mg muestra acidificada.
Estado del oxígeno Potencial- redox (Eh), Oxígeno Disuelto (OD)	<ul style="list-style-type: none"> • En celda de medición. • Evitar aireación. • Muestra no filtrada.
Orgánicos Contaminantes Orgánicos Persistentes- COP, Compuestos Orgánicos Volátiles-COV, Hidrocarburos- HC, ...	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra no filtrada. • Evitar la volatilización. • De preferencia absorción directa en cartuchos.

Fuente: (Tuinhof et al., 2006).



Equipo de filtrado compuesto de bomba de vacío y recipiente de filtrado.
 ■ Juliana Ossa- Ana María Vesga

Consideraciones en el llenado de muestras

Para una recolección de muestras de agua subterránea se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- ♦ Se deben etiquetar y referenciar las botellas antes de la toma de muestras, de preferencia con un rotulador resistente al agua, colocar un código sencillo, nombre del recolector, fecha y hora de muestreo, lugar y dirección del sitio de muestreo, técnica de preservación realizada, análisis requerido.
- ♦ Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.
- ♦ Purgar cada botella antes de tomar la muestra. Se debe usar solo el tipo de frasco recomendado para cada grupo o tipo de parámetros.
- ♦ La parte interna de los frascos de muestreo y tapas no deben ser tocados directamente con la mano. Para el muestreo se deben utilizar guantes de látex.
- ♦ Las botellas de muestras y réplicas se llenan hasta el cuello. Si se indica en la etiqueta de la botella, adicione el preservante indicado según lo recomendado por el laboratorio. En algunos casos las botellas ya traen contenido el preservante.
- ♦ Las botellas para adiciones se llenan inicialmente con casi la tercera parte de la capacidad o según recomendaciones del laboratorio, para luego agregar el adiciónado referenciado en la etiqueta y llenar la botella hasta el nivel del cuello.
- ♦ Tapar firmemente cada botella.
- ♦ Se recomienda para una validación del procedimiento de recolección, se manejen análisis de blancos, muestras adicionadas con niveles conocidos de analíticos.

- ♦ Si el laboratorio proporciona recipientes que contienen ya los componentes necesarios para la preservación de la muestra, basta con llenarlos, sin enjuague previo y rotularlos debidamente.
- ♦ Cada muestra deberá ser registrada en el *formato de cadena de custodia* (Anexo 9-5).

Limpieza del material

Todo el instrumental debe ser lavado con agua destilada o desionizada tras su uso en cada sitio. En todos los casos la limpieza y descontaminación se realiza de acuerdo con las condiciones dadas por el fabricante.

Según DINAMA (2004), la operación para el lavado o descontaminación del equipo utilizado puede realizarse de acuerdo con los siguientes métodos:

- **Cationes mayoritarios, aniones y elementos traza (antes y después del uso)**

- Lavado con ácido nítrico o clorhídrico, diluido al 30 %.
- Enjuagado 3 o 4 veces con agua destilada o desionizada.

- **Microbiológico**

Antes de usar:

- El recipiente por utilizar (que debe ser estéril) debe mantenerse cerrado hasta el muestreo y NO realizar enjuague previo a la toma.

Después de usar:

- Lavado con agua potable (dos veces).
- Lavado con alcohol 95 %, o con metanol (dos veces).
- Enjuagado con agua potable (tres veces) y agua desionizada (dos veces).

Para el caso de estar muestreando contaminantes orgánicos se recomienda el documento ASTM D5088 (90)-Standard Practice for Decontamination of Field Equip-

ment Used at Nonradioactive Waste Sites, que abarca las técnicas de descontaminación de equipos utilizados en el muestreo de suelos, gases del suelo, lodos, aguas superficiales y aguas subterráneas en sitios donde se muestrean desperdicios químicos (orgánicos e inorgánicos).

Con respecto a los frascos que son utilizados para guardar la muestra que será enviada para análisis, algunas recomendaciones en su preparación antes de ser llenados son:

- ♦ Estos deben ser lavados (incluida la tapa) con agua que contenga detergente, para remover el polvo y los residuos de los materiales de empaque, seguido por enjuague completo (dos veces) con agua de una calidad apropiada, preferible agua destilada.
- ♦ Se puede utilizar el detergente ALCONOX, el cual ha sido formulado en especial para ser “libre de

enjuague” virtualmente sin deposición de materiales removidos (y no deseados).

Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras

- ♦ Las muestras deben ser analizadas lo antes posible y tomar precauciones para que no se alteren ciertas características. Conviene evitar cambios en la temperatura y agitaciones o vibraciones.
- ♦ Las muestras deben ser preservadas según el análisis que se vaya a realizar, hasta que sean entregadas al laboratorio. Tabla 9-8, describe las técnicas de preservación dependiendo del tipo de preservante, el volumen requerido y el tiempo máximo que pueden durar almacenadas hasta el análisis.

Tabla 9-8. Volumen requerido, recipientes, técnicas de conservación recomendadas y tiempo máximo hasta el análisis para muestras de agua subterránea colectada.

Análisis	Preservante	Tipo de envase	Muestra ml	Tiempo máx. de preserv/
Alcalinidad (acidez)	Refrigeración	Vid/Plast	200	24 H
Cloruros	Refrigeración	Vid/Plast	250	
Colis Fecales/Totales	Refrigeración	Estéril		
Color	Refrigeración	Vid/Plast	100	48 H
Conductividad	Refrigeración	Vid/Plast	100	28 d
Dureza	Ac. Nítrico pH<2	Vid/Plast	100	6 m
Fenoles	H ₂ SO ₄ 2ml. Refrig.	Plástico	500	28 d
Fluoruro	No requiere	Plástico	100	28 d
Fósforo	HCl conc, refrig.			
Fósforo disuelto	Filtrac. Refrig.	Vidrio	100	48 H
Metales disueltos	Filtrac. HNO ₃ PH<2	Vid/Plast	100	6 m
N. Amoniaca	Ac. Sulfúrico pH<2	Vid/Plast	500	7d
N Total	Ac. Sulfúrico, pH<2	Vidrio	200	48 H

Análisis	Preservante	Tipo de envase	Muestra ml	Tiempo máx. de preserv/
Nitrato/Nitrito	H ₂ SO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid/Plast	100	48 H
Nitritos	Refrigeración	Vid/Plast	100	48 H
Oxígeno disuelto	Inmediato, H+	Vidrio	300	0,5 H
Grasas y aceites	Ac. Sulfúrico. pH.2	Vidrio	1000	28 d
HC	Refrigeración	Vidrio	1000	1 mes
Metales disueltos	Filtrac, HNO ₃ PH<2	Vid/Plast	100	6 m
N. Amoniacal-N total	Ac. Sulfúrico pH<2	Vid/Plast	500/200	7d
Nitrato-Nitrito	H ₂ SO ₄ PH<2, refrigerar	Vid/Plast	200	
Nitratos	Refrigeración	Vid/Plast	100	48 H
Nitritos	Refrigeración	Vid/Plast	100	48 H
pH	Refrigeración	Vid/Plast	100	0.5 a 2 H
Sílice	Refrigeración	Plástico	200	28 d
Sólidos	Refrigeración	Vid/Plast	200	7d
Sólidos totales	Refrigeración	Vid/Plast	500	7d
Sulfatos	Refrigeración	Vid/Plast	100	28 d
Sulfuros	NaOH ₅ %. 10 ml/100 ml	Plástico	100	
Turbiedad	Refrigeración	Vid/Plast	100	24 H

Fuente: (Vargas & Bobadilla, s.f.).

Varios laboratorios acreditados por el IDEAM¹¹, proporcionan recipientes que contienen ya los componentes necesarios para la preservación de la muestra, basta con llenarlos y rotularlos debidamente. Sin embargo, si se requiere de la adición de preservativos químicos, estos deben agregarse previamente al llenado de la

botella, durante o justo después según recomendaciones del laboratorio para prevenir alguna alteración en el contenido de la muestra. Hay que asegurarse que estos preservativos se preparen y suministren con exactitud.

- ♦ Se debe poner suficiente hielo para refrigerar las muestras de tal manera que se logre una temperatura de 4 °C (para períodos más largos, se recomienda congelar a -20 °C), evitar en todo caso que se rompa la cadena de frío (se debe evitar el uso de hielo seco ya que puede alterar el pH de

11. Lista de laboratorios acreditados por el IDEAM, Corte a 31 de diciembre de 2016. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/596001/6.+Listado+completo+laboratorios+Acreditados+a+31+de+marzo+de+2016.pdf/9947ca-de-e885-490a-9b53-7ff8b8409c4a>

las muestras, además de que las congela y puede causar la ruptura de los recipientes de vidrio).

- ♦ Se recomienda que las muestras sean refrigeradas en una nevera portátil, acomodarlas de forma vertical y separar las botellas de vidrio entre sí para evitar la ruptura de las mismas.
- ♦ Las muestras deben ser enviadas al laboratorio, asegurándose durante el envío y hasta completar la recepción en el laboratorio, se mantengan las condiciones de almacenamiento y refrigeración.

Los datos recolectados deben ser verificados y validados siguiendo las leyes fisicoquímicas y las reglas establecidas para comprobaciones generales, equilibrio iónico y otras validaciones adicionales (OMM, 2011). Este obligado ejercicio permite detectar deficiencias en el muestreo, errores instrumentales, a la vez que contribuye a reducir incertidumbres y dar confiabilidad a la información en términos de precisión y exactitud.



Figura 9-50. Muestreo de calidad para control de acuífero, proyecto CVC en áreas de aplicación de vinazas-Valle del Cauca. Fuente: (CVC, 2015).

Identificación de las muestras

Los recipientes de muestras deben estar marcados en forma clara y sin la menor ambigüedad. Es conveniente registrar todos los detalles pertinentes en el momento de recolectar las muestras y diligenciarlos

en el formato correspondiente (Anexo 9-5), (IDEAM, 2013b). Este corresponde al control de cadena de custodia de las muestras que se envíen al laboratorio.

La información básica que se debe incluir es la siguiente:

- ♦ Código de la muestra.
- ♦ Identificación del punto: lugar de muestreo y sus coordenadas.
- ♦ Fecha y hora en que se recogió la muestra.
- ♦ Nombre (o iniciales) de la persona que recogió la muestra.
- ♦ Naturaleza del acuífero y nivel medido de agua.
- ♦ Tipo de punto de muestreo; piezómetro, pozo, aljibe, manantial.
- ♦ Cualquier información descriptiva pertinente.
- ♦ Método de recolección de la muestra.
- ♦ Profundidad de muestreo.
- ♦ Apariencia de la muestra en el momento de la recolección (por ejemplo, color, claridad y olor).
- ♦ Resultados del análisis en el sitio (pH, conductividad, temperatura).
- ♦ Detalle de cualquier técnica de preservación empleada.
- ♦ Detalles de cualquier filtro que se haya utilizado en el sitio (por ejemplo, tamaño de los poros del filtro).
- ♦ Detalles de cualquier método de almacenamiento de las muestras que se haya empleado o requerido.

Precauciones de seguridad

Se recomienda desarrollar un plan de seguridad en donde se tengan en cuenta los riesgos que se puedan presentar en las labores del monitoreo. Debe haber al menos dos miembros de un equipo de muestreo para prestar atención a su pareja, su paradero, condición física, etc., y estar listos para ayudar si es necesario (Livni et al., 2015).

Al momento de muestrear se puede estar en contacto con sustancias peligrosas como químicos descontaminantes, sustancias tóxicas utilizadas para la reservación de muestras, a inhalación de gases contenidos en las tuberías de perforación, por lo que se recomienda el uso de guantes de látex, lentes de seguridad, mascarilla y botas, durante el muestreo. En caso de estar expuesto a algunas de las sustancias tóxicas, debe lavarse la piel o ropa inmediatamente se entre en contacto con estas. De igual forma hay que ser cuidadoso con los frascos de vidrio.

Se debe contar con impermeables para los muestreadores en caso de que haya probabilidad de lluvia, protección para el sol en caso de fuerte exposición y un equipo integral de primeros auxilios. El personal debe asegurarse de que se tengan en cuenta los requisitos de seguridad pertinentes y contar con las precauciones que se deben tener en dichas operaciones (ICONTEC, 1995).



Mediciones de calidad de un piezómetro, utilizando un muestreador bailer.
CORPOCALDAS



Monitoreo de isótopos ambientales en estación del Hospital Municipal, Municipio Anserma (Caldas).
CORPOCALDAS

10. Monitoreo isotópico

La hidrología isotópica se ha convertido en las últimas décadas en una herramienta muy robusta para la validación de otras técnicas hidrológicas e hidrogeológicas, permite la solución de problemas relacionados con la calidad del agua, interconexiones hidráulicas, interacción agua superficial-agua subterránea, mezclas de agua, profundidad de circulación, o localización de zonas de recargas, y de fuentes de contaminación. También es común en la estimación de la relación de la climatología local-regional a diferentes escalas de tiempo para afinar los modelos de circulación atmosférica y últimamente en estudios de cambio climático.

Su uso depende del carácter específico de los isótopos, que pueden ser estables o radioactivos y aplicarse como trazadores en el ciclo hidrológico. Debido a que las moléculas de agua tienen una huella dactilar única, es posible rastrear el movimiento del agua por todo el ciclo hidrológico, desde cuando el vapor de agua se condensa en la atmósfera y se precipita, de cuando se infiltra o escurre en forma de escorrentía o de cuando regresa a la atmósfera por la evapotranspiración de las plantas (IAEA, 2019).

Los isótopos ambientales de mayor interés hidrológico son los isótopos estables deuterio (^2H), carbono-13 (^{13}C), oxígeno-18 (^{18}O) y los isótopos radiactivos como

tritio (^3H) y carbono-14 (^{14}C). Sin embargo, adicional se utilizan algunos isótopos como argón-39 (^{39}Ar), kriptón-81 (^{81}Kr), helio-4 (^4He), cloro-36 (^{36}Cl) y yodo-129 (^{129}I) para la estimación de edades, nitrógeno-15 (^{15}N) y el nitrógeno-14 (^{14}N) para determinar fuentes de contaminación, azufre-32 (^{32}S) y el azufre-34 (^{34}S) para diferenciación de fuentes. El isótopo radiactivo del radón (^{222}Rn), es utilizado para estudiar la mezcla a corto plazo del agua superficial y subterránea (Geyh, 2002).

Independiente del objetivo que se tenga, se busca que un programa de monitoreo de isótopos sea exitoso, lo que involucra principalmente que durante el proceso de muestreo, transporte y almacenamiento se evite el fraccionamiento isotópico a través de la evaporación o de pérdidas difusivas del vapor de agua, y/o el intercambio isotópico con los alrededores y con el material del envase. (Mook, 2002).

Se presentan a continuación algunas consideraciones para el monitoreo isotópico en aguas meteorológicas, superficiales y subterráneas, que pueden servir como referencia clave para todos los interesados directa o indirectamente en el uso de isótopos para la gestión del recurso hídrico.

Se debe considerar que la información descrita a continuación siguió los protocolos actuales de la IAEA y otros expertos, sin embargo, algunos métodos pueden diferir dependiendo del laboratorio escogido para realizar el análisis.

10.1 En aguas meteorológicas

Para determinar la evaluación de la función de entrada al sistema se analiza la composición isotópica de la precipitación, es por esto que para contar con esta información es necesario monitorear continuamente la composición isotópica de la lluvia.

Se presentan a continuación algunos procedimientos para el muestreo isotópico en la precipitación.



Totalizador isotópico ubicado en la estación climatológica Escuela Agrícola de Cáchira- Norte de Santander del IDEAM. Red Nacional de Isotopía.



Monitoreo de isótopos en la precipitación
■ CRQ



Monitoreo de isótopos en la precipitación-Estación La Española
■ CRQ

10.1.1 Selección de los puntos de monitoreo

Para la selección de los puntos de monitoreo, la OIEA/GNIP (2014), recomienda:

- Hay que considerar la accesibilidad y la disponibilidad del personal para realizar el muestreo.
- La instalación del colector debe hacerse, en lo posible, en terreno abierto o con vegetación natural, que no exceda los 0.5 metros. Son aceptables áreas de pastos y con pendientes de hasta $\pm 15\%$.

En un área 30 metros próximos al colector, no se debe presentar ningún cambio abrupto de pendiente.

- Se debe minimizar la influencia de estructuras o edificios cercanos al colector. Como regla general, en zonas con edificios, postes, árboles, etc., el colector deberá estar alejado de dichas estructuras una distancia igual a su altura (proyectando sobre el colector bajo un ángulo de no más de 45°), (Figura 10-1).

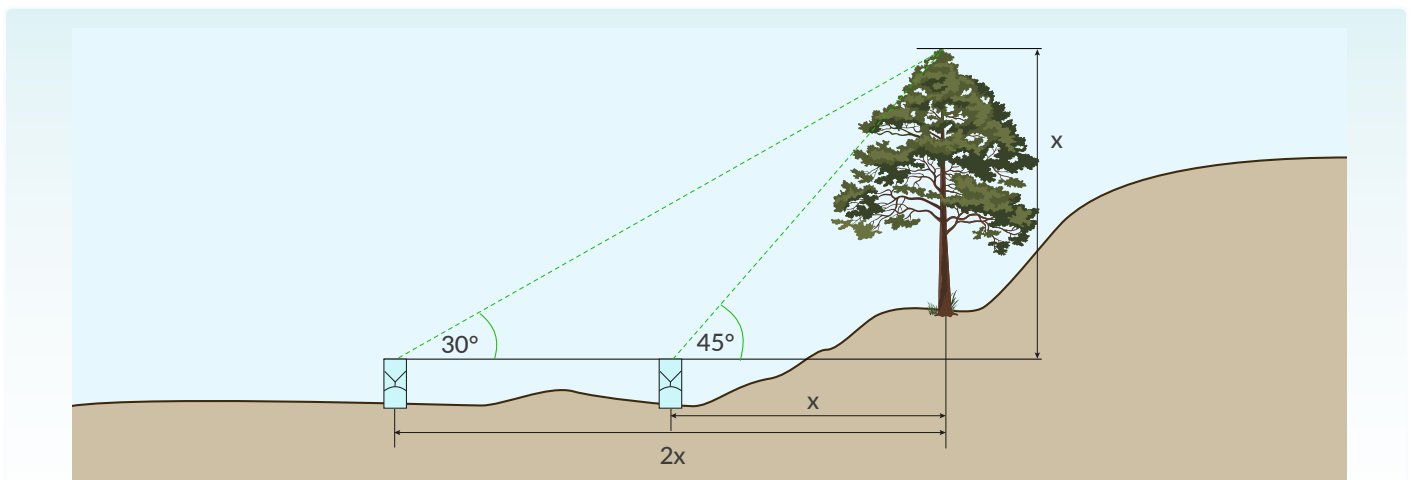


Figura 10-1. Ubicación del colector minimizando la influencia de estructuras cercanas.
Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

- En zonas muy despejadas, se debe instalar el dispositivo de tal manera que el orificio del embudo se encuentre a 30 centímetros aproximados por encima del suelo, con el propósito de reducir las turbulencias causadas por el viento. En zonas con estructuras o vegetación, el orificio del embudo deberá encontrarse aproximadamente entre 100-120 cm por encima del suelo (para reducir los efectos adversos de las estructuras cercanas).

10.1.2 Frecuencia de monitoreo

En caso de utilizarse un muestreo con base de eventos individuales, la precipitación será recogida inmediatamente después de un evento lluvioso (o por lo menos una vez cada día). Para la mayoría de estaciones se considera un muestreo acumulativo; el agua será acumulada durante el periodo definido de observación que por lo general será de un mes. Para algunos casos se considera el muestreo semanal, diario o por horas.

10.1.3 Tipo de mediciones

Se pueden realizar muestreos de agua lluvia en estado líquido o sólido con base de eventos individuales o muestreo acumulativo integrado. El muestreo por medio de eventos individuales significa que la precipitación será recogida inmediata después de un evento lluvioso (o por lo menos una vez cada día), mientras que el muestreo acumulativo significa que el agua será acumulada durante el periodo definido de observación (OIEA/GNIP, 2014).

Para el caso de muestreo en nieve, se realizan perforaciones con el objetivo de recuperar muestras para reconstruir la historia de la composición isotópica del ciclo anual de la lluvia. A partir de la cantidad supuesta de nieve caída, se va a dividir el perfil en el número de muestras elegidas, y se va a recuperar una

muestra media en cada parte al raspar el perfil con un cuchillo plástico o metálico (Franco & Pouyau, 2004).

Se debe contar con mediciones de la precipitación, condiciones atmosféricas como temperatura, presión de vapor y humedad relativa de la zona donde se encuentra el totalizador o pluviómetro; se puede considerar la estación meteorológica más cercana al totalizador que permita obtener esta información.

También, se deberá contar con las coordenadas, así como la altitud de la ubicación del totalizador o pluviómetro.

10.1.4 Materiales y equipos

Para muestreo de isótopos, se deben emplear totalizadores que eviten la evaporación de las muestras. Varios son los diseños de monitoreo de isótopos estables de agua lluvia empleados en el mundo, sin embargo, la selección de algún equipo de muestreo depende de las condiciones de accesibilidad y de la disponibilidad del personal para la recolección de las muestras; muchas de estas estaciones utilizan los pluviómetros y otras pueden emplear colectores diseñados conforme a las condiciones de cada región.

Se pueden construir de manera artesanal o se pueden conseguir en el mercado varias opciones, la opción que se escoja depende de los recursos económicos con que cuente el programa de monitoreo. Si se opta por la construcción, es necesario conocer la precipitación máxima que cae en la zona, ya que de esto dependen los tamaños del embudo y del recipiente de acumulación que se utilicen.

Según OIEA/GNIP (2014), para la selección de un colector de aguas lluvias es necesario considerar si el muestreo se va a realizar con base de eventos individuales o considerando un muestreo acumulativo integrado. Tomando como referente la GNIP,

que maneja sus propios protocolos de muestreo, se presentan algunos de los diseños de colectores que ellos proponen para muestreo isotópico de agua lluvia.

10.1.4.1 Diseño 1 - pluviómetro convencional

Para este instrumento, el agua lluvia debe ser recogida después de cada evento en un recipiente de

acumulación (Figura 10-2). La boca de captación del instrumento recibe la lluvia y las transmite a un tubo de medición o colector que está graduado. La escala de medición de este colector, permite identificar fácil la lluvia en milímetros.

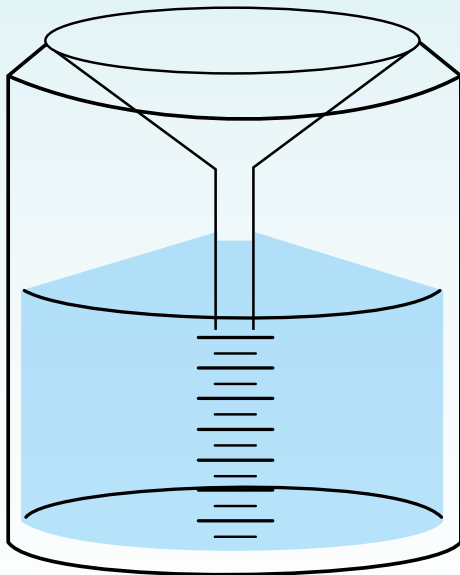


Figura 10-2. Pluviómetro convencional utilizado para muestreo con base de eventos o con transferencia diaria. Izquierda: Esquema del pluviómetro. Derecha: Ejemplo de un pluviómetro utilizado en la Estación Isotópica de Ibagué-Tolima. Red Nacional de Isotopía-IDEAM. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014)

Este tipo de instrumento requiere un manejo diario, por lo que se necesita de la disposición de un personal que transfiera el agua del pluviómetro a un tanque de acumulación después de cada evento de precipitación (o por lo menos una vez cada día).

Su uso presenta ventajas en cuanto a que normalmente se encuentran bien calibrados por los servicios meteorológicos nacionales, y que se puede medir

con facilidad la cantidad de agua lluvia sin equipo adicional. No obstante, se debe considerar que estos instrumentos requieren de un funcionario que maneje el instrumento y por ende esto aumenta los costos del programa, además, pueden presentar un riesgo a la evaporación si la muestra de lluvia no es recogida inmediatamente después de que ocurra el evento (Figura 10-3).



Figura 10-3. Muestreo isotópico de un pluviómetro colocado en el Parque Nacional Natural Los Nevados-IDEAM.

10.1.4.2 Diseño 2 - totalizador simple con embudo conectado al tanque de almacenamiento

Este diseño consiste en un totalizador de acumulación mensual, que permite valores muy bajos de evaporación, el cual recoge el agua lluvia en un recipiente a través de un embudo (Figura 10-4). Para evitar que se ensucie el recipiente de recolección, es común utilizar una pelota de tenis de mesa o una malla de acero inoxidable dentro del embudo, en tal caso, al comienzo de un evento lluvioso, la pelota flotará por

encima del agua y permitirá que el agua fluya desde el embudo al recipiente. Después del evento, con el embudo sin agua, la pelota retorna a su posición inicial (OIEA/GNIP, 2014).

Por su diseño, el colector presenta bajos costos en su mantenimiento; requiere de una medición de la cantidad de agua lluvia contenida en el equipo de manera volumétrica, por lo que es necesario que el sistema tenga una balanza o cilindro de medición graduado en el caso que no exista un pluviómetro cerca para conocer el valor de la precipitación mensual.

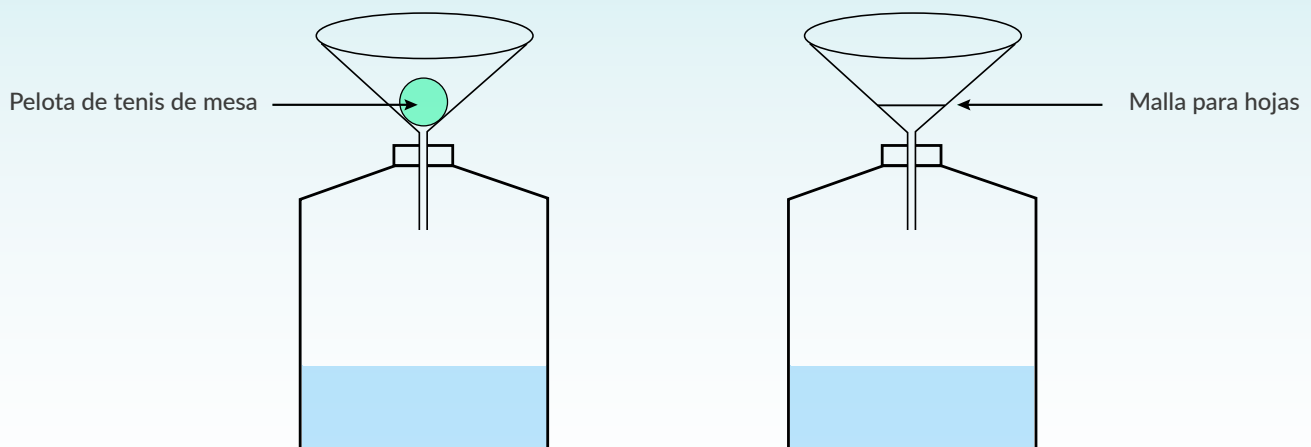


Figura 10-4. Totalizador simple. Izquierda: Pelota de tenis de mesa dentro del embudo. Derecha: Malla de acero inoxidable dentro del embudo. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

10.1.4.3 Diseño 3 - totalizador a base de parafina

Este diseño permite acumular precipitaciones hasta por un mes. Es similar al Diseño 2-totalizador simple con embudo conectado al tanque de almacenamiento ya que cuenta con un embudo que recolecta el agua y la acumula en un recipiente, la diferencia está en el uso de aceite de parafina ligera para evitar la evaporación de agua.

Según la OIEA/GNIP (2014), el aceite debe ser añadido al tanque recolector en una capa de espesor de unos 0.5 cm para que este flote encima del agua y prevenir su evaporación (Figura 10-5). No se deben

utilizar aceites aromáticos (por ejemplo aceite de bebé) ni aceites pesados que no floten encima del agua. En este caso hay que tener presente que el aceite de parafina puede comprometer los análisis de isótopos estables efectuados a través de espectroscopia láser, por lo que siempre se debe informar al laboratorio en caso de que se use.

Presenta bajos costos de mantenimiento. Tiene la necesidad de determinar la cantidad de agua lluvia de manera volumétrica en caso de que no haya un pluviómetro o pluviógrafo cerca. El embudo cuenta con una malla para prevenir la introducción de hojas, u otro tipo de basura.

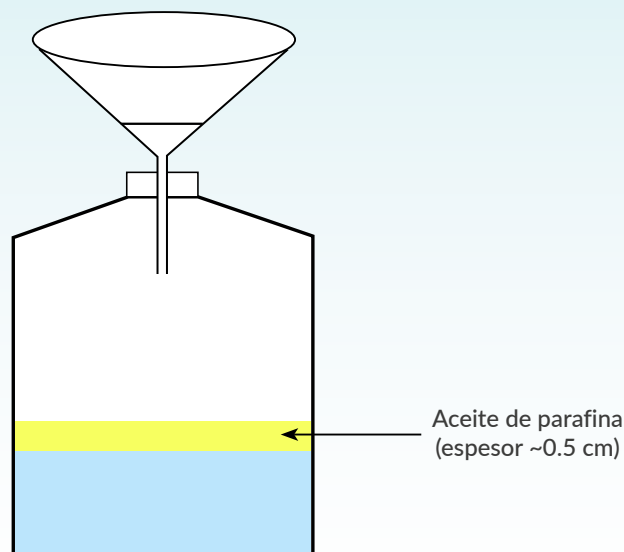


Figura 10-5. Totalizador con tubo sumergido con uso de una capa delgada de aceite de parafina. Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

10.1.4.4 Diseño 4 - totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión

Este diseño al igual que los otros, consiste en un tubo que conduce el agua desde la salida de un embudo

hacia el fondo de un recipiente, permite acumular precipitaciones hasta por un mes. Difiere en que puede reducir en gran medida la evaporación ya que cuenta con un sistema de equilibrio de presión que asegura el flujo desde el embudo hasta el recipiente (Figura 10-6).

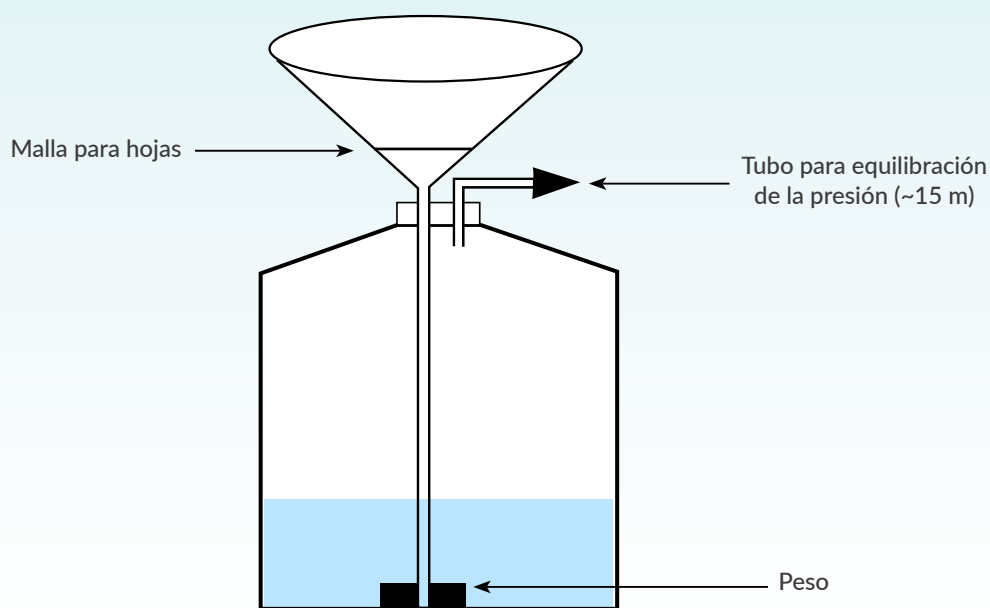


Figura 10-6. Totalizador con tubo sumergido y equilibrio de presión.
Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

El embudo cuenta con una malla o rejilla para evitar la entrada de hojas o basura al contenedor. Requiere que las mediciones de agua lluvia se hagan con una balanza o cilindro de medición en el caso de que no exista un pluviógrafo o pluviómetro cerca.

Gröning et al. (2012) desarrollaron un colector de agua lluvia que permite un muestreo prácticamente libre de evaporación, colecta muestras mensuales compuestas necesarias para las redes globales de monitoreo de composición isotópica de la precipitación. Este totalizador puede minimizar el tiempo del personal en el muestreo con un fácil y rápido cambio en las botellas de muestreo, además, de no considerar el uso de aceites para prevenir la evaporación. En este sentido, puede ser usado en áreas remotas para hacer muestreo mensual ya que la construcción es económica y la instalación es fácil.

Para minimizar la evaporación del agua, el diseño reduce la superficie del agua expuesta a la atmósfera, utiliza un tubo de polipropileno suave y estrecho (manguera) de 4 mm de diámetro, sujeto desde el embudo colector hasta el fondo de la botella de recogida (Figura 10-7).

El tubo de plástico se mantiene presionado por una masa de acero inoxidable para asegurar su extremo inferior, para ajustar la presión de aire en la botella con el nivel de la presión atmosférica que se encuentra en el exterior; de lo contrario si se disminuye la presión atmosférica, el agua en el interior del colector podría subir a través del tubo de plástico hasta el embudo y evaporarse rápido. Para esto, la cabeza de la botella cuenta con una conexión permanente con el aire exterior en la tapa y una manguera de polipropileno (diámetro interior de 5 mm) de 15 m de longitud, la

cual se encuentra enrollada alrededor del contenedor interno que contiene la botella y está protegida de la luz solar por el recipiente exterior. El embudo está equipado de un tamiz para evitar la entrada de basura

o partículas macroscópicas a la botella de la muestra. El extremo superior del embudo, está equipado con agujas de metal para reducir la contaminación de la muestra por excrementos de aves (Figura 10-7 y Figura 10-8).



Figura 10-7. Totalizador simple con tubo sumergido.
Fuente: (Gröning et al., 2012).

Para evitar grandes cambios de temperatura en el colector de agua, la botella es térmicamente aislada de calentamiento por radiación solar, logrado a partir del uso de un doble contenedor alrededor de la botella. El aire, puede circular vertical entre el contenedor interior y el contenedor exterior pintado de plata, a través de aberturas de ventilación en la parte superior para mejorar aún más el aislamiento de la botella de muestreo a un sobrecalentamiento. El contenedor puede ser montado en un mástil por dos varillas roscadas.

Actualmente, se pueden encontrar en el mercado, totalizadores como el descrito antes, los cuales han sido avalados por la OIEA y la GNIP, muestran un excelente rendimiento sobre algunos convencionales (Figura 10-8). Este instrumento puede ser instalado en cualquier lugar, adaptándose a cualquier periodo de tiempo con un ajuste de tamaño del embudo o el cambio del tipo o volumen de la botella.

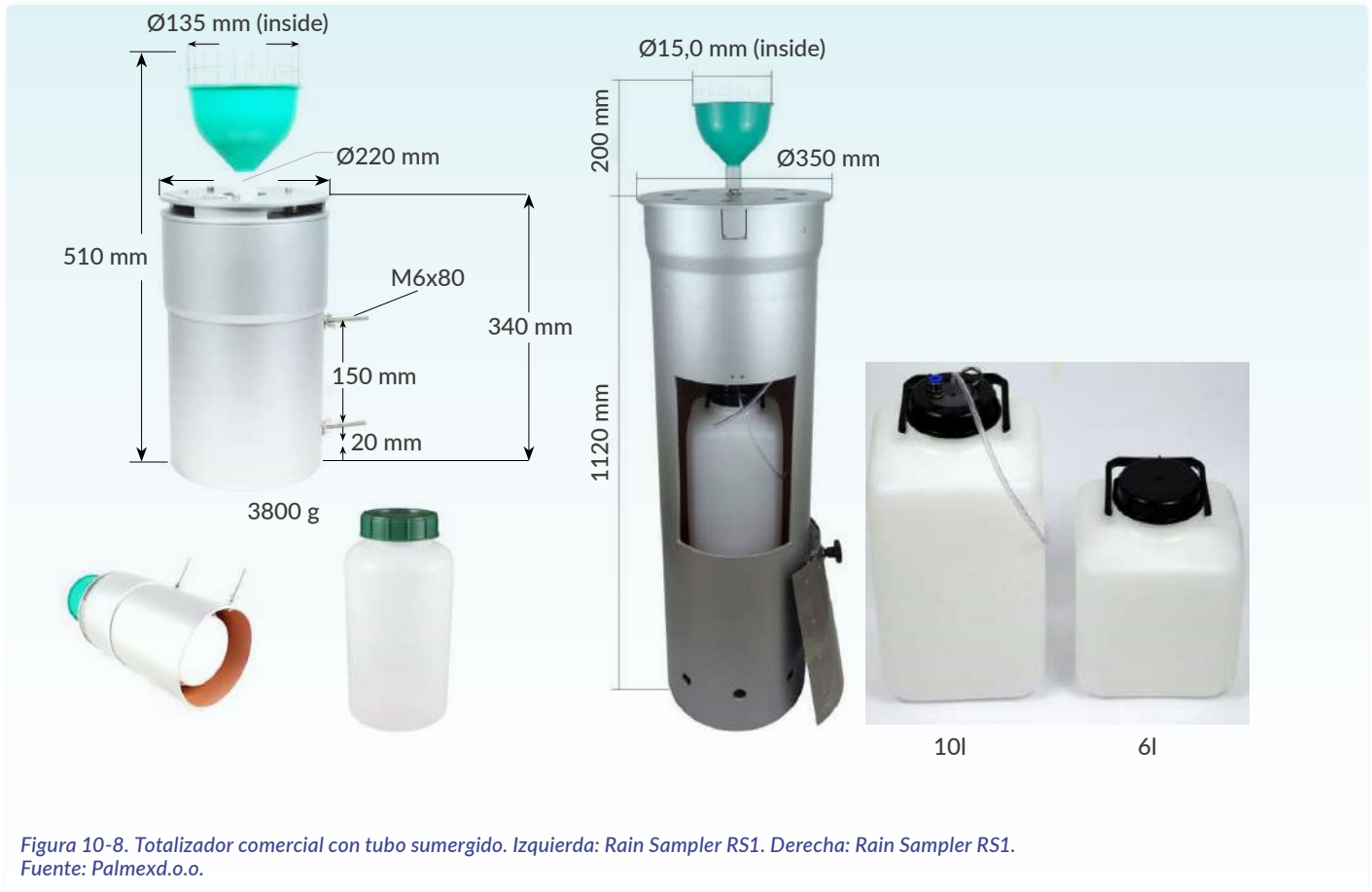


Figura 10-8. Totalizador comercial con tubo sumergido. Izquierda: Rain Sampler RS1. Derecha: Rain Sampler RS1. Fuente: Palmexd.o.o.

El totalizador Rain Sampler RS1, cuenta con las siguientes piezas estándar:

1. Cuerpo de acero inoxidable RS-1i.
2. Botella de polietileno de alta densidad (PEAD) de 3 l.
3. Cable de limpieza.
4. Embudo de 135 mm (diámetro interior) con protección de tamiz y aves.
5. Tubo de plástico delgado que entra en la botella (instalado).

El totalizador Rain Sampler RS2, cuenta con las siguientes piezas estándar:

1. Cuerpo de acero inoxidable RS-2i.
2. Botella de PEAD de 10 l.
3. Botella de PEAD de 6 l.

4. Perfil INOX para anclar el cuerpo del totalizador al suelo.

5. Perfil INOX cruzado como soporte de estante para la botella (puede utilizarse la botella de 10 o de 6 l).

6. Cable de limpieza.

7. Embudo de 135 mm (diámetro interior) con protección de tamiz y aves.

8. Tubo de plástico delgado que entra en la botella (instalado).

El colector Rain Sampler RS1 puede ser montado en un mástil por dos varillas roscadas; el Rain Sampler RS2, va soportado al suelo (Figura 10-9).



Figura 10-9. Izquierda. Totalizador Rain Sampler RS1. ubicado en las instalaciones del Área Operativa 07- Pasto- IDEAM. Derecha: Totalizador Rain Sampler RS2, instalado en la estación climatológica del IDEAM, del Aeropuerto El Caraño, en Quibdó. Red Nacional de Isotopía-IDEAM.

10.1.4.5 Diseño 5 - totalizador enterrado

Este modelo de totalizador acumula, integra y conserva toda la lluvia caída durante el periodo de muestreo, también protege el agua recogida de cualquier evaporación (OIEA/GNIP, 2014). Consiste en un embudo montado en un mástil, conectado por una manguera a un recipiente el cual va colocado al interior de un tanque o contenedor hermético (con el objetivo de mantener refrigerada el agua acumulada y que evite el ingreso de agua del exterior) que se entierra en el subsuelo. El embudo, cuenta con una malla para prevenir la introducción de hojas u otro tipo de basura.

El montaje de este colector requiere excavar un hueco para introducir el tanque o contenedor, en este caso hay que considerar la necesidad de un sistema de drenaje para la desviación de caudales superficiales ya que el contenedor puede ser expulsado por la presión de los niveles freáticos. También el recipiente puede ser colocado dentro de una caja o un material de aislamiento entre el suelo y el contenedor y debe ser cubierto por una placa-tapa (OIEA/GNIP, 2014) (Figura 10-10, Figura 10-11 y Figura 10-13).

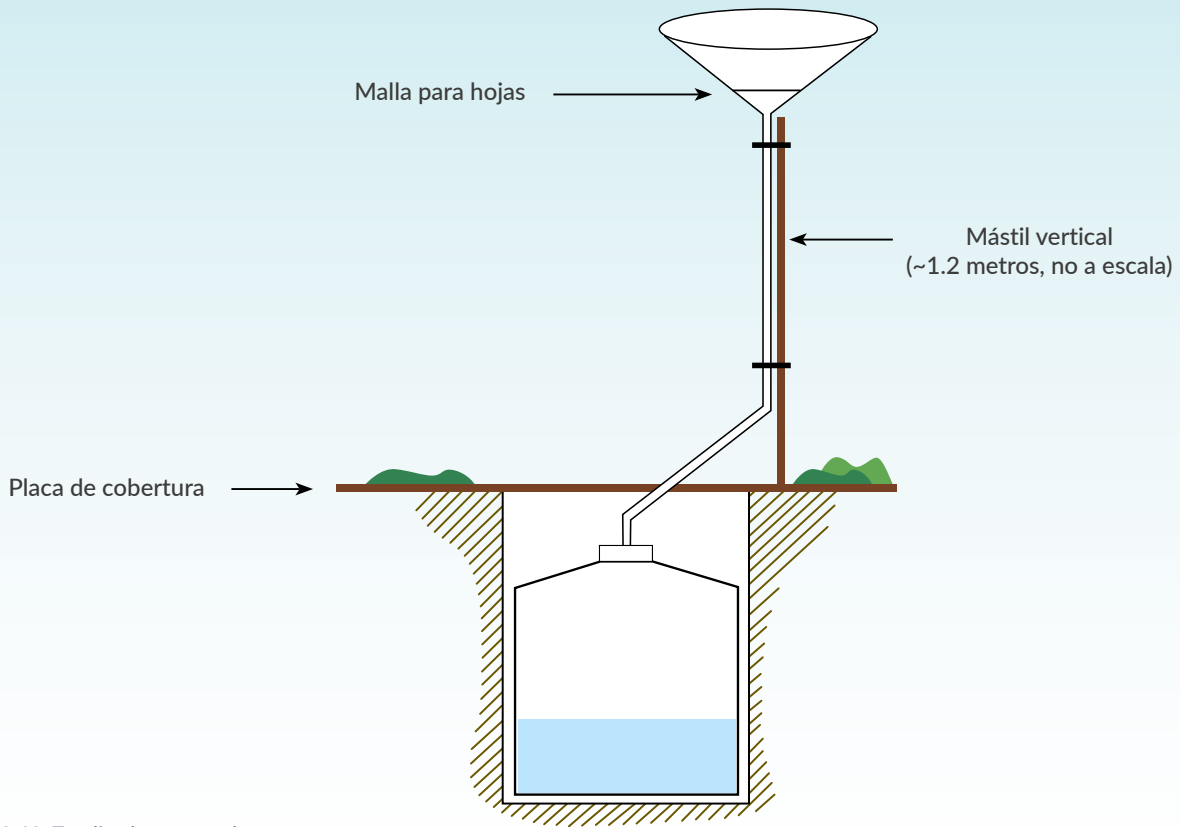


Figura 10-10. Totalizador enterrado.
Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).



Figura 10-11. Totalizador enterrado ubicado en la estación climatológica del IDEAM, de Carmen de Tonchalá- Norte de Santander-Red Nacional de Isotopía-IDEAM.

Para el muestreo de nieve, se puede utilizar un cubo o caja para la recolección o un totalizador (Figura 10-12).



Figura 10-12. Totalizador ubicado en el Parque Natural Los Nevados-IDEAM.

Para tener en cuenta

Los embudos pueden variar en diámetro para ajustar el muestreo según las condiciones climáticas y los periodos de muestreo, por ejemplo, en temporada de lluvia o seca.

En Tabla 10-1, se presentan los volúmenes de agua recogidas en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación, los cuales pueden ser usados como referencia para escoger el tamaño del embudo de cada totalizador.

Tabla 10-1. Volúmenes de agua recogidas (ml) en función del diámetro del embudo y de la cantidad de precipitación (ejemplos de pluviómetros bien establecidos. A: Pluviómetros de 5”, por ejemplo, UK Mk2/Mk3 o Nipher. B: Diseño estandarizado OMM, por ejemplo, Hellmann o Tretjakov. C: NOAA 8”. D: NOAA 12”).

Cantidad (mm)	Diámetro del embudo cm (área del orificio en cm ²)				
	12.72 (127) A	15.96 (200) B	20.32 (324) C	25.24 (500)	30.48 (730) D
0.1	1.3	2.0	3.2	5.0	7.3
0.5	6.4	10.0	16.2	25.0	36.5
1	12.7	20.0	32.4	50.0	73.0
5	63.5	100.0	162.1	250.0	364.8
10	127.0	200.0	324.3	500.0	729.7
50	635.0	1000.0	1621.5	2500.0	3648.3
100	1270.0	2000.0	3242.9	5000.0	7296.6
500	6350.0	10000.0	16214.6	25000.0	36482.9

Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).



Figura 10-13. Totalizador Rain Sampler RS1, ubicado en las Estación climatológica del IDEAM, Duitama- Red Nacional de Isotopía- IDEAM.

Otros elementos básicos para el muestreo

Dependiendo de la estrategia de muestreo, se requerirá de un cilindro, jarra o probeta graduada para la medición del agua acumulada (Figura 10-14). También se puede utilizar una balanza electrónica, con nivel

de pesada de 0.1 gramos, útil para la determinación del volumen de la muestra (Figura 10-14).

En el caso de que se utilice parafina, se requerirá de un embudo de decantación (Figura 10-14).



Figura 10-14. A: Jarra. B: Probeta. C: Balanza electrónica. D: Embudo de decantación.

Con respecto a los recipientes de acumulación, deben ser de PEAD con tapa que cierre herméticamente el contenido (Figura 10-15). Su tamaño dependerá de las condiciones climáticas y del diámetro del

embudo que se utilice en colector. No utilice botellas que se hayan usado en otras actividades. Si el recipiente presenta un deterioro a medida de su uso, es necesario cambiarla (OIEA/GNIP, 2014).



Figura 10-15. Recipiente de PEAD de color blanco para la acumulación de agua.

Los **recipientes** para muestreo isotópico de aguas lluvia, deben ser botellas de vidrio de borosilicato color ámbar de capacidad de 30 o 50 ml para el muestreo de ^2H (deuterio) y ^{18}O (oxígeno), con tapa y contratapa para evitar la evaporación. Este tipo de envases permiten el almacenamiento durante al menos una década, siempre y cuando el cierre

no se rompa (Mook, 2002). Se recomienda utilizar frascos con tapa de junta de cono de doble efecto y con anillo de seguridad (Figura 10-16). También se pueden utilizar botellas de PEAD en tamaños de 50 ml. El uso de este tipo de envases permite el almacenamiento del orden de meses, antes de ser entregados al laboratorio.



Figura 10-16. Frascos para la recolección de muestras.

Para el muestreo de ^3H (tritio), son utilizadas botellas de PEAD de 500 o 1000 ml (OIEA/GNIP, 2014), (Figura 10-17). Se recomienda el uso de

taponés a presión blancos (aunque a veces sea difícil el cierre de la botella) en combinación con el tapón a rosca.



Figura 10-17. Frascos de muestreo isotópico de ^2H , ^{18}O y ^3H 50 y 500 ml de PEAD.
Fuente: (OIEA/GNIP, 2014).

Para muestreo de ^{18}O y deuterio de nieve, se requiere una botella de unos 30 ml, esta puede ser adaptada a la cantidad que se requiera y debe ser de 10 ml. Otra posibilidad es recuperar la nieve con la utilización de una bolsa plástica tipo congelación con cerradura hermética. Una vez recogidas las muestras de nieve, se deben transferir a una botella plástica o de vidrio oscuro con capacidad de 10 y 30 ml cuando ya se haya derretido (Francou & Pouyaud, 2004).

Para muestreo isotópico de ^{13}C , se requieren frascos de plástico de capacidad de dos litros con tapa y contratapa. En el caso de muestreo de ^{15}N , se deben utilizar recipientes plásticos de un litro (Vargas & Bobadilla, s.f.). Según (Mook, 2002), se requieren 50 l para la datación estándar del ^{14}C y 250 ml para la datación AMS del ^{14}C . Si el almacenamiento ha de ser superior a un par de meses, entonces, es preferible recoger un gran volumen y almacenar las muestras en botellas de cristal.

Otros materiales por considerar serían: libreta de campo, formatos, lápices, marcadores, cinta y rótulos para marcar botellas.

También se debe contar con un GPS para la georeferenciación del totalizador o pluviómetro.

10.1.5 Procedimiento para toma de datos

A continuación, se ilustran los procedimientos utilizados en el monitoreo isotópico de aguas meteóricas.

10.1.5.1 Toma de muestras

Dependiendo del tipo de muestras se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

Para el caso que se recoja agua lluvia cada mes

La recolección del agua en el totalizador se hará desde el día 1 del mes n , hasta el día 1 del mes $n+1$, en este último día se procede a tomar la muestra. Para la recolección de agua se debe considerar:

- ♦ En el caso que se recoja en un pluviómetro normal, la precipitación será recogida inmediatamente después de un evento lluvioso (o por lo menos una vez cada día). La recolección y medición se hará a primera hora de la mañana. Debe hacerse una lectura del volumen recogido (con un balde graduado o con una probeta), poste-

riormente vaciar el pluviómetro en un recipiente de PEAD con tapa y contratapa de plástico y capacidad para almacenar el agua recogida del mes. El pluviómetro debe ser secado antes de ser devuelto a su posición.

- ♦ Si el colector es un totalizador que almacena el agua lluvia por un mes, al final de este periodo se debe medir el volumen (ml) de agua lluvia colectada con un balde graduado o con una probeta si es necesario (Figura 10-18, Figura 10-19 y Figura 10-20).
- ♦ Al cabo del mes, se debe agitar toda el agua contenida en el recipiente hermético y proceder a llenar los frascos de muestreo.
- ♦ El agua en exceso debe ser desechada, el tanque de acumulación debe ser secado (limpiado en caso de ser necesario) y posteriormente debe ser puesto en el totalizador para el siguiente periodo de recogida.



Figura 10-18. Totalizador Rain Sampler RS1 (Palmex) que hace parte de la estación isotópica de la Red Global de Isótopos en la Precipitación de la OIEA.



Figura 10-19. Muestreo de un totalizador Palmex, referencia Rain Sampler, ubicado en la Estación Bremen-CRQ.



Figura 10-20. Medición con probeta de la lluvia acumulada en un totalizador enterrado que hace parte de la estación isotópica de la Red Nacional de Isotopía del IDEAM ubicada en San Andrés Islas.



Figura 10-21. Muestreo de un totalizador Palmex, referencia Rain Sampler, ubicado en la Estación La Montaña-CRQ.

Para el caso que se recoja agua lluvia con base en eventos individuales

Los tiempos de recolección pueden variar de semanas a días. Se debe tener en cuenta (OIEA/GNIP, 2014):

- ♦ Leer y vaciar el agua diariamente o después de cada evento de lluvia. Se recomienda a primera hora de la mañana para evitar la evaporación.
- ♦ Después de leer la cantidad de precipitación en el pluviómetro y anotarla, se debe verter el agua bien mezclada directamente a una botella. Normalmente, las muestras con base en eventos individuales son recogidas solo para isótopos estables (botellas de 30 ml o aún más pequeñas).
- ♦ El pluviómetro o totalizador debe ser secado antes de ser devuelto a su posición.

Para el caso que se recoja nieve

Según la (OIEA/GNIP, 2014) se debe tener en cuenta:

- ♦ Lleve el colector (de cubo o caja) con la nieve al interior de un edificio.

- ♦ Permitir que la nieve se funda hasta alcanzar la temperatura ambiente (¡no aplique calor!). Es prudente tener un segundo colector en reserva, el cual debe ser colocado para que siga muestreando ya que la fusión toma tiempo.
- ♦ Una vez se haya fundido toda la nieve o hielo, leer y anotar la cantidad de agua y añada la muestra de agua al recipiente mensual de acumulación. Limpiar y secar el colector antes de reponerlo en su posición. También se puede considerar el muestreo de ^{18}O y deuterio, realizando perforaciones o calicatas en la nieve según Francou y Pouyau (2004), (Figura 10-22); en el perfil de la nieve caída, se debe realizar una división en el número de muestras elegidas, y posteriormente proceder a recuperar una muestra medida en cada parte del perfil raspando con un cuchillo de plástico o metal. Se debe recolectar alrededor de un equivalente a 10 ml de agua, sin embargo, solo con 3 ml es suficiente para hacer un análisis.



Figura 10-22. Calicata para recolección en la nieve-IDEAM.

Otras consideraciones

- ♦ Purgar dos veces las botellas donde se recolectará la muestra con el agua recolectada.
- ♦ Llenar la botella, dejando un espacio de ~5 %. Si no hay agua en suficiente volumen envíe la muestra, pero debe notificar esta observación al coordinador del programa de monitoreo.
- ♦ Rotular cada frasco antes de llenarlo con el agua, de preferencia con rotulador resistente al agua, colocar un código sencillo de identificación, fecha y hora de recolección o periodo de recogida y el valor de la precipitación máxima medida en el totalizador. Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repetir el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.
- ♦ Utilizar una cinta de plástico y otro material impermeable para sellar la tapa del frasco de muestra, ayudan a prevenir fugas accidentales de muestra (IAEA, 2013).
- ♦ Utilizar siempre una libreta de campo para anotar las observaciones (lugar de muestreo y sus coordenadas, nombre de la persona que toma el dato) y escribir los datos numéricos de las muestras que se recogen.

- ♦ Si se hacen recolecciones diarias se recomienda anotar los volúmenes acumulados en el formato correspondiente (Anexo 10-1), de igual forma para el muestreo mensual (Anexo 10-2). Estos formatos servirán de apoyo para el laboratorio. También se deben anotar en el formato, los cambios en las características del agua medida, en cuanto a color, contenido de sustancias flotantes, etc.
- ♦ Se deben registrar datos de la temperatura media del aire, presión media de vapor o humedad relativa (si están disponibles), incluso en meses sin precipitación.
- ♦ Se debe anotar también el diámetro del embudo, esta medida debe ser referenciada para calcular la cantidad de lluvia que cayó en el mes de recolección por medio de la Ecuación 10-1:

$$ppt[mm] = \frac{10V}{\pi * r^2 * F^2}$$

Ecuación 10-1

Donde,

$rF [cm]$: Radio del embudo.

Se debe considerar que no debe haber ningún cambio del diámetro del embudo durante el periodo de acumulación; en caso que se requiera un cambio en el embudo solo debe hacerse el primer día de un mes.

- ♦ El recipiente de acumulación se debe guardar en un lugar fresco y oscuro para evitar su evaporación. En caso de altas temperaturas y humedad en la zona de muestreo, se recomienda refrigerar el tanque para evitar evaporaciones que puedan modificar la composición química del agua.

- ♦ Sí se utiliza aceite de parafina para impedir la evaporación, esta se puede transferir periódicamente al recipiente de acumulación. Al cabo de un mes se puede separar el agua del aceite con un embudo separador o sencillamente retirando el aceite con un sifón. Si quedan algunos residuos de parafina se debe comunicar al laboratorio que se añadió este aceite (se debe anotar en la etiqueta de la botella) para que antes de realizar los respectivos análisis, esta sea eliminada completamente.
- ♦ Asegurar que el tanque de acumulación sea lavado de toda agua y de la parafina en exceso, dejarlo secar antes de reponerlo a su posición para el siguiente periodo de recogida (OIEA/GNIP, 2014).

10.1.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras

Para el caso de muestras de agua para análisis isotópico ya sea de ^2H , ^3H , ^{18}O , ^{13}C , las muestras deben ser almacenadas en un lugar fresco hasta su análisis para evitar su evaporación. Para lugares donde las condiciones de humedad y temperatura sean altas, se recomienda que las muestras sean refrigeradas en el tiempo que se demore su envío al laboratorio.

Para el caso de los N, las muestras deben almacenarse a $4\text{ }^\circ\text{C}$ para evitar cualquier descomposición, desgasificación y evaporación.

En general, el laboratorio encargado de realizar el análisis dará las respectivas recomendaciones en el volumen de muestreo y en la preservación.

Al momento de ser enviadas al laboratorio, las muestras deben ser empacadas adecuadamente para prevenir que se rompan durante el envío.



Toma de muestra de agua lluvia para isótopos ambientales.
CVC

10.2 En aguas superficiales

El uso de técnicas isotópicas en aguas superficiales se ha ampliado de una manera considerable en los

últimos años, los campos de aplicabilidad son muchos, tal como se ilustra en la Tabla 10-2.

Tabla 10-2. Actividades específicas típicas de los isótopos estables que se usan en los estudios de los ríos.

Isótopo	Relación isotópica de interés	Abundancia natural media	Aplicación
^2H	$^2\text{H}/^1\text{H}$	$1.55 \cdot 10^{-4}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial, agua subterránea.
^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	Ciclo del carbono en las riberas; procesos de meteorización; procesos biológicos.
^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$3.66 \cdot 10^{-3}$	Contaminación; procesos biológicos.
^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$2.04 \cdot 10^{-3}$	Balance de agua y dinámica en las cuencas fluviales, embalses y estuarios; relación agua superficial-agua subterránea.
^{34}S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	$4.22 \cdot 10^{-2}$	Contaminación; procesos de deposición de sales.
^{87}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709939	Meteorización de las rocas y los terrenos; perturbaciones antrópicas (polución) influencia desde los afluentes en la química y la contaminación de los ríos.

Fuente: (Rozanski et al., 2002).

Entre estos, es común evaluar los isótopos más significativos del agua como son el ^2H (deuterio), el ^3H (tritio) y el ^{18}O (oxígeno-18) debido a su particular potencial para el cálculo del balance de agua, la dinámica del agua y sus relaciones entre el agua superficial y el agua subterránea de los ríos y sus cuencas. También las relaciones $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para determinar la escorrentía de las cuencas, además de uranio-238 y uranio-234 para estudios de meteorización, erosión y sedimentación, además de procesos en estuarios y sedimentación (Rozanski et al., 2002). Además se puede utilizar el $^{222}\text{radón}$, para evaluar las conexiones entre las aguas superficiales y subterráneas.

En el caso de monitoreo de lagos y embalses, se utilizan otros trazadores como $^3\text{H}/^3\text{He}$, que es un

isótopo radiactivo de hidrógeno (^3H) y su descendiente ^3He (gas noble) y los CFCs ($^{11}\text{freón}$, $^{12}\text{freón}$) para datación del agua e intensidad de la mezcla vertical y los SF_6 para la cuantificación de la mezcla vertical y horizontal (Rozanski et al., 2002).

Hay que considerar también el uso de colorantes, los cuales son sustancias inyectadas en los cursos de agua superficial, para determinar plumas de contaminación e identificación de zonas estancadas y caminos preferentes en lagos (Rozanski et al., 2002).

A continuación, se presentan algunas consideraciones para una comprensión completa del proceso del monitoreo isotópico en aguas superficiales.

10.2.1 Selección de puntos de monitoreo

El punto que se seleccione tanto en ríos o lagos, debe ser de fácil acceso en diferentes épocas del año. Las muestras se deben tomar de la zona central del río o de una zona donde fluya el agua. Se debe evitar tomar agua de las márgenes del río ya que allí el agua no está perfectamente mezclada y puede haber sufrido efectos de evaporación o de contaminación (Mook, 2002).

En lagos y estuarios, se deben recoger de la superficie y del fondo. En el caso que se tomen muestras en zonas de confluencia, se deben considerar las composiciones isotópicas variables como consecuencia de la mezcla incompleta de dos aguas fluviales diferentes, por lo que la distancia de toma de muestra puede ser de unos cuantos kilómetros cuando se trate de fluviales grandes (Mook, 2002).

10.2.2 Frecuencia de monitoreo

Para ríos, lo recomendado es realizar tres muestreos en el año, en la época seca, en época de transición y época de lluvias. Si la toma de muestra se hace para una investigación, lo recomendado es hacer esta misma toma en las diferentes épocas, pero en periodos más cortos, de acuerdo con la programación del proyecto (Figura 10-23).



Figura 10-23. Muestreo de agua en drenaje de páramo de la red de monitoreo isotópico de aguas superficiales y meteóricas de alta montaña del IDEAM.

En lagos o embalses, normalmente son suficientes dos campañas de muestreo: una durante la época seca y otra durante la estación de lluvias. Aunque para algunas variables la frecuencia de monitoreo es más continua. En la sección de procedimiento se encontrará la frecuencia de monitoreo dependiendo de la variable.

10.2.3 Tipos de medición

Las mediciones se hacen recolectando las muestras puntuales en un lugar representativo del cuerpo de agua, se pueden tomar con recolectores para el caso de ríos profundos, lagos, embalses, estuarios o el mar, que permiten recolectar las muestras a una profundidad determinada.

En ríos de poca profundidad o arroyos se puede tomar directa la muestra, introduciendo el envase recolector en el agua (Figura 10-24). Se debe considerar que la medición no implique un riesgo para el personal que realiza la medición, en caso de muestrear en ríos un poco más profundos se deben utilizar las medidas de seguridad respectivas para salvaguardar la vida del personal.



Figura 10-24. Muestreo de agua en drenaje de superpáramo de la red de monitoreo isotópico de aguas superficiales y meteóricas de alta montaña del IDEAM.

Este tipo de mediciones isotópicas, deben estar acompañadas de análisis fisicoquímicos, tomados en campo y en el laboratorio que permitirán una mejor interpretación. Las mediciones in situ deben incluir la determinación de parámetros como pH, potencial redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica. Con respecto a los análisis químicos se deben considerar la medición de iones mayoritarios.

De igual forma, se debe georreferenciar (con coordenadas y altitud) la ubicación exacta del punto de muestreo en el cuerpo de agua.

10.2.4 Materiales y equipos

Se pueden utilizar muestreadores discretos para recoger muestras de agua a una profundidad de agua determinada. Según la (OMM, 2011), se pueden utilizar muestreadores Van Dorn, Kemmerer y de bombeo:

- Botella de Van Dorn para obtener muestras a una profundidad de 2 m. En posición horizontal sirve para tomar muestras del fondo, en la interfaz sedimentos-agua (Figura 10-25).
- Muestreador de Kemmerer. Es operado mediante un cable y puede utilizarse en masas de agua de 1 m o más de profundidad. Existen muestreadores de Kemmerer para volúmenes comprendidos entre 0.5 y 8 l (Figura 10-25).

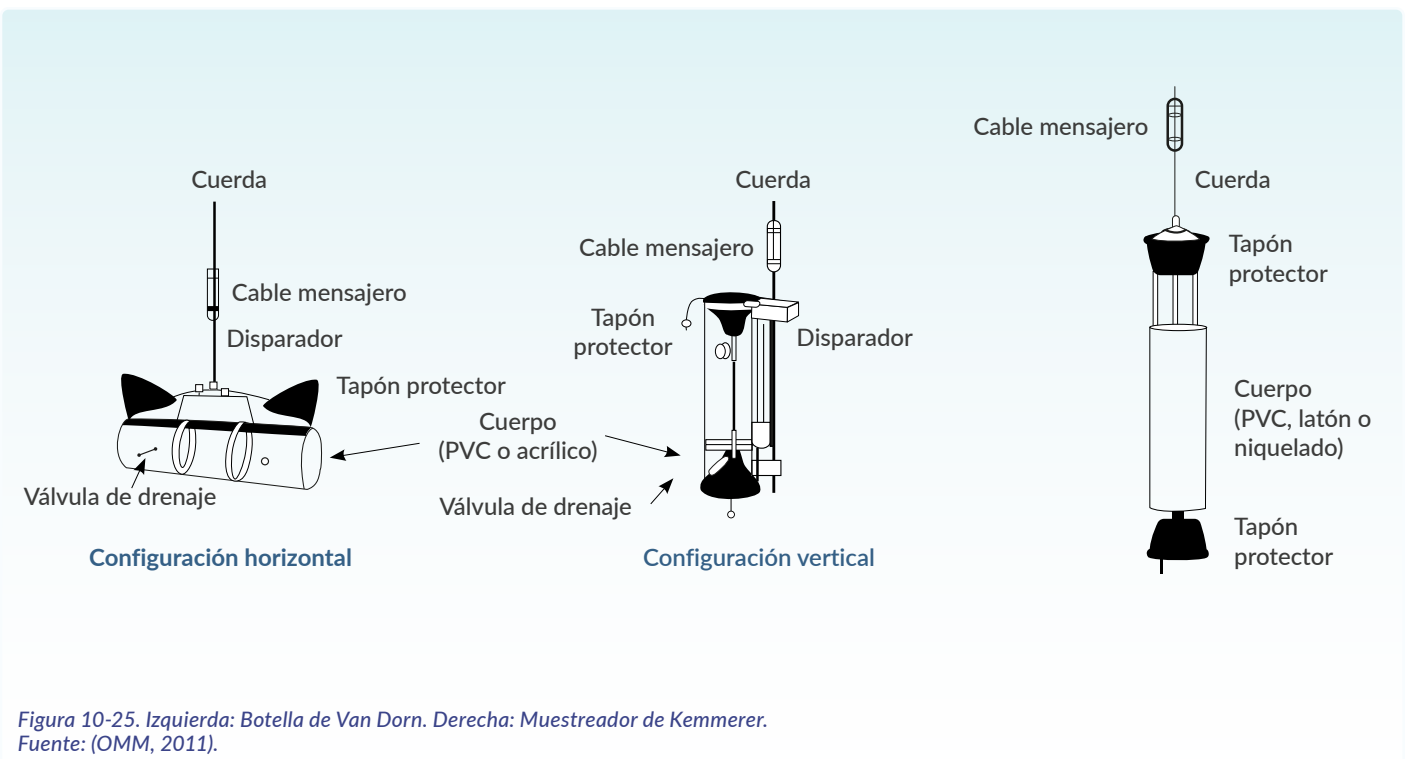


Figura 10-25. Izquierda: Botella de Van Dorn. Derecha: Muestreador de Kemmerer. Fuente: (OMM, 2011).

- Bombas. Para tomar muestras a profundidades específicas se utilizan bombas de tres tipos (de diafragma, peristálticas y rotatorias).

Para el monitoreo de parámetros in situ, se debe utilizar un medidor multiparamétrico (Figura 10-26). En el mercado existen varias opciones que

pueden medir varios parámetros, algunos permiten las mediciones de parámetros de calidad del agua tales como el pH, ORP (Potencial de Óxido Reducción), conductividad, turbidez, temperatura, iones de amonio, nitrato, cloruro (NH_4^+ , NO_3^- -N o Cl^-),

oxígeno disuelto (como % de saturación o concentración), resistividad, TDS (Sólidos Totales Disueltos), salinidad y gravedad específica de agua de mar. Se mide la presión atmosférica para compensar la concentración de oxígeno disuelto.



Figura 10-26. Medidor multiparámetro portátil de temperatura y pH / EC / TDS.
Fuente: (Hanna Instruments, 2020).

También contar con un GPS para la georreferenciación del punto de muestreo.

Se recomienda el uso de recipientes de muestreo de 30 o 50 ml, de vidrio, preferible de borosilicato (color ámbar), con tapa de rosca en PEAD y con tapón, para tener seguro el almacenamiento de la muestra y que de esta manera la evaporación sea mínima. También se pueden utilizar botellas PEAD, cuando los periodos de almacenamiento son del orden de meses. Para muestreo de ^3H (tritio), son utilizadas botellas PEAD de 500 o 1000 ml. Para muestreo de ^{14}C , los frascos deben ser de cristal de capacidad de 50 l para la datación estándar y 250 ml para la datación con el AMS (*accelerator mass spectrometry*). Generalmente,

el contenido de carbono disuelto de muestras de ^{14}C de gran volumen se tratan en el campo (Mook, 2002).

Otros materiales por utilizar son: libreta de campo, formatos, lápices, marcadores, cinta, rótulos para marcar botellas, guantes, chaleco salvavidas, botas.

10.2.5 Procedimiento para toma de datos

A continuación, se ilustran los aspectos relacionados con procedimientos para toma y preservación de muestras isotópicas en aguas superficiales.

10.2.5.1 Toma de muestras

La recolección de muestras en aguas superficiales no es complicada cuando se recogen cantidades rela-

tivamente pequeñas, sin embargo, si específicamente se muestrea carbono, se debe prestar un cuidado mayor en la recogida del agua.

Como primer paso, se debe identificar la mejor ubicación del punto de recolección en el drenaje, es necesario realizar un trabajo previo al campo donde se determinen las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo utilizando imágenes satelitales, mapas, fotografías aéreas, etc.; se debe tener cuidado si se toman muestras en zonas de confluencia, debido a que a cierta distancia aguas abajo de esta (pueden ser metros en caso de fluviales pequeños o kilómetros en fluviales grandes), se pueden tener composiciones isotópicas variables por la mezcla de las dos aguas de los ríos, (Mook, 2002).

El punto de muestreo debe estar debidamente georreferenciado mediante GPS, y se deben registrar las condiciones atmosféricas presentes al momento de tomar la muestra. Esta información debe ser anotada en una libreta de campo o en formatos previos establecidos junto con los datos numéricos del muestreo.

Cuando se muestrea en ríos, primero se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se mide el caudal, y luego, se toma la muestra isotópica en el centro del río donde el caudal sea representativo y haya una buena homogeneización. Se debe evitar tomar agua de las márgenes del río ya que allí el agua no está perfectamente mezclada y puede haber sufrido efectos de evaporación o de contaminación (Mook, 2002), (Figura 10-27).

En el monitoreo isotópico en lagos y embalses, primero se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se toma el nivel del lago y se toma la muestra isotópica tanto de la superficie como del fondo (Mook, 2002).

Estos muestreos se deben acompañar de medidas de campo como pH, alcalinidad y conductividad eléctrica, salinidad (especialmente con agua marina y agua salobre) y análisis fisicoquímicos que permitirán interpretar los resultados en términos de la columna de agua.



Figura 10-27. Medición de parámetros físicos en el río El Roble, previo a muestreo isotópico-CRQ.

Para el muestreo en alta montaña, del mismo modo se mide la profundidad donde se va a tomar la muestra, se mide el caudal y se toma la muestra lo más cerca que se pueda del centro del cauce. Es común que este tipo de mediciones estén acompañados de un pluviómetro al que se le mide el agua que se encuentra totalizada y se recolectan también muestras de agua lluvia para análisis isotópico.

Se debe tener cuidado cuando se tomen muestras en las zonas de confluencia. A una cierta distancia aguas abajo de la confluencia, se puede seguir teniendo composiciones isotópicas variables como consecuencia de la mezcla incompleta de dos corrientes de agua diferentes, esta distancia puede ser de unos cuantos kilómetros cuando se trate de corrientes grandes.



Medición *in situ* de parámetros físicoquímicos utilizando una sonda multiparamétrica. Quebrada La Gómez-Sabana de Torres- Santander
 Ana María Vesga

Consideraciones generales

- ♦ Purgar por lo menos dos veces el frasco con el agua por muestrear.
- ♦ Colectar la muestra dejando un espacio de ~5 % y posteriormente se debe tapar el frasco.
- ♦ Registrar en la libreta de campo o formato (Anexo 10-3), la información completa de las observaciones (lugar de muestreo y sus coordenadas, profundidad del muestreo, caudales, nivel del lago, fecha y hora de recolección, nombre de la persona que toma el dato). También se deben escribir los datos numéricos de las muestras que se recogen.
- ♦ Registrar en el formato (Anexo 10-3) o en la libreta de campo los parámetros de temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y potencial redox del agua muestreada. Dicha información permitirá hacer el análisis integrado de los resultados.
- ♦ Rotular cada frasco antes de llenarlo con el agua, de preferencia con rotulador resistente al agua, colocando un código sencillo de identificación, fecha y hora de recolección. Se recomienda rotular también el tapón de la

botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.

- ♦ Utilizar una cinta de plástico y otro material impermeable para sellar la tapa del frasco de muestra, ayudan a prevenir fugas accidentales de muestra (IAEA, 2013).

Otros aspectos para tener en cuenta

- ♦ Para el muestreo de ^2H y ^{18}O , se debe tomar un volumen de 30 a 50 ml, para el muestreo de ^3H , se debe recolectar 500 ml.
- ♦ Si se va a muestrear ^{14}C o el cociente $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en el carbono inorgánico disuelto (CID) se debe conocer la composición química de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos presentes en el agua para ser muestreada, por lo que se deben hacer mediciones de temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y potencial redox.
- ♦ Para realizar el análisis convencional del ^{14}C y dependiendo del contenido de CID del agua se requerirán entre 25 y 50 l de agua. Se puede obtener CO_2 gaseoso al hacer que se disuelva en una solución alcalina dentro de una botella de plástico, que posteriormente es transportada al laboratorio. También se puede precipitar el CID como BaCO_3 tras añadir una solución de NaOH , el cual se recoge en una botella de plástico y posteriormente se transporta al laboratorio (Mook, 2002).
- ♦ Si se utiliza la técnica de AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*) se requieren volúmenes menores de 500 ml. Para la recolección de la muestra se deberá recoger el agua usando botellas de plástico sumergido en un contenedor que desborde agua. Las muestras deben conservarse para eliminar la actividad microbiana agregando

cinco gotas de solución I_2 -KI por muestra de 100 ml. Esta solución de I_2 -KI se puede preparar disolviendo 1.5 g de I_2 y 3 g de KI en 100 ml de agua desmineralizada-ultrapura. Otra posibilidad es agregar 2 a 3 gotas de solución saturada de $HgCl_2$. Si se opta por no conservar las muestras, se deben refrigerar preferiblemente y analizar dentro de los 30 días (IAEA, 2014).

- ♦ Si el interés es muestrear ^{15}N , hay que considerar la concentración química de nitratos del agua,

para calcular el volumen de muestra por tomar, esto se hace a partir del análisis químico. Se requiere del orden de 4-5 mg/l de nitratos presentes en el agua para el análisis. Si esta concentración es menor, se debe tomar un mayor volumen de muestra, del orden de 2 a 5 l.

- ♦ También es posible concentrar el NO_3^- o el NH_4^+ respectivamente mediante resinas de intercambio aniónico o catiónico (IAEA, 2014).



Figura 10-28. Muestreo hidroquímico, complementario a los análisis isotópicos-CRQ.

- ♦ En el muestreo fisicoquímico, es necesario filtrar las muestras, se recomienda el uso de un filtro de membrana de 0.45μ (o más pequeño), el cual está disponible en muchas configuraciones (por ejemplo, filtros de jeringa, vacío, barril, filtros de cartucho).
- ♦ Después de filtrada la muestra, se debe verter la muestra filtrada en un recipiente de PEAD de

125 ml para cationes y de 125 ml para aniones. Para los cationes, se debe acidificar la muestra agregando unas gotas de ácido nítrico concentrado, agite suavemente la muestra y asegurarse de que el pH sea <2 (papeles de pH son adecuados). Para los aniones, la muestra de agua no debe estar acidificada. Posteriormente se debe tapar y

etiquetar herméticamente las botellas de muestra y almacenar en frío, si es posible.

Estas recomendaciones pueden variar de acuerdo con la metodología que maneje el laboratorio escogido para realizar el muestreo.

10.2.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras

Para el caso de muestras de agua para análisis isotópico ya sea de ^2H , ^3H y ^{18}O , no se requiere de filtración y preservación, solo se requiere que las muestras sean almacenadas en un lugar fresco hasta su análisis para evitar su evaporación. Para lugares donde las condiciones de humedad y temperatura sean altas, se recomienda que las muestras sean refrigeradas en el tiempo que se demore su envío al laboratorio.

Específicamente para el ^{13}C , las muestras deben guardarse en un lugar oscuro, preferible a bajas temperaturas (Mook, 2002).

Para el caso de los N, S y gases como Ar y Kr, las muestras deben almacenarse a 4 °C para evitar cualquier descomposición, desgasificación o evaporación.

En general, el laboratorio encargado de realizar el análisis dará las respectivas recomendaciones en el volumen de muestreo y en la preservación.

Al momento de ser enviadas al laboratorio, las muestras deben ser empacadas adecuadamente para prevenir que se rompan durante el envío.

10.3 En aguas subterráneas

En la actualidad el uso de isótopos en aguas subterráneas, constituye una herramienta que complementa los análisis hidroquímicos, es indispensable para cualquier estudio hidrogeológico. Su funcionalidad se basa principalmente en obtener información de aguas

antiguas (origen y edad del agua), interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad), intrusión de aguas marinas en acuíferos costeros, vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, etc.

La utilización de los isótopos estables del agua, como deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O), son muy útiles para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterráneas y distinguir aguas con una composición química similar, ya que son trazadores ideales porque son parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson et al., 2006). Estos también pueden determinar el origen del agua, el mecanismo de recarga del agua subterránea, el cálculo de la edad (a corto plazo debido a la variación estacional y a largo plazo si se desea diferenciar paleo-aguas), (Geyh, 2002).

Otros isótopos estables utilizados son los isótopos del carbono, el ^{13}C y el ^{12}C , los cuales son trazadores relevantes en la cuantificación de las interacciones agua-roca, además de identificar la proporción de CO_2 biogénico y de los carbonatos en el agua, y determinar los ambientes geológicos iniciales de la recarga de agua subterránea (Geyh, 2002).

Se consideran los isótopos de nitrógeno, como el ^{15}N y el ^{14}N , los cuales se comportan como trazadores antrópicos que permiten determinar la fuente de contaminación de aguas subterráneas. Así mismo, los isótopos del azufre, el ^{32}S y el ^{34}S , que permiten diferenciar entre las fuentes marinas, las evaporitas y las volcánicas del sulfato disuelto en el agua subterránea (Krouse 1980, en Geyh, 2002).

Con respecto a los isótopos radiactivos, su principal campo de aplicación es la datación isotópica. El

^3H , se ha convertido junto con los isótopos estables en una buena herramienta para la caracterización de la recarga, especialmente en acuíferos a poca profundidad, debido a su presencia en la atmósfera por las pruebas de bombas termonucleares de los años 50 y principios de los 60. Sin embargo, la concentración del ^3H en la atmósfera y en las aguas subterráneas ha disminuido al punto que es difícil distinguirlo de los niveles naturales, por lo tanto deja su uso relegado ante otras técnicas. Actualmente se utiliza el $^3\text{H}/^3\text{He}$ (derivado del ^3H) y los clorofluorocarbonados (CFC) para cuantificar la *recarga moderna* del agua subterránea (agua de menos de 60 años de edad), los CFC son utilizados para análisis en mezcla y contaminación, y el ^3He para mediciones de edades más exactas. Tanto el método de ^3H como los CFC deben ser manejados a la par, para trabajar en una escala de tiempo más amplia y aumentar la precisión de las edades (IAEA, 2006).

Otro radioisótopo representativo es el ^{14}C , el cual proporciona una edad del agua subterránea antigua (hasta 40000 años de antigüedad) a partir de la datación del contenido de carbono inorgánico disuelto. Otros isótopos como ^{36}Cl , ^{81}Kr y ^{129}I , también son utilizados para datación de aguas antiguas en cuencas extensas (Geyh, 2002), (*el ^{81}Kr se utiliza para datar aguas que pueden alcanzar hasta un millón de años* (IAEA, 2019)), el ^{85}Kr también es utilizado para conocer edades del agua debido a su aumento en la atmósfera en los últimos años (IAEA, 2006). Los isótopos del uranio son relevantes en los estudios de mezclas y proporcionan también buenos resultados en la datación del agua subterránea.

Considerando lo anterior, en esta sección se presentan una explicación de algunas prácticas de campo

de isótopos estables y radiactivos, válidos para cualquier objetivo de monitoreo en las aguas subterráneas.

10.3.1 Selección de los puntos de monitoreo

Para el muestreo de isótopos en el agua subterránea, se debe considerar la hidrodinámica de las aguas subterráneas. Además, conocer el inventario de puntos de agua para poder seleccionar los puntos de muestreo. Este inventario debe contar con información básica del pozo como coordenadas, diseño, características de construcción, unidad acuífera captada, medio de extracción, entre otros.

Los puntos de muestreo pueden ser pozos o aljibes. También se pueden muestrear manantiales, sin embargo, hay que tener en cuenta si son permanentes o perennes, esto para decidir si un muestreo ocasional es suficiente o si por el contrario se requiere un muestreo y análisis frecuente (esto es, con intervalos de meses o semanas), (Geyh, 2002).

10.3.2 Frecuencia de monitoreo

Para seleccionar una frecuencia apropiada se deben conocer previamente las hipótesis de la hidrodinámica de los acuíferos por investigar. Una práctica común es tomar muestras justo antes y al final de la temporada de recarga de agua subterránea principal (Seiler, 2002).

Sin embargo, a medida que se cuenta con información se pueden ir reajustando los tiempos de medición.

10.3.3 Tipo de mediciones

Se pueden adelantar estudios isotópicos en la zona no saturada (puede proporcionar información sobre la recarga subterránea) y en la zona saturada con mediciones directas ya sean en pozos de observa-

ción o pozos de producción, y aljibes o manantiales, siempre y cuando conozca la situación hidrogeológica de estos puntos de observación.

En el caso de muestrear en zona no saturada, las muestras se toman directas del suelo. En este caso, el agua debe ser extraída utilizando celdas de succión, o mediante la extracción de agua de los sedimentos, por reemplazo, calentamiento o disolución (Seiler, 2002).

Si se muestrea el acuífero, las mediciones deben ir extrayendo directamente el agua. Las mediciones isotópicas se deben acompañar de análisis fisicoquímicos, ya que se utilizan para hacer interpretaciones que reducen la ambigüedad de los resultados isotópicos. Se deben hacer mediciones in situ de parámetros como pH, potenciales redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica. También realizar la medición de cloruros, esta medición es el método más simple y natural de datar químicamente el agua.

Según Geyh (2002), el Cl es un trazador conservativo, que no está sujeto ni a adsorción ni a desorción durante su transporte, por lo que la relación entre la concentración de cloruro y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ o de $\delta^2\text{H}$ muestran el efecto de varios procesos tales como la mezcla de agua subterránea, la disolución de halita o la mezcla de agua salina, agua de mar o agua salobre.

En la hidroquímica, se deben realizar también mediciones de iones mayoritarios, considerando la evolución que las especies iónicas tienen en el agua subterránea, de acuerdo con el tipo de roca que interviene.

10.3.4 Materiales y equipos

El muestreo de isótopos en las aguas subterráneas se puede realizar usando dispositivos eléctricos, mecánicos o manuales.

Se encuentran en el mercado los bailers, para muestrear manualmente en el pozo o aljibe, sin modificar la calidad y la representatividad de la muestra (Figura 10-29). También pueden ser utilizadas bombas para extraer el agua de los pozos: como son las bombas peristálticas, bombas eléctricas sumergibles o bombas tipo-bladder o tipo vejiga.



Figura 10-29. Toma de muestras de agua subterránea de un piezómetro a través de un bailer.
Fuente: CVC.

Para mediciones in situ de parámetros como pH, potenciales redox, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica, se pueden utilizar sensores multiparamétricos (Figura 10-30). En este caso, la muestra se puede verter en un vaso de precipitados e introducir el dispositivo, o usar un flujo continuo de celdas con electrodos de registro. También existen dispositivos que miden estos parámetros directamente dentro del pozo.



Figura 10-30. Medición in situ de parámetros fisicoquímicos utilizando una sonda multiparamétrica.
Fuente: CRQ



Monitoreo de agua subterránea utilizando bomba peristáltica.  (Solinst, 2021)

Si se extraen muestras de la zona no saturada, se pueden utilizar lisímetros o celdas de succión que están formados por materiales inertes como cerámica y sintéticos. Para estos últimos hay que considerar que los tamaños de los poros se adapten a los tamaños de los sedimentos presentes en la zona no saturada. Unas celdas de succión con un tamaño de poro de 20 μm se adaptan muy bien a la mayoría de los sedimentos en la zona vadosa.

Específicamente para alcalinidad, se utiliza la valoración colorimétrica química utilizando kits de campo de alcalinidad comercialmente disponibles. El oxígeno disuelto (OD) se mide utilizando una membrana comercial o sensor óptico, o por titulación de Winkler (IAEA, 2014).

En la sección 9.2 Monitoreo de calidad se presenta una descripción de estos instrumentos.

Con respecto a los envases para el muestreo, estos deben estar diseñados de un material adecuado que evite

la pérdida de evaporación y difusión o el intercambio de agua con otros alrededores. Se recomienda que sean envases que no hayan sido usados con anterioridad.

Los envases más seguros para el almacenamiento son las botellas de cristal, que permiten el almacenamiento durante al menos una década, siempre y cuando el cierre no se rompa. Igual, se pueden utilizar envases de PEAD cuando los periodos de almacenamiento son del orden de meses. No se deben utilizar recipientes de baja densidad debido a que el agua y el dióxido de carbono se pueden difundir fácilmente a través de estos. Específicamente para muestreo de ^{14}C , los frascos deben ser de cristal.

Se recomienda que estos envases tengan cuellos estrechos y tapas con cierres positivos, además de tapones o arandelas de plástico, neopreno, etc., para evitar la evaporación.

Además, se debe contar con un GPS para la georreferenciación del punto de muestreo. Otros materiales por utilizar son libreta de campo, formatos, lápices, marcadores, cinta, rótulos para marcar botellas y guantes.

10.3.5 Procedimiento para toma de datos

Cuando se realice el muestreo, se debe evitar el fraccionamiento isotópico a través de la evaporación o de pérdidas difusivas del vapor de agua y/o el intercambio isotópico con los alrededores y con el material del envase.

Se presentan algunas recomendaciones para que el muestreo sea exitoso, sin embargo, estas deberán ser complementadas con las instrucciones específicas que proporcione el laboratorio que realice el análisis de las muestras. Esta información ha sido recopilada de las guías de la OIEA-Manual para la Dirección de

un Laboratorio de Hidrología Isotópica, de Clark y Fritz (1997) en Mook (2002) y de IAEA (2014).

10.3.5.1 Toma de muestras

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones cuando se recolectan las muestras de pozos, aljibes o manantiales.

- Los puntos de muestreo deben ser identificados y ubicados con coordenadas y cota, ya que se recomienda estar nivelados con precisión centimétrica. La cota debe estar nivelada a una base de medición (BM).
- Registrar las condiciones del punto y las condiciones atmosféricas presentes en la región. Si se cuenta con algún pluviómetro cerca, se debe registrar la precipitación media mensual y la temperatura promedio de la zona.
- Medir la profundidad del nivel piezométrico y la profundidad de muestreo.
- Antes de iniciar, el equipo de medición debe ser descontaminado.
- En el caso de muestrear pozos o aljibes, el punto debe ser purgado para asegurar la eliminación del agua estancada dentro de la perforación, para lo cual se recomienda que este sea bombeado lo suficiente para eliminar el agua estancada. Se deben eliminar por lo menos tres volúmenes de la cubierta del agua o hasta que las variables como el pH, conductividad eléctrica y la temperatura se hayan estabilizado (IAEA, 2014). La Tabla 9-6, presenta los criterios para definir el final de la purga por el método de estabilización de parámetros.
- Se recomienda que los parámetros como conductividad eléctrica, temperatura, pH y oxígeno disuelto se controlen en una celda de flujo continuo durante la purga (IAEA, 2006).
- Para medir la conductividad, el equipo utilizado debe calibrarse en el laboratorio antes de su uso en el campo. Un estándar de calibración con una CE de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C es suficiente para la mayoría de las aguas subterráneas, la muestra se puede verter en un vaso de precipitados o usar una celda de flujo con un electrodo de conductividad insertado. Una vez que las lecturas de EC sean estables, se registra la conductividad y la temperatura de la muestra de agua.
- En el caso del pH, los medidores deben operarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante y calibrarse antes del muestreo de campo. Por lo general, se usan dos soluciones tampón de pH estándar para esta calibración que abarca el rango esperado (pH 4, 7 y 10). Su medición se hace insertando el electrodo del equipo en la muestra (vaso de precipitados o preferible una celda de flujo continuo) y se debe esperar a que las lecturas de pH se estabilicen. Registrar el pH a dos decimales. Después de completar las mediciones, enjuagar, limpiar el electrodo y guardar en una solución de almacenamiento adecuada.
- En el caso de la alcalinidad se mide mediante valoración colorimétrica química utilizando kits de campo de alcalinidad disponibles comercialmente, los cuales cuentan con las instrucciones de medición.
- El oxígeno disuelto (OD) se mide usando una membrana comercial o un sensor óptico, o mediante valoración de Winkler. Los sensores de OD son los más convenientes para el uso en el campo, estos están calibrados en el campo (sensores de membrana que usan cámaras 100 % HR) o no requieren ninguna calibración en absoluto (sensores ópticos de DO). Las muestras bombeadas a través de una celda de flujo son óptimas para lograr lecturas estables. El

OD se registra en mg/l y % de saturación de O₂ (si se incluye un sensor de temperatura).

- Una vez se ha completado la purga, como lo indica la estabilidad de los parámetros de campo y se han preparado los recipientes limpios para las muestras, se procede a recolectar la muestra de agua subterránea. Como se mencionó anteriormente, las muestras de agua se pueden recolectar usando bombas para extracción exclusiva de las muestras o bailers. También pueden utilizarse las bombas con que ya cuentan los pozos.
- El punto de muestreo debe ubicarse lo más cerca posible de la boca del pozo, aguas arriba de tanques de almacenamiento de agua y del sistema de tratamiento de la cabeza del pozo (Figura 10-31).



Figura 10-31. Toma de muestras de agua subterránea directa de la boca de pozo-CORPOGUAJIRA.

- Se recomienda purgar una o dos veces los frascos con el agua extraída del pozo, antes de llenarlos.
- Se deben registrar los datos de temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y potencial redox del agua muestreada, las cuales son esenciales para la interpretación. Para las muestras de solución salina,

es útil registrar los datos de la conductividad eléctrica con la muestra.

- Etiquetar el frasco de la muestra con todos los detalles y cerrar bien para evitar su evaporación. Rotular el frasco, colocar un código sencillo de identificación, lugar de muestreo y sus coordenadas, fecha y hora de recolección y profundidad de muestreo. Se recomienda rotular también el tapón de la botella, repitiendo el código utilizado para la identificación del punto de muestreo.
- Toda la información debe ir referenciada en una *libreta de campo* y en un *formato para recolección de muestras* (Anexo 10-4). Se deben reportar la apariencia de la muestra en el momento de la recolección (por ejemplo, color, claridad y olor), resultados del análisis en el sitio como pH, conductividad, temperatura y nombre (o iniciales) de la persona que recogió la muestra.

Dependiendo del isótopo de interés, hay que tener en cuenta (IAEA, 2014), (Vargas & Bobadilla, s.f.), (Tecnología y Recursos de la Tierra, S. A. L., 1991):

Análisis de ²H y ¹⁸O

En el análisis de ²H y ¹⁸O, se recolectan entre 20 a 50 ml de agua en frascos de vidrio color ámbar, los cuales deben llenarse dejando un espacio de ~5 %. Después de la recolección se debe tapar el frasco inmediatamente.

Muestreo de ³H

Se recomienda el muestreo entre 500 a 1000 ml.

Muestreo de ¹³C/¹²C y ¹⁴C

Para el caso de muestreo de ¹³C/¹²C y ¹⁴C en carbonatos disueltos se debe conocer la composición química de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos presentes en el agua para ser muestreada, por lo que se deben hacer mediciones de temperatura, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y potencial redox.

Muestreo ^{14}C y ^{13}C por AMS

Cuando se aplica AMS, se requieren 2 mg aproximados de C inorgánico, por lo tanto, generalmente se necesitan de 100 a 500 ml de agua filtrada dependiendo de la concentración de carbono inorgánico disuelto.

Las botellas de muestra deben ser de PEAD y se deben llenar completas hasta el borde y sellarlas de inmediato. Para la recolección de la muestra se deberá recoger el agua usando botellas de plástico sumergido en un contenedor que desborde de agua. Las muestras deben conservarse para eliminar la ac-

tividad microbiana agregando cinco gotas de solución I₂-KI por muestra de 100 ml. Esta solución de I₂-KI se puede preparar disolviendo 1.5 g de I₂ y 3 g de KI en 100 ml de agua desmineralizada. Otra posibilidad es agregar 2 a 3 gotas de solución saturada de HgCl₂. Si se opta por no conservar las muestras, se deben refrigerar preferiblemente y analizar dentro de los 30 días.

Posteriormente en el laboratorio, el carbono inorgánico disuelto se debe extraer en un sistema cerrado (Figura 10-32).

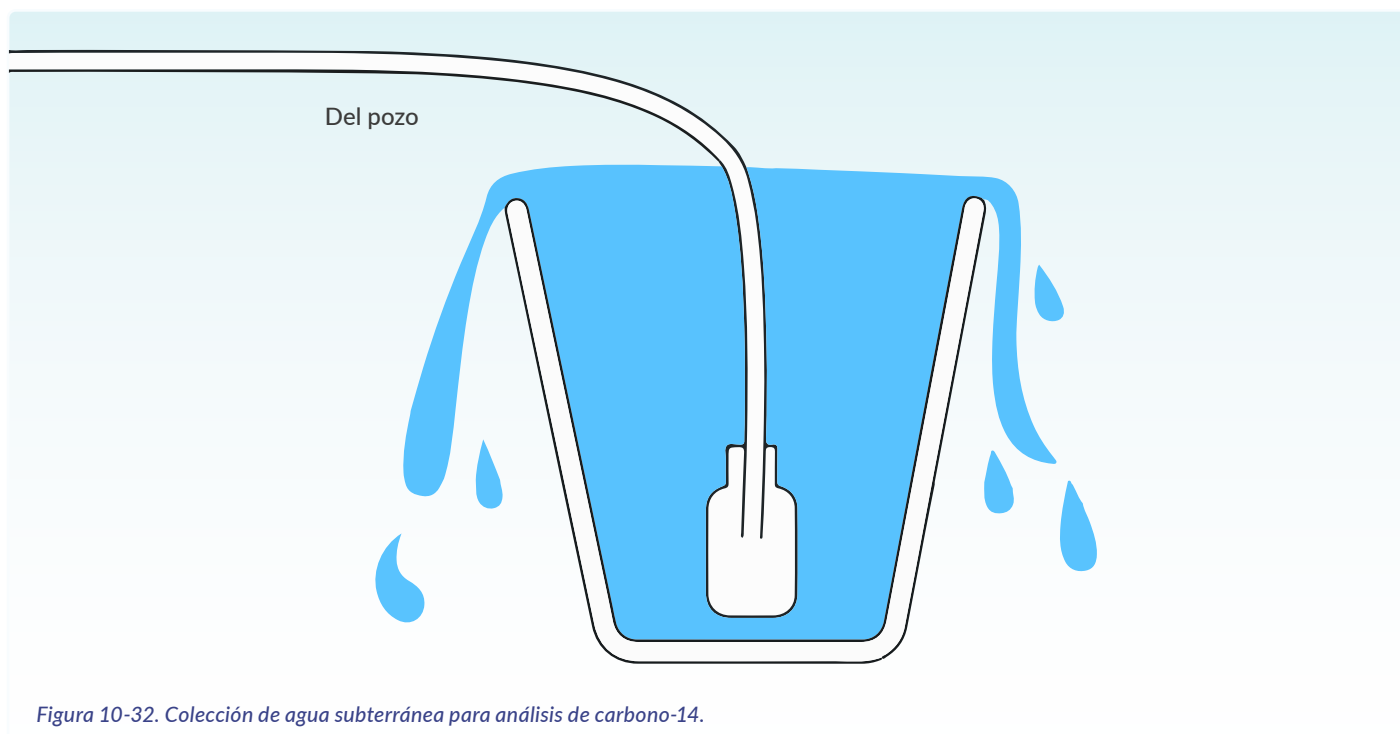


Figura 10-32. Colección de agua subterránea para análisis de carbono-14.

Muestreo ^{14}C y ^{13}C por LSC

Cuando se aplica el método de conteo de centelleo de líquidos (LSC), se requieren alrededor de 2.5 g de carbono. Esta cantidad de carbono se obtiene precipitándolo in situ a partir de un volumen de muestra de 40-60 l, dependiendo de la alcalinidad del agua.

Se debe llenar el recipiente hasta la parte superior con agua subterránea, insertar un agitador y cerrar la tapa. Agregar 50 ml de hidróxido de sodio (NaOH) concentrado, libre de carbonato para elevar el pH de la muestra a 11 unidades aproximadas (el hidróxido de sodio, se debe embotellar en alícuotas

en un laboratorio antes de la campaña de muestreo). Si es necesario, confirmar el pH elevado de la muestra utilizando papel de prueba de pH o un medidor de pH. Después de agregar hidróxido de sodio, se debe minimizar la exposición de la muestra a la atmósfera

para que el dióxido de carbono atmosférico no contamine la muestra. Después se debe agitar la muestra con el agitador y agregar alrededor de 5 g de sulfato de hierro lo que facilitará la formación de precipitado de carbonato (Figura 10-33).

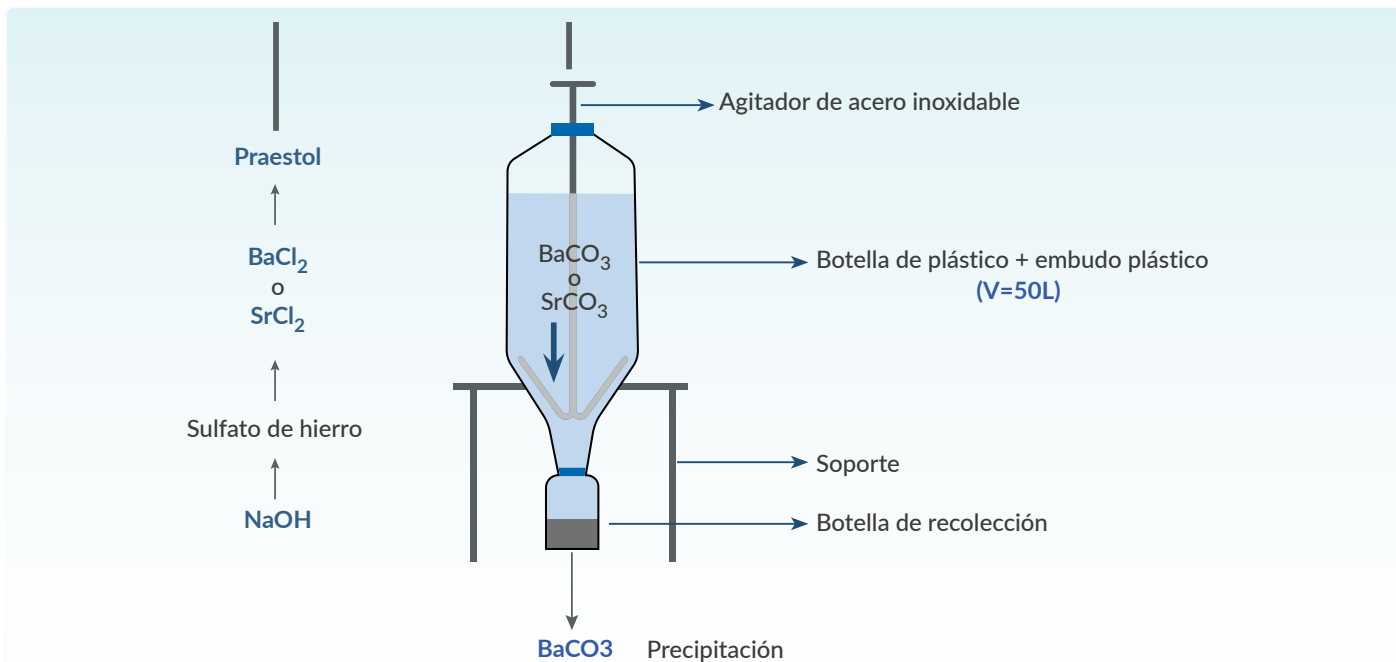


Figura 10-33. Colección de agua subterránea para análisis de carbono-14.

Se deben agregar 150 g aproximados de cloruro de estroncio o cloruro de bario en polvo para formar una fina nube de carbonatos, cerrar la tapa y revolver la muestra. Se debe verificar la precipitación completa agregando una pequeña cantidad (25-30 g) de cloruro en polvo a la parte superior del tanque sin agitar. Si aparece alguna nubosidad, lo que indica una mayor precipitación, se debe agitar más cloruro en polvo y en la medida de lo posible solución de hidróxido de sodio para garantizar la precipitación completa. Se deben agregar 40 ml de solución de praestol a la muestra (es una poliacrilamida y se usa como coagulante para acelerar

este proceso). Después de la adición de todos estos reactivos, el precipitado se comienza a depositar rápido en el fondo del aparato, llenando la botella de un litro unida al fondo del recipiente. Cuando todo el precipitado se asienta, se inserta un tapón de goma colocado en el extremo de una varilla de acero y el recipiente se cierra en la parte inferior, por lo que se puede quitar la botella llena de un litro. Si es necesario, se deben unir más botellas y recoger todo el precipitado.

Finalmente, tapar bien y etiquetar adecuadamente las botellas, indicando el número de muestra, la fecha y otros detalles relevantes.

Muestreo de ^{15}N

Para recolección de muestreo de ^{15}N , el volumen de muestra por tomar dependerá de la concentración química de nitratos del agua. Se requieren del orden de 4-5 mg/l de nitratos presentes en el agua para el análisis. Si esta concentración es menor, se debe tomar un mayor volumen de muestra, del orden de 2 a 5 litros. Los volúmenes de las muestras de agua respectivos que se necesitan se pueden calcular a partir del análisis químico. También es posible concentrar el NO_3^- o el NH_4^+ respectivamente mediante resinas de intercambio aniónico o catiónico.

Muestreo de ^{34}S

Si se recolecta ^{34}S , se requieren aproximadamente 100 mg de S, el cual debe filtrarse antes de llenarse la botella. Se pueden concentrar el SO_4^{2-} en resinas aniónicas.

Muestreo de ^{36}Cl

Con respecto al análisis de ^{36}Cl , se debe disponer de unos 30 mg de cloro, puesto que la mayor parte del agua potable tiene entre 10 y 100 mg/l de cloro disuelto, una muestra de unos pocos litros es suficiente. Se mezcla nitrato de plata con el agua de la muestra y se forma AgCl , que precipita. Este precipitado se coloca en una botella fuera del alcance de la luz solar y del calor excesivo, hasta que se haya completado el análisis.

Análisis de isótopos de gases nobles

Se debe coleccionar muestras de agua en tubos de cobre con abrazaderas especialmente diseñadas, la IAEA puede dar mayor información sobre los muestreadores apropiados. En general, se debe evitar el intercambio de gases con la atmósfera y la desgasificación por liberación de presión, por lo que se debe generar una conexión desde una salida de agua a los

muestreadores. Se recomienda bombear agua desde el pozo o el manantial utilizando un tubo de plástico transparente para garantizar visiblemente que no haya burbujas de aire atrapadas en el agua que fluye.

También se pueden utilizar muestreadores de difusión que consisten en una pieza corta de tubo de silicona con tubos cortos de cobre en cada extremo, el cual es sumergido a la profundidad deseable para el muestreo. Se debe dejar por más de 24 horas para el intercambio de gases a través del tubo de silicona para lograr el equilibrio de los gases dentro del muestreador con el contenido de gas disuelto del agua subterránea. Antes de recuperar los muestreadores, se debe registrar la temperatura del agua y la presión total del gas disuelto a la misma profundidad utilizando sondas apropiadas. Al recuperar la muestra hay que cerrar las abrazaderas internas para sellar la muestra de gas en el interior. Esta técnica es simple y eficiente, sin embargo, las muestras deben retirarse y sellarse rápido antes de que ocurra el intercambio de gases en la superficie. También se puede utilizar un muestreador de contacto, para un muestreo directo de gas en el campo.

Muestreo de ^{39}Ar

Se necesitan unos 2000 ml de gas, estas muestras deben llegar de inmediato al laboratorio después de su recolección, para poder medir, también, ^{37}Ar . Para el caso de ^{85}Kr necesitan unos 20 μl de gas. Finalmente se debe etiquetar la muestra, fecha, hora y temperatura.

Muestreo de $^3\text{H}/\text{He}$

Las muestras se deben recoger en tubos de cobre con abrazaderas especialmente diseñadas. A estos tubos debe llegar el agua extraída directa del pozo, aljibe o manantial a través de una manguera de plástico transparente conectada a los mismos. Es

importante eliminar las burbujas de aire que puedan quedar atrapadas. Cuando esté listo para recolectar la muestra, cerrar el flujo de salida del extremo del tubo de cobre primero, apretando la abrazadera mientras el agua aún fluye a través del tubo. Repita el proceso para cerrar la abrazadera en el extremo de entrada del tubo, deteniendo así el suministro de agua (IAEA, s.f).

Se debe etiquetar la muestra con una cinta adhesiva y con un marcador, se recomienda colocar el rótulo en el marco metálico del tubo de cobre. Se debe registrar el número de muestra, fecha, hora y temperatura.

Muestreo de clorofluorocarbonados

Si se muestrea CFC, se deben tomar generalmente duplicados o triplicados. Se utilizan frascos de vidrio color ámbar con tapas especiales forradas de aluminio. Para la recolección se debe contar con una manguera de plástico que extraiga directa el agua del punto de monitoreo a las botellas de recolección a través de un pequeño tubo de metal que se encaja dentro de la botella, tanto la manguera como el tubo de metal deben estar conectados y se debe asegurar que no haya burbujas en la manguera. Luego, se deben sumergir las botellas y las tapas de aluminio por unos 10 o 15 minutos dentro de un recipiente de metal

que debe ser llenado hasta que se desborde con el agua extraída del pozo, aljibe o manantial. Después se deben tapan las botellas de muestra, llenas bajo agua para asegurarse que no exista aire (IAEA, s.f).

Muestreo hidroquímico

Para la toma de muestras hidroquímicas (considerando que deben acompañar los análisis isotópicos), remitirse a la sección 9.2 Monitoreo de calidad. En general es necesario la filtración de las muestras en campo, se recomienda el uso de un filtro de membrana de $0.45\ \mu$ (o más pequeño) que se encuentra disponible en muchas configuraciones (por ejemplo, filtros de jeringa, vacío, barril, filtros de cartucho). Para aguas turbias, el uso de un prefiltro ($100\text{-}300\ \mu\text{m}$) ayuda a reducir la obstrucción del filtro de $0.45\ \mu\text{m}$ (Figura 10-34).

Después de filtrar la muestra, viértala en un recipiente de PEAD de 125 ml para cationes y de 125 ml para aniones. Para los cationes, acidificar la muestra agregando unas gotas de ácido nítrico concentrado, agitar suave y asegurarse de que el pH sea <2 (los papeles de pH son adecuados). Para los aniones, la muestra de agua no debe estar acidificada. Tapar y etiquetar herméticamente las botellas de muestra y almacenar en frío, si es posible.



Figura 10-34. Proceso de filtrado de muestra de agua subterránea utilizando equipo que incluye embudo de filtración, frasco de vacío y una bomba de vacío.
Fuente: Ana María Vesga

Es necesario ponerse en contacto con el laboratorio que va a realizar el análisis, para obtener instrucciones específicas y más detalladas del muestreo, ya que las metodologías pueden variar.

Si se va a muestrear en la zona no saturada hay que considerar que en la práctica de extracción del agua de los sedimentos de la zona vadosa, debe realizarse en sistemas cerrados, hasta que el sedimento se seque por completo para evitar el fraccionamiento isotópico y poder contar con una distribución uniforme de la concentración isotópica del agua contenida en los poros (Seiler, 2002).

10.3.5.2 Estabilización, almacenamiento y transporte de las muestras

Cuando se trata de isótopos estables, las muestras no requieren filtración o preservación, sin embargo, estas se deben conservar de tal forma que no exista fraccionamiento isotópico con anterioridad al análisis, por lo que siempre las botellas deberán contar con tapón impermeable a la fase de vapor. Las muestras deben ser almacenadas en un lugar fresco hasta su análisis para evitar su evaporación. Para lugares donde

las condiciones de humedad y temperatura sean altas, se recomienda que las muestras sean refrigeradas en el tiempo que se demore su envío.

Para el caso de cálculos de fracciones del CID en el agua y sus respectivas mediciones del contenido de ^{14}C o el cociente $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ se debe discutir con el laboratorio encargado de los análisis la mejor forma de recolección de las muestras, ya que estos requieren de técnicas de estabilización antes de ser analizadas. También se deben tener en cuenta las recomendaciones del laboratorio para la preservación en caso de muestrear ^{15}N .

Para el caso de los N, S y gases como Ar y Kr, las muestras deben almacenarse a 4 °C para evitar cualquier descomposición, desgasificación y evaporación.

Utilizar una cinta de plástico y otro material impermeable para sellar la tapa del frasco de muestra, ayudan a prevenir fugas accidentales de muestra (IAEA, 2013).

En general, el laboratorio encargado de realizar el análisis dará las respectivas recomendaciones en el volumen de muestreo y en la preservación.

Al momento de ser enviadas al laboratorio, las muestras deben ser empacadas adecuadamente para prevenir que se rompan durante el envío.



Isla de San Andrés
📍 Jenny Marín

11. Monitoreo marino-costero

El monitoreo marino-costero comprende una alta variedad de técnicas de muestreo asociadas al objetivo del monitoreo y al ecosistema estratégico por caracterizar. Para efectos de este protocolo, se presentan las metodologías implementadas en la Unidad de Laboratorios Ambientales de Calidad Ambiental Marina (LABCAM) del INVEMAR, que son aplicadas por la REDCAM.

11.1 Calidad de aguas

A continuación, se describe el procedimiento para el monitoreo marino-costero de calidad de aguas.

11.1.1 Selección de los puntos

La selección de los puntos para el monitoreo de la calidad de las aguas y sedimentos está estrechamente relacionada con el objetivo del muestreo, las condiciones físicas del lugar, la presencia de ecosistemas estratégicos como manglares, corales, playas, pastos marinos, estuarios, lagunas costeras. Además, hay tensores ambientales que pueden alterar las condiciones fisicoquímicas y ser agentes de entrada de contaminantes como lo son las actividades económicas que se desarrollan en los municipios costeros (actividad

portuaria, descarga de vertimientos, turismo, agricultura, minería, etc.), la pesca artesanal e industrial, la desembocadura de tributarios, entre otros.

11.1.2 Frecuencia

Para determinar la frecuencia y el momento del muestreo, es conveniente considerar dos aspectos relevantes: el régimen pluviométrico de la zona y la dinámica de las mareas. En el caso de la región Caribe, la presencia de temporadas secas y lluviosas son determinantes para la entrada de contaminantes a las aguas marinas y costeras por efectos de la escorrentía superficial y descarga de tributarios, por lo que se recomienda realizar muestreos que caractericen estos regímenes de lluvia, considerando los períodos de transición, es decir, mínimo entre 3 y 4 veces en el año, dependiendo de su carácter monomodal o bimodal.

Para la región Pacífico las temporadas pluviométricas no son marcadas, pero es determinante la dinámica de mareas que dependen de factores gravitacionales relacionados con el movimiento oscilatorio de la Tierra y su cercanía a la Luna (IDEAM, 2017). La presencia

de pleamares (marea alta) y bajamares (marea baja) influye de manera directa en la concentración de los contaminantes en la franja marino-costera, por lo cual se recomienda caracterizar la calidad de las aguas en estas dos condiciones de marea.

En el marco del REDCAM, se realizan dos muestreos en cada uno de los departamentos costeros del país.

11.1.3 Tipo de mediciones

Las mediciones se realizan de manera puntual; en el agua pueden realizarse en superficie (a 25-30 cm de profundidad) o a lo largo de la columna del agua, según el objetivo de la medición. Para cada variable se contemplan metodologías y equipos que son descritos más adelante.

11.1.4 Equipos

Para la toma de muestras en la columna de agua se utilizan botellas capaces de tomar muestras a la profundidad requerida, en la Tabla 11-1, Figura 11-1 y Figura 11-2, se presentan algunas características de las botellas existentes para muestrear la columna de agua.

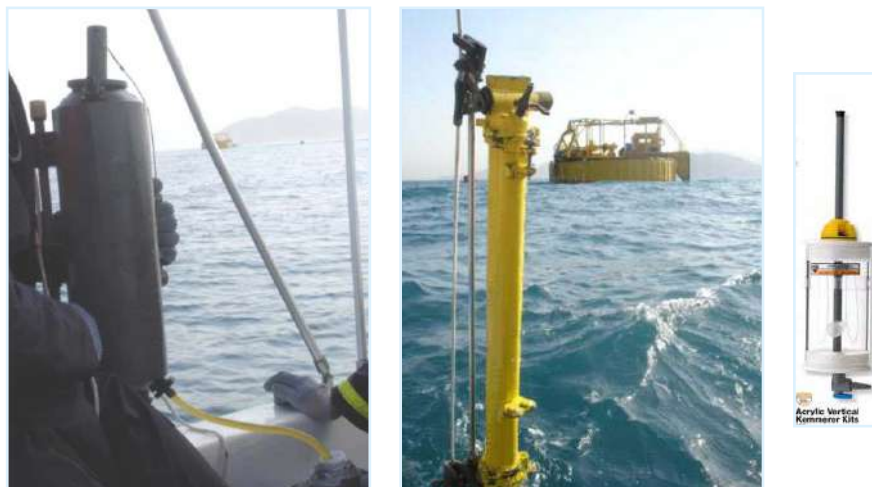


Figura 11-1. Botellas oceanográficas. A: Niskin. B: Nansen. C: Kemmerer. Usadas para la extracción de muestras de agua, operadas desde una embarcación menor.

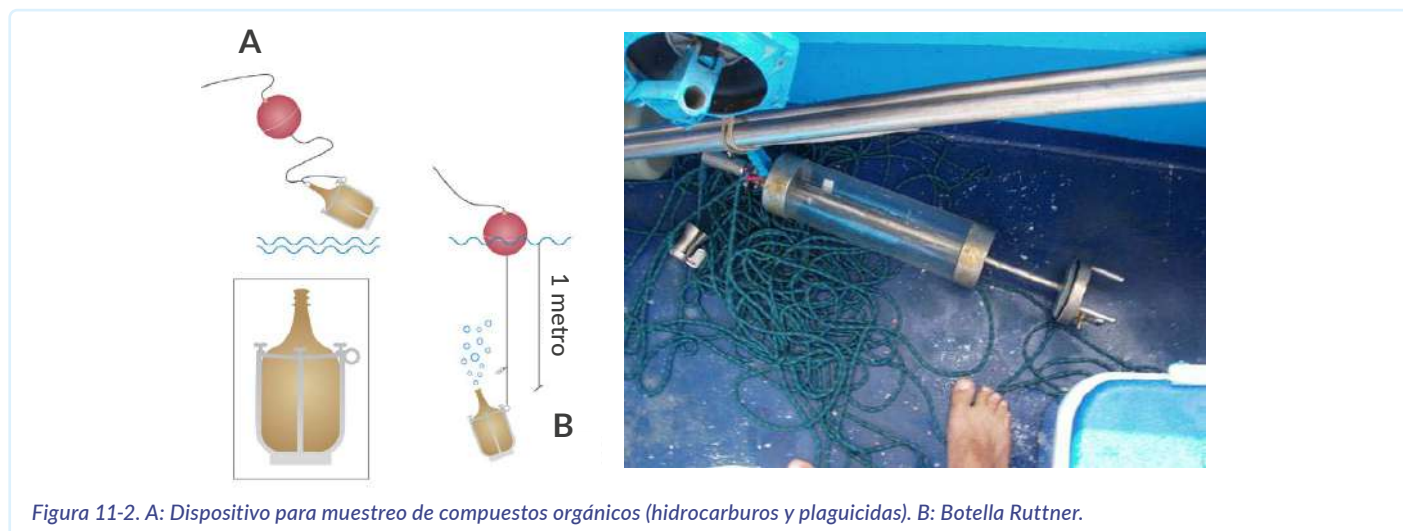


Figura 11-2. A: Dispositivo para muestreo de compuestos orgánicos (hidrocarburos y plaguicidas). B: Botella Ruttner.

Tabla 11-1. Equipos utilizados para el muestreo de aguas¹².

Equipo	Aplicación	Material de construcción y de contacto con la muestra	Ventajas	Desventajas
Botella Nansen	Colecta de fitoplancton, compuestos químicos (*)	Metal-recubierto con capa de teflón	Se puede usar en serie.	Colecta poco volumen de muestra.
Botellas Niskin	Compuestos químicos (*) Bacteriología Fitoplancton Zooplancton	PVC-Acrílico	No genera contaminación metálica, son las más comunes.	No son adecuadas para análisis de compuestos orgánicos.
Botella Kemmerer	Compuestos químicos (*) Zooplancton Bacteriología	PVC Acrílico-plástico o Latón-bronce	No genera contaminación metálica. No requieren mensajero.	No son adecuadas para grandes profundidades (> 20 m). Toxicidad debido al metal.
Botellas Van Dorn	Compuestos químicos (*) Bacteriología Fitoplancton Zooplancton	PVC	No generan contaminación metálica.	Capacidad fija, existen de 2 a 30 litros.
Botellas comunes	Compuestos químicos (*) y Bacteriología	Vidrio	Bajo costo.	No puede controlarse la profundidad del muestreo.
Bombas extractoras	Compuestos químicos (*)	Acero inoxidable	Puede coleccionar grandes volúmenes en forma continua; muestrea la columna en sentido vertical.	Existe la posibilidad de contaminación metálica y puede generar daño a los microorganismos.

(*) Los compuestos contaminantes tipo plaguicidas, tóxicos metálicos y orgánicos prioritarios, deben ser colectados con muestreadores que posean materiales de contacto tales como teflón, vidrio u otros que no contaminen la muestra.

12 Tomado del US. EPA.1982. *Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater.*

11.1.5 Procedimientos para la toma de muestras

A continuación, se presentan las recomendaciones para el alistamiento de materiales, la medición de parámetros in situ y la toma de muestras a diferentes profundidades en ambientes marino-costeros.

11.1.5.1 Preparación del material y equipos de campo

Antes de iniciar una salida de campo, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Los recipientes para la recolección de muestras, deben ser lavados o esterilizados de acuerdo

con el tipo de muestra y variables por analizar (Figura 11-3). Para garantizar que los recipientes sean adecuados para el muestreo, se recomienda realizar controles para el lavado de material.

- Tener una lista de chequeo para verificar los materiales, equipos y reactivos requeridos para la toma y preservación de muestras.
- Verificar los equipos y dejar los respectivos registros en las cartas de control y uso de equipos.
- Alistar la cantidad de formatos, etiquetas y procedimientos de muestreo requeridos para la recolección de muestras.



Figura 11-3. Alistamiento de recipientes para el muestreo.

11.1.5.2 Medición de parámetros in situ

La medición de pH, conductividad, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en el agua superficial, se realiza de forma directa en el cuerpo de agua si el instrumento de medida lo permite. De lo contrario, se debe tomar la muestra de agua en un recipiente de plástico previamente enjuagado con la misma agua

que se va a medir y analizar de inmediato, debido a que estas variables se alteran por los cambios de temperatura. Para el caso de oxígeno disuelto, se debe evitar contacto prolongado con el aire. La sonda de medición se introduce en el recipiente plástico y una vez se estabiliza el resultado en el medidor, los datos deben ser registrados en el *formato de datos de campo*.



Figura 11-4. Toma de datos in situ en el departamento de Córdoba.

La profundidad en las estaciones marinas debe ser medida con un profundímetro o ecosonda.

11.1.5.3 Toma de muestras

Para la toma de muestras en campo, se recomienda realizar las siguientes acciones:

- Verificar los equipos en campo, con el fin de evidenciar que durante el transporte no se afectaron los instrumentos (Figura 11-5).
- Registrar en la casilla de observaciones las condiciones climáticas o de cualquier índole que ocurran antes y durante la toma de muestra que

puedan servir como suministro para la evaluación de los resultados.

- Recopilar los datos de campo en un formato para su custodia y posterior sistematización en la base de datos. Se recomienda diligenciar un formato con este fin y una cadena de custodia para muestras de agua.
- Si se trata de una estación nueva, se deben recolectar datos que permitan su descripción (coordenadas geográficas, descripción del área, datos in situ del primer monitoreo, entre otros).



Figura 11-5. Verificación de equipos en campo.

Toma de muestra superficial

Las muestras superficiales pueden ser tomadas directamente en la botella, para lo cual se debe introducir el recipiente de muestreo a 25-30 cm aproximados (medio brazo) por debajo de la superficie para

evitar la adhesión de películas de aceite o materiales flotante y orientar la boca de la botella en contra de la corriente; mantener la mano alejada del flujo, excepto en las muestras para análisis de grasas y aceite que se toman de la capa superficial de agua (Figura 11-6).



Figura 11-6. Toma de muestra superficial en el departamento de Nariño.

Cuando las muestras son tomadas en embarcaciones, la introducción del brazo en el agua se dificulta, al igual cuando se requieren muestras de profundidad se hace indispensable el uso de botellas de muestreo (Tabla 11-1) o extensores para botellas.

Toma de muestra a profundidad

Para obtener muestras de agua a profundidades determinadas, se emplean botellas colectoras dotadas de mecanismos de cierre para confinar la masa de agua que se encuentra a la profundidad de interés. Entre las botellas más comunes están las botellas Nansen o Niskin (Figura 11-1). En el caso de muestreo para análisis de Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y

Dispersos (HPDD), se debe emplear un dispositivo que consiste en una base de acero inoxidable en la cual se pone la botella, se ata a un flotador de un metro de distancia y se lanza al agua, por acción del mismo peso la tapa se desprende y se llena (Figura 11-2).

En estudios oceanográficos, se emplean normalmente botellas Nansen para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, pH, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos. Las botellas Van Dorn y Niskin, por tener capacidad de mayor volumen, son ideales para la obtención de muestras en el análisis de pigmentos fotosintéticos y contaminantes (pesticidas, metales pesados, etc.).

Las botellas de cierre horizontal son adecuadas para muestreos en cuerpos de agua con corriente (como ríos) ya que permiten el paso del flujo de agua o para coleccionar muestras de fondo en cuerpos de agua muy someros, son muy apropiadas para estudios de estratificación vertical.

En el caso de requerir muestras para el análisis de parámetros microbiológicos y oxígeno disuelto, deben ser las primeras muestras que se toman de la botella, se deja fluir una porción de agua (100 a 200 ml) que se desecha, luego se destapan y se llenan los frascos esterilizados. En el caso de medir el oxígeno por el método de Winkler, al extremo de la llave de salida de la botella debe unirse una manguera flexible, la cual se introduce hasta el fondo de la botella Winkler para evitar la formación de burbujas.

En el caso de muestras para la determinación de parámetros fisicoquímicos, una precaución sencilla que, sin embargo, no es adecuada en todos los casos, es llenar los frascos completos y taparlos de tal forma que

no haya aire sobre la muestra. Esto limita la interacción con la fase gaseosa y la agitación durante el transporte, evita así las modificaciones en el contenido de CO_2 y, por consiguiente, variaciones en el pH; el hierro tiene menos tendencia a ser oxidado y por tanto restringe las variaciones de color.

Si las muestras van a ser congeladas, los frascos se llenan, pero no completamente; el congelamiento a temperatura de $-20\text{ }^\circ\text{C}$ permite en general, un incremento en el período de almacenamiento. No obstante, es necesario controlar la técnica de congelamiento y deshelado para retornar la muestra a su equilibrio inicial, en este caso es recomendable usar recipientes plásticos.

Preservación de las muestras

La preservación y el almacenamiento de las muestras son parte del análisis que asegura su integridad (Figura 11-7), una vez que se recolecta en la fuente. Por lo general, los resultados analíticos son confiables en proporción al tiempo transcurrido entre su colecta y análisis.



Figura 11-7. Preservación de muestras de agua en campo.

Para garantizar la integridad de las muestras se debe asegurar que los envases estén bien sellados y protegidos de los efectos de la luz o el calor. Los métodos de preservación y almacenamiento incluyen una o varias de las siguientes operaciones: refrigeración desde su colecta, control del pH, filtración, adición de reactivos específicos (por ejemplo, HNO_3 para metales), etc. Según las variables por analizar, se realiza la preservación en campo o si es posible, se preserva en el laboratorio. Para mayor detalle se recomienda consultar el documento *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)*, (INVEMAR, 2003) donde se especifican los métodos de preservación para muestras de agua recomendados para los parámetros que se realizan en el laboratorio, el tipo de recipiente sugerido y el tiempo máximo de almacenamiento recomendado.

Almacenamiento y transporte de muestras

Las muestras deben ser transportadas con todos los registros de campo que aseguren su trazabilidad. Se debe evitar que el hielo empleado para preservar las muestras se descongele y las inunde. También, se recomienda cubrir las botellas con protectores plásticos para prevenir que se rompan por contacto entre ellas.

Se sugiere no emplear CO_2 en estado sólido debido a que el pH de las muestras puede variar o cuando se recolecten en recipientes de vidrio, estos se pueden romper.

11.1.5.4 Consideraciones para tener en cuenta antes y durante el muestreo

- Construir un plan de muestreo donde se especifiquen los parámetros por medir, las estaciones para caracterizar y los responsables.

- El sitio de recolección de la muestra debe ser representativo del sector por estudiar o acorde con los objetivos del estudio por realizar.
- Cuando la aproximación a la estación se realice en lancha, esta debe hacerse de forma lenta para no perturbar las condiciones de la estación antes de muestrear, sobre todo en sitios de poca profundidad o muy confinados.
- En general, si el sitio es poco profundo, hay que tener especial cuidado de no perturbar los sedimentos del fondo para evitar re suspender los sedimentos en la columna de agua, sea cual fuere el medio de transporte.
- La toma de muestras desde una lancha se debe realizar en la proa, para evitar la influencia del motor.
- Cuando la toma de muestra se realice en sitios con corriente, el proceso de muestreo se debe ejecutar en contra de la misma, para evitar la turbulencia provocada por las piernas del técnico, es decir, el agua no debe pasar por las piernas del investigador en dirección al recipiente de muestreo.
- Antes de la recolección, se purga el recipiente con agua del sitio, a excepción de las muestras para análisis microbiológico (cuyos frascos vienen previamente esterilizados) y para las muestras de grasas y aceites, hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas.
- En el caso de muestras de compuestos orgánicos (por ejemplo, hidrocarburos) se debe evitar la emanación de humos desde el motor de la embarcación.
- Si el muestreo se realiza en lancha, asegurar en lo posible, que la lancha se mueva muy poco durante la etapa de recolección.

- Para análisis microbiológicos, el volumen mínimo de muestra requerido es de 100 ml, las muestras deben ser protegidas de los rayos ultravioleta y de las altas temperaturas.
- El transporte de las muestras al laboratorio para análisis microbiológico, debe realizarse en el menor tiempo posible, manteniéndolas refrigeradas entre 2 a 6 °C y bajo condiciones higiénicas para evitar contaminación cruzada. Estas muestras deben ser procesadas en un máximo de seis horas, en ninguno de los casos deben superar las 24 horas de almacenamiento (APHA et al., 2012).

11.2 Calidad de sedimentos

A continuación, se describe el procedimiento para el monitoreo marino-costero de calidad en sedimentos.

11.2.1 Selección de puntos

Al igual que en la selección y ubicación de puntos para el monitoreo de calidad de aguas, para determinar la calidad en sedimentos marino-costeros, se contempla el objetivo del muestreo, la presencia de ecosistemas estratégicos y los sensores ambientales. Adicional, se considera la profundidad del punto, el tipo de sustrato por muestrear (arenas, lodos, restos biológicos) y la presencia de corrientes, características que pueden ser condicionantes en el muestreo.

11.2.2 Frecuencia

Para determinar la frecuencia y el momento del muestreo, es importante tener en cuenta factores como la tasa de sedimentación del área de estudio relacionada con la presencia de descargas de tributarios, fuentes terrestres de contaminación y el régimen pluviométrico. En el marco de la REDCAM, el monitoreo de calidad de sedimentos se realiza mínimo dos veces al año.

11.2.3 Tipo de mediciones

En sedimentos marinos, las mediciones se realizan de manera puntual, las muestras pueden tomarse en el sedimento superficial y a varias profundidades que dependen del instrumento utilizado.

11.2.4 Equipos

Existe una gran variedad de instrumentos de muestreo de sedimentos, tanto comerciales como de elaboración propia. Algunos son de utilización manual y otros están total o parcialmente automatizados. El uso de uno u otro instrumento de muestreo está definido en función de la profundidad del agua donde se realiza la toma de la muestra, el espesor de la capa de sedimento y la cantidad que se necesite recolectar para realizar las determinaciones, tal y como se describe en la NTC 5667/19 (ICONTEC, 2005).

El uso de equipos para la recolección de sedimentos, se basa en el objetivo requerido del estudio, con el fin de garantizar la integridad de la muestra o estructura del perfil sedimentario. Dentro de los instrumentos y equipos más comunes se nombran los siguientes:

11.2.4.1 Palas

Dependiendo del tipo de muestreo (superficial o profundidad) y los parámetros por medir, se pueden emplear diferentes tipos de palas (Figura 11-8). Las palas manuales sirven para la toma de sedimentos superficiales, no presentan un área definida y son de bajo costo. Las palas tipo draga como la Ekman y Van Veen tienen un área de muestreo entre 0.01 y 0.2 m² y son utilizadas para sedimentos de profundidad en ambientes costeros.



Figura 11-8. Tipo de palas para muestreo. A: Pala manual. B: Pala tipo draga Ekman. C: Dragas Van Veen.

11.2.4.2 Muestreador de plataforma

Los muestreadores de plataforma, usualmente tienen un área de muestreo entre 0.025 y 0.25 m² de la superficie del sedimento. Están contruidos de manera que la superficie del sedimento permanezca intacta durante el muestreo y se puedan tomar submuestras del mismo muestreador de plataforma. Trabajan de

manera eficiente siempre y cuando las tapas estén cerradas herméticamente para izado, permiten el flujo libre durante el descenso para reducir la onda de presión en el frente del muestreador. Dentro de los muestreadores más comunes se encuentra el Box Corer (Figura 11-9).



Figura 11-9. Box Corer.

11.2.4.3 Muestreador de gravedad

Los muestreadores de gravedad son ampliamente usados para estudios ambientales, se encuentran en una gran variedad de modelos, con diversas longitudes, diámetros de tubos y mecanismos de cierre. La mayoría de los muestreadores de gravedad tienen equipo de seccionamiento que permite que los núcleos sean fraccionados en los intervalos de profundidad deseada (entre capas de 1 a 2 cm),

inmediatamente después de realizado el muestreo. De esta manera, se puede analizar la distribución vertical del contaminante o de otros compuestos, obteniendo un panorama histórico de la contaminación. Entre los muestreadores de gravedad se han introducido muestreadores múltiples que tienen de 2 a 12 tubos nucleadores de 10 cm de diámetro o más (Figura 11-10). Esto permite tomar varias muestras paralelas y tener suficiente material.



Figura 11-10. Multimuestreador de gravedad (Multicore).
Fuente: (UWITEC, 2019).

11.2.5 Procedimientos para la toma de muestras

La recolección del sedimento se realiza después de la toma de las muestras de agua, para evitar alterar la columna de agua por la re suspensión del sedimento.

Para la toma de muestra superficial en playas, manglares o sedimentos marinos con equipo de buceo, se debe asegurar que el área de toma de muestra se encuentre sin material que pueda alterar la misma, como por ejemplo conchas, ramas, residuos plásticos u otros materiales.

Para la toma en área superficial, se debe usar una pala pequeña, tomar la cantidad requerida y considerar las siguientes recomendaciones de acuerdo con los análisis solicitados:

11.2.5.1 Análisis de contaminantes orgánicos (hidrocarburos, plaguicidas organoclorados y organofosforados, grasas y aceites, entre otros)

Recolectar con una pala de acero inoxidable aproximadamente 100 g de sedimento de la capa super-

ficial en un recipiente de vidrio o sobre una película de aluminio. En caso de usar botellas de vidrio, llenar máximo hasta 2/3 partes de la capacidad del recipiente, para permitir la expansión sin rotura durante su congelamiento.

Todo el material empleado debe ser previamente lavado con solvente (diclorometano, hexano).

11.2.5.2 Granulometría

Recolectar aproximadamente 200 g y colocarlos en una bolsa tipo *Ziploc*. No congelar la muestra.

11.2.5.3 Análisis de metales

Recolectar aproximadamente 100 g de muestra con palas de teflón y depositar en botellas plásticas de boca ancha o en bolsas plásticas tipo *Ziploc*. Todo el material empleado debe ser previamente purgado con HNO_3 .

11.2.5.4 Análisis microbiológico

Las muestras se deben recolectar con una pala estéril, y se deben depositar en bolsas resellables o *Whirl-pak*. Una vez tomada las muestras, deben ser analizadas dentro de las dos horas siguientes, en caso que no se analicen de inmediato, se deben mantener bajo refrigeración (2 a 6 °C) por un tiempo máximo de 24 horas.

En el caso de sedimentos de profundidad, los muestreos deben realizarse con dragas Ekman o Van Veen (Figura 11-8), o con muestreadores de plataforma. Dependiendo de los parámetros solicitados y el volumen de la draga, se deben realizar los lances necesarios para cumplir con las cantidades requeridas por el laboratorio, por lo que sugiere homogeneizar las submuestras antes de repartirlas para los diferentes parámetros. Adicional, se recomienda lo siguiente:

- Primero tomar las muestras para contaminantes orgánicos, compuestas por dos submuestras integradas (en lo posible iguales) obtenidas de dos lances diferentes, tener en cuenta las precauciones del caso.
- Para las muestras de metales, no se debe tomar el sedimento que se encuentra en contacto con las paredes de la draga.
- Las muestras de hidrocarburos o plaguicidas se deben recolectar con espátulas o cucharas metálicas.
- Las muestras para análisis de nutrientes y carbono orgánico total, se toman con palas plásticas o metálicas en el caso de las dragas. Para la Box Corer se recomienda integrar dos submuestras (en lo posible iguales) obtenidas de dos diferentes lances.
- La muestra restante contenida en la draga, se puede mezclar para obtener la muestra de granulometría.
- En el caso de cores verticales, se debe tomar una muestra entre 300 – 500 g de cada fracción del sedimento.

11.3 Monitoreo hidrobiológico marino (corales, pastos marinos, mangle, fitoplancton, zooplancton e ictioplancton)

Así como se contempla establecer el estado de la calidad del agua para los recursos hidrobiológicos de agua dulce, es necesario determinar la calidad del agua marina para los organismos marinos y estuarinos, ya que está en contacto directo con las actividades antropogénicas y dependiendo de su calidad puede haber impactos sobre la supervivencia de los orga-

nismos que allí habitan. A continuación, se presentan algunas sugerencias para el desarrollo e implementación del monitoreo de parámetros de calidad del agua que son específicos para diferentes grupos de organismos marinos.

Entre los parámetros ambientales comunes a todos los organismos, están los nutrientes inorgánicos (mínimo nitritos, nitratos, amonio, fosfatos), los cuales determinan los cambios en la actividad alimentaria, fecundidad, biomasa, abundancia y composición de las especies y la salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto, los cuales deben medirse en puntos exactos sobre los que se colectan las muestras biológicas.

Para las mediciones de variables in situ (salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto), existen sondas multiparamétricas, las cuales deben estar previamente calibradas para la medición, CTD oceanográficos que contienen sondas de conductividad, temperatura y profundidad, diseñados para elaborar perfiles de estas variables en la columna de agua y equipos de lectura específica in situ entre los que se encuentran los dataloggers de temperatura.

Otras variables que permiten determinar las condiciones medioambientales que son importantes para determinar el estado de las poblaciones son la

turbidez y la tasa de sedimentación (la cual determina la presencia, distribución, migración vertical y disponibilidad de alimento de los organismos), la concentración de dióxido de carbono CO_2 (determina los cambios en los ciclos reproductivos y procesos de calcificación); así mismo, los contaminantes (metales pesados, grasas, aceites e hidrocarburos, entre otros) cuya determinación depende específicamente de las actividades antropogénicas que se desarrollen en el área de estudio.

La periodicidad de toma de datos está determinada por los objetivos específicos de los estudios, pero es preponderante que entre más variedad en la información se obtenga (periodicidad de toma de datos) se tendrán mejores resultados en la caracterización del ambiente y su relación con los organismos que lo habitan.

En relación con la metodología para la caracterización y seguimiento de cada uno de los ensambles hidrobiológicos considerados en la evaluación de impactos ambientales (plancton, necton, fondos blandos, fanerógamas, entre otros), se puede consultar el *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales*.



Embalse del Guavio, Cundinamarca
■ Germán Merchán



**Gestión de datos
e información**



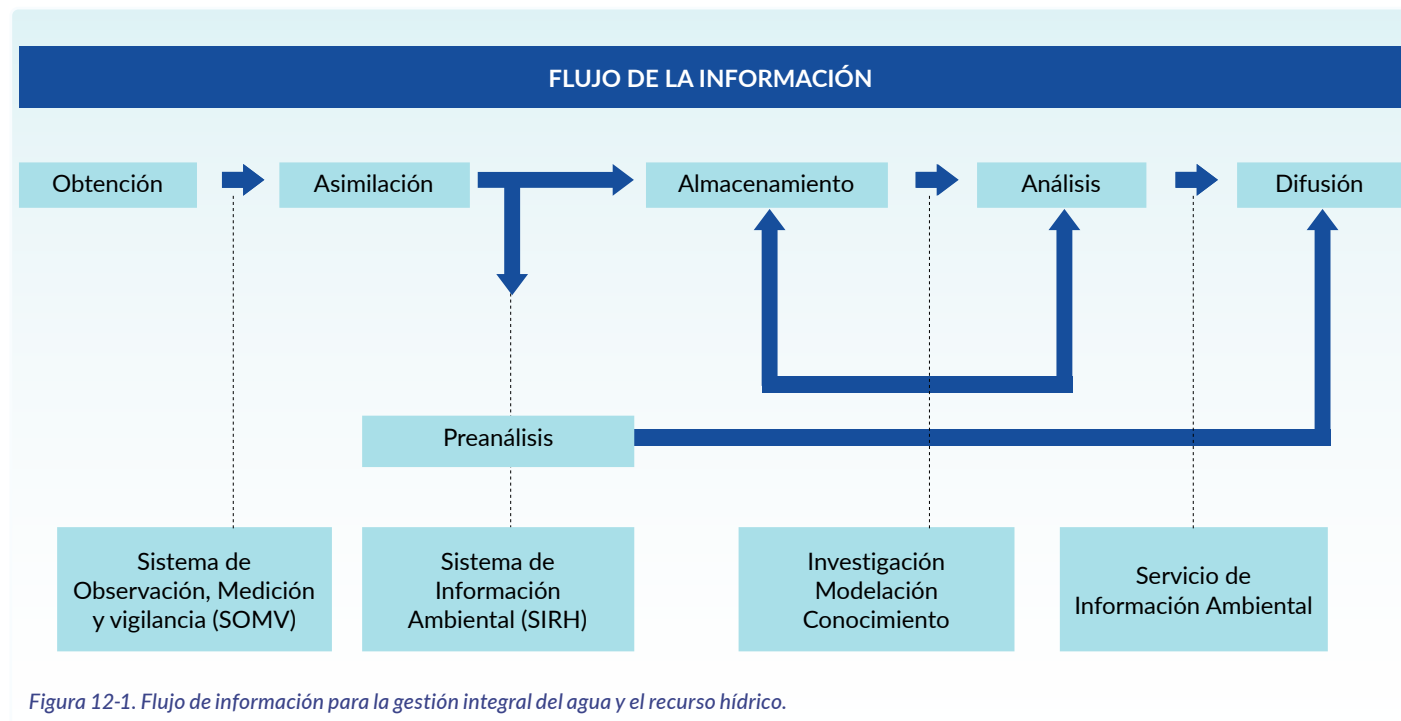
Humedal El Cisne PNN Los Nevados
📷 Nelsy Verdugo

Los datos obtenidos en el monitoreo deben constituir un patrimonio de información y conocimiento para las instituciones que generan estos insumos de interés para diferentes usuarios sociales, gremiales e institucionales. La difusión y divulgación se debe realizar a través de plataformas de información interoperables.

12. Flujo de información

La información institucional requiere satisfacer un flujo que inicia con la captura y recolección de los datos en un Sistema de Observación, Medición y Vigilancia (SOMV) que comprende la obtención de los insumos de monitoreo a

partir de sensores de diferentes variables en estaciones o puntos de observación, muestreos y mediciones complementarias. Así mismo, es posible obtener información con otras tecnologías de sensores remotos, equipos portables y otros (Figura 12-1).



La información, en todos los casos, debe ser verificada y validada con métodos formalizados y estandarizados que garanticen la completitud de los requerimientos de control de calidad. Una vez colmados estos procedimientos, la información y los datos pueden integrarse a las cadenas de valor de conocimiento para generar los productos requeridos por cada usuario. De esta manera, los insumos de monitoreo se disponen en plataformas de almacenamiento de datos e información que posibilitan su visibilización oportuna y la interoperabilidad con sistemas complementarios. En el caso de Colombia, la información generada en el monitoreo del agua y el recurso hídrico debe integrarse al DHIME (Plataforma de datos hidrometeorológicos que incluye calidad del agua y sedimentos) y al SIRH que forma parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC).

Los insumos de monitoreo dispuestos en estos sistemas interoperables facilitan la generación de

productos de investigación, planificación y gestión integral para la oportuna y adecuada toma de decisiones. Así mismo, se constituyen en soporte para los servicios hidrológicos y ambientales en general.

El flujo de información, tal como está descrito, está soportado con herramientas y soluciones tecnológicas para optimizar el rendimiento, el acceso oportuno a la información y hoy en día, el manejo de grandes volúmenes de datos y las funcionalidades requeridas por los usuarios.

El uso de la información sistematizada e interoperable puede ofrecer importantes beneficios a la sociedad, pues contribuye con análisis integrales aplicables para reducir efectos de amenazas naturales, mejorar las condiciones de salud y reducción de la pobreza, incrementar la productividad y el fortalecimiento de las economías regionales, proteger el medio ambiente y en términos generales aportar a una base más sólida para la planificación. Por esta razón, las inversiones

en infraestructura de monitoreo y fortalecimiento de sistemas de información deben ser vistas desde la valoración económica de beneficios y costos evitados.

Estos temas asociados a la gestión de datos han sido tratados por paneles de expertos que han generado documentación valiosa que amerita su consulta. En el caso particular de la gestión de datos de monitoreo del agua, deben resaltarse las publicaciones de la OMM y UNESCO (OMM, 2011; BANCO MUNDIAL & USAID, 2015). En este sentido, debe resaltarse que “si bien no se ha realizado ningún estudio definitivo individual sobre los beneficios globales de los servicios meteorológicos/hidrológicos, los estudios económicos han generado de forma constante una relación beneficio/costo superior a 1” (BANCO MUNDIAL & USAID, 2015). Estos servicios generan beneficios en la medida en que los usuarios utilicen la información proveniente del monitoreo del agua y el recurso hídrico en sus procesos de planificación, toma de decisiones y gestión

integral de los recursos naturales. De esta manera, se justifican las inversiones que el país debe realizar en las capacidades nacionales y regionales para el monitoreo del agua y las plataformas interoperables de información. Estas iniciativas de financiación deben extenderse a plataformas colaborativas o alianzas público privadas que permitan incluir los sectores económicos en el fortalecimiento de la infraestructura de monitoreo, entrenamiento y capacitación del talento humano, donación de equipamiento, investigación y otras necesidades identificadas en las matrices DOFA y de análisis de problemas del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico y los Programas Institucionales Regionales de Monitoreo del Agua (PIRMA).

Finalmente, es importante resaltar la necesidad de divulgar la información obtenida con el monitoreo del agua y el recurso hídrico a través de estrategias de comunicación y difusión desarrolladas por las instituciones para la comunidad en general.



Embalse del Topocoro
Ana Karina Campillo



Páramo Guantiva La Rusia, parte alta del río Fonce
📍 Ana Karina Campillo

13. Validación de información e incertidumbre

El Sistema de Observación, Medición y Vigilancia y las plataformas de asimilación de los datos e información de monitoreo deben contar con herramientas de validación, análisis, búsqueda y reporte.

Los procedimientos de validación de datos suelen consistir en comparar o correlacionar datos introducidos con los valores de prueba utilizando metodologías automatizadas simples y complejas en las distintas etapas del proceso. Estas validaciones son aplicables a los datos resultantes y a los análisis estadísticos dado

que son elementos integrantes del control de calidad. En este sentido, es importante desarrollar técnicas de validación que permitan detectar errores que normalmente están asociados a (OMM, 2011):

- Intervalos de valores esperados de las variables.
- Variación máxima esperada de una variable entre observaciones sucesivas.
- Diferencia máxima esperada entre variables correspondientes a estaciones adyacentes.

“Para que las observaciones sean siempre de buena calidad, será esencial que una persona capacitada

inspeccione periódicamente las estaciones para verificar el funcionamiento correcto de los instrumentos (y en su caso, la eficiencia del observador local). En estaciones hidrométricas y de agua subterránea esta operación incluirá la medición de la cota del cero de la escala con el fin de comprobar y registrar las variaciones de nivel experimentadas” (OMM, 2011).

Así mismo, es pertinente inspeccionar las estaciones de aforo de caudales para verificar la validez de las curvas de gastos y la estabilidad de los instrumentos de medición.

“Cuando los datos han sido obtenidos manualmente, los procedimientos de control de calidad deben considerar el historial de la estación, las fluctuaciones relativas de una variable observada durante un período dado o la aplicación de relaciones matemáticas para verificar la validez del valor observado” (OMM, 2011).

Cada variable debe atender a metodologías particulares para su validación siguiendo lineamientos y notas técnicas de la OMM y del IDEAM.

Los errores de un resultado pueden ser sistemáticos o aleatorios y la incertidumbre es el intervalo de valores en el que cabría esperar encontrar el valor verdadero de una magnitud medida, con un valor de

probabilidad (o de nivel de confianza) dado. “Una vez establecido su valor, habrá que considerar las incertidumbres vinculadas a los métodos, técnicas e instrumentos. Frecuentemente, habrá que encontrar un punto de equilibrio entre el grado de incertidumbre deseado y el grado de exactitud y la resolución de los instrumentos por razones de costo, por consideraciones prácticas y por las limitaciones de las técnicas” (OMM, 2011).

La exactitud de los datos está asociada a la incertidumbre estadística que permite expresar objetivamente la “exactitud” mediante un intervalo de valores o en términos porcentuales con una probabilidad de suceso dada (OMM, 2011). A este respecto, se recomienda la publicación de la *ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement* (1995). En el reglamento interno OMM N° 49 volumen III, parte VIII, se ofrecen directrices para la estimación de la incertidumbre en las mediciones de caudal.

La comprobación de los datos de calidad del agua se realiza en términos del cumplimiento de leyes fisicoquímicas como las difundidas por la OMM y la FAO en 1985 (*Guidelines for computerized data processing in operational hydrology and land and water management* - WMO N° 634 en OMM, 2011).



Lago de Tota
Sebastián Gutiérrez

14. Plataformas de gestión de datos e información

Las innovaciones tecnológicas asociadas a la captura de un volumen creciente de datos e información plantean dificultades en la garantía de almacenamiento, calidad y oportunidad de estos. Esta situación ha conllevado en los últimos años a la ampliación de espacios de almacenamiento y procesamiento, incorporando tecnologías de big data que reducen los costos, mejoran las velocidades de hardware y permiten generar nuevos productos y servicios requeridos por los intereses de los diferentes usuarios. A su

vez, se fortalecen los requerimientos de seguridad informática, arquitectura de datos unificada y alternativas de gestión de datos en la nube o de *High Performance Computer* (HPC).

Es necesario resaltar que a nivel de las estaciones hidrometeorológicas existe y debe actualizarse el Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) que sirve de base para acceder a la información de estaciones de propiedad del IDEAM y otras entidades. A este catálogo se hizo alusión en el numeral 5.1.1 Red Nacional de Monitoreo Hidrometeorológico.

A nivel nacional, se facilita la gestión de datos de hidrología y meteorología a través de la plataforma DHI-ME que permite el acceso a las herramientas de gestión de series de tiempo, datos de laboratorio e información de monitoreo en general y los productos de valor agregado que pueden ser mapas inteligentes, herramientas analíticas y geoinformación del nivel nacional. Esta plataforma cuenta con aplicaciones para el manejo de la información denominadas *Aquarius Time Series*, *Aquarius Samples*, *Aquarius Web Portal* y módulos personalizados.

En estas aplicaciones se realizan los procesos y procedimientos de control de calidad y generación de estadísticas que garantizan al usuario el acceso a datos e información oportuna, confiable e interoperable. Información en tiempo real de las estaciones hidrometeorológicas automáticas y radares pueden ser consultadas en la plataforma Polaris.

A nivel regional, son requeridas plataformas de asimilación para la captura, procesamiento, control de calidad de los datos e interoperabilidad con otras herramientas del nivel nacional y regional.

El SIRH por su parte, facilita la publicación en línea de datos e información del recurso hídrico útiles para orientar la toma de decisiones en materia de políticas, regulación, gestión planificación e investigación sobre el agua. Este sistema es alimentado por la información reportada por las autoridades ambientales y la propia del IDEAM que se dispone en visores institucionales para dar cuenta del estado y la dinámica de las aguas superficiales, aguas subterráneas (a través de información de monitoreo y reporte del FUNIAS), demanda (registro de usuarios y concesiones y vertimientos), calidad, gestión y riesgo (Figura 14-1).



Figura 14-1. Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). Fuente: (MAVDT, 2010).

La caracterización de variables de oferta, demanda y calidad, y las correspondientes a alteraciones del régimen natural, permiten construir un sistema de indicadores hídricos que reflejan el estado de las situaciones que, en un enfoque sistémico con visión integral, son determinantes para la toma de decisiones en el marco de la GIRH adoptado en la “Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia” (MAVDT, 2010).

La información de monitoreo disponible en plataformas y sistemas de información permite, además, construir indicadores requeridos en los compromisos nacionales e internacionales como los adquiridos

en el Plan Nacional de Desarrollo, documentos de política pública como los CONPES y los derivados de ODS y OCDE.

Adicionalmente, la información de monitoreo del agua y el recurso hídrico facilita la actualización de modelos de predicción y pronóstico hidrológico que a su vez se incorporan a plataformas de alerta temprana. Tal es el caso del Sistema Operacional de Pronóstico Hidrológico FEWS-Colombia que día tras día se fortalece con el mejoramiento de sus funcionalidades, innovación tecnológica y calibración de sus acoples multimodelo.





Río Bogotá - Cundinamarca
▣ Sebastián Gutiérrez

15. Transparencia y acceso a la información

Teniendo en cuenta las expectativas de información que el país espera del recurso hídrico es importante resaltar aspectos que requieren de procesos de gestión de información, que permitan:

- Proporcionar la información hidrológica para orientar la toma de decisiones en materia de políticas, regulación, gestión, planificación e investigación.
- Consolidar un inventario y caracterización del estado y comportamiento del recurso hídrico en términos de calidad y cantidad.
- Constituir la base de seguimiento de los resultados de las acciones de control de la contaminación y asignación de concesiones, con base en reportes de las autoridades ambientales.
- Contar con información para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico.
- Promover estudios hidrológicos, hidrogeológicos en las cuencas hidrográficas, acuíferos y zonas costeras insulares y marinas.
- Facilitar los procesos de planificación y ordenación del recurso hídrico.

- Constituir la base para el monitoreo y seguimiento a la gestión integral del recurso hídrico.
- Aportar información que permita el análisis y la gestión de los riesgos asociados al recurso hídrico.

El derecho de acceso a la información pública, los procedimientos para el ejercicio y garantía al derecho y las excepciones a la publicidad de la información están contempladas en la Ley de transparencia y el derecho a la información 1712 del 2014, y las disposiciones del marco normativo de las TIC. En virtud de estos mandatos las entidades públicas deben publicar la información requerida por actores sociales, gremiales e institucionales siguiendo los lineamientos de transparencia, celeridad, eficacia, calidad de la información, responsabilidad en el uso de la información y seguridad informática. Así mismo, se contempla el establecimiento y desarrollo de estrategias de apertura y uso de datos abiertos. Estos corresponden a datos primarios o sin procesar que se encuentren en formatos estándar e interoperables que faciliten su acceso y reutilización por parte de cualquier usuario.

“Los datos abiertos tienen un gran potencial para generar valor económico a partir de su uso, pues además de generar beneficios a nivel de transparencia y rendición de cuentas, tienen la posibilidad de ser usados para mejorar o crear nuevos productos” (Min-TIC, 2019). La ley 1712 de transparencia y acceso a la información establece que las entidades públicas deben contar con un Registro de Activos de Información, publicado en la página web de la entidad y en el portal de datos www.datos.gov.co.

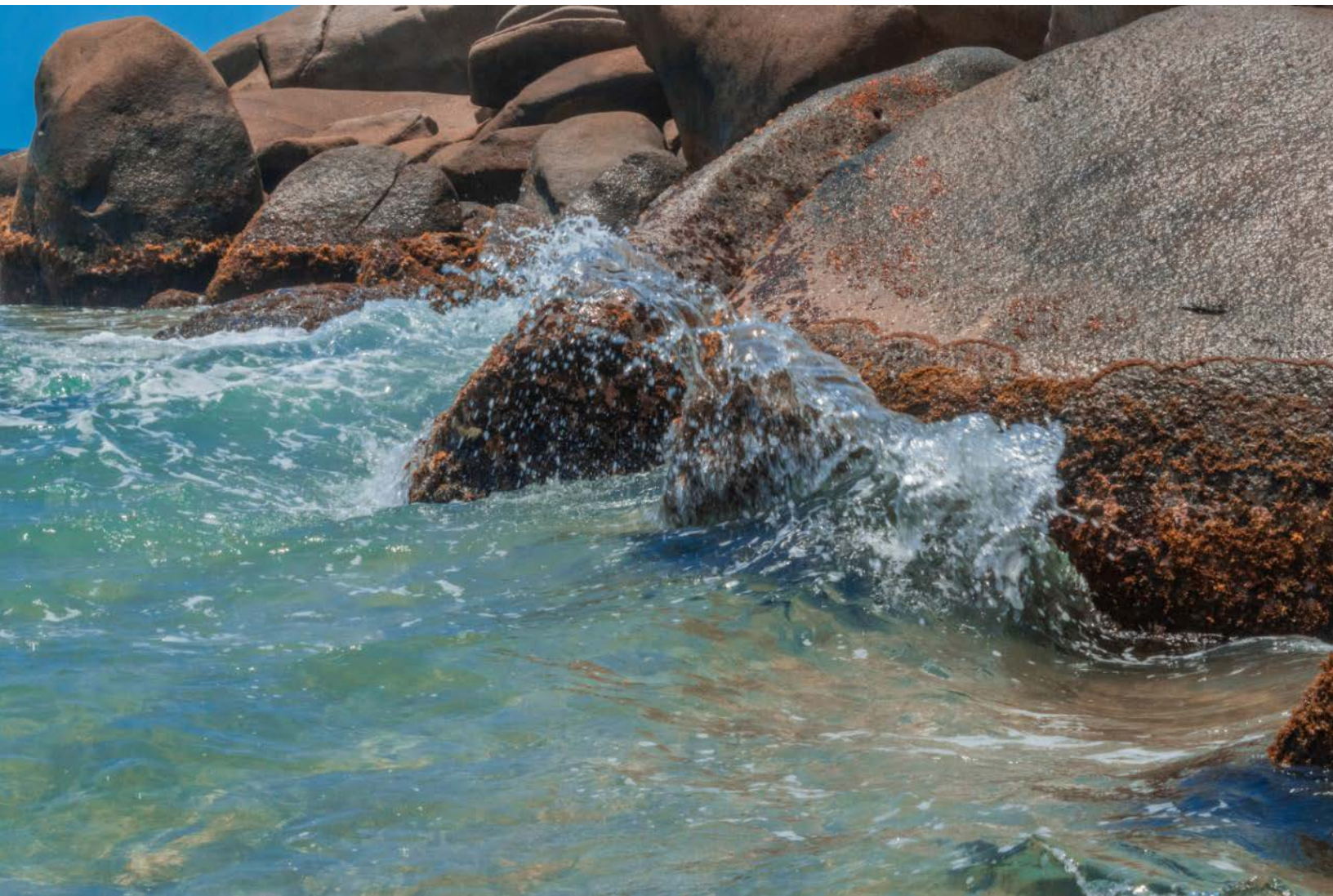
Consideraciones finales

De manera incuestionable, el monitoreo integral del agua y del recurso hídrico es la base para la evaluación y la gestión integral del recurso hídrico. Este monitoreo debe abarcar los diferentes subsistemas del ciclo hidrológico y ser realizado de manera permanente y sistemática por técnicos y profesionales entrenados y capacitados y contar con la instrumentación y equipamiento requeridos para satisfacer los componentes estratégicos, programáticos y tecnológicos de los programas de monitoreo.

El monitoreo, además, debe atender a estándares y protocolos en los cuales se determinen los procedimientos para el muestreo, captura de datos e información, mediciones, procesamiento y gestión de datos y lineamientos para la difusión en sistemas de información y comunicación.

Este protocolo del agua, elaborado por el IDEAM como autoridad hidrológica nacional e INVEMAR como entidad responsable del monitoreo marino-costero, tiene como propósito satisfacer estos alcances y constituirse en una herramienta de utilidad para las instituciones y entidades que realicen monitoreo.

Finalmente, el objetivo estratégico de la publicación es garantizar la generación de datos e información confiable, oportuna e interoperable para uso de los actores institucionales, gremiales y sociales en su ejercicio de investigación, planificación, gestión y toma de decisiones.



Parque Nacional Natural Tayrona
📷 Sebastián Gutiérrez

16. Bibliografía

- ACWI, A. C. (2009). *A National Framework for Ground- Water Monitoring in the United States*. United States: Advisory Committee on Water Information.
- AELS. (05 de 08 de 2020). *Aula de Estudio Lago Sanabria*. Obtenido de <https://aulaestudiolagosanabria.info>
- Agrawal, Y. C., & Pottsmith, H. C. (1994). *Laser Diffraction Particle Sizing in STRESS*. *Continental Shelf Research*, 14 (10/11), 1101-1121.
- Agromatic S.A. (18 de 03 de 2019). *Herramientas meteorológicas, repuestos y soporte técnico*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de Tanque Evaporímetro clase "A" con Gancho graduado.: <http://agromatic.com.pe/producto/61-tanque-evaporimetro-clase-a-con-gancho-graduado>
- Alba-Tercedor, J., Pardo, I., Prat, N., & Pujante, A. (2005). *Protocolos de muestreo y análisis para Invertebrados bentónicos*. En Confederación hidrográfica del Ebro, Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Barcelona, España: Confederación Hidrográfica del Ebro, URS, Universidad de Barcelona, Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Universidad de Girona. Ministerio de Medio ambiente.
- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology, structure and function of running waters* (2nd ed.). Netherlands: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-5583-6
- Álvarez, L. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Andramunio-A. (2013). *Dinámica sucesional y ecología trófica de la comunidad perifítica en dos ambientes del sistema lagunar de Yahuaraca* (Amazonas, Colombia). Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- APHA, AWWA & WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* 20001-3710. Section 9215 A- 5. Sample Preparation y ed. Section 10200B (21th ed.). Washington, D. C.
- APHA, AWWA & WEF. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington, D. C.: American Public Health Association, Amer-

- ican water and water works Association and Water Environment federation.
- APHA, AWWA & WEF. (2017). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington, D. C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- APHA-AWWA-WPCF. (1992). *Standard Methods for Examination of Water and Sewage and Wastewater* (18th ed.). Washington, D. C., EE. UU.: Editorial Díaz de Santos, S. A.
- AQEM CONSORTIUM. (2002). *Manual for the application of the AQEM system. A comprehensive method to assess european streams using Benthic Macroinvertebrates, developed for the purpose of the Water Framework Directive. Version 1.0.* AQEM CONSORTIUM.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011). *Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana. Fase III.* Universidad de Antioquia; Universidad Pontificia Bolivariana; Universidad de Medellín; Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia: Subdirección Ambiental Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Araújo-Lima, Carm., Forsberg, Br., Victoria, R., & Marginelli, L. (1986). *Energy-sources for detritivorous fishes in the Amazon.* Science, vol. 234, 1256-1258.
- Auge, M. (2006). *Métodos y técnicas para el monitoreo de acuíferos.* Universidad de Buenos Aires, La Plata, Argentina.
- Barbour, M., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish.* Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, Office of water - USEPA 841-B-99-002.
- Barbour, M., Stribling, J., Verdonschot, P. (2006). *The Multihabitat Approach of USEPA's Rapid Bioassessment Protocols: Benthic Macroinvertebrates.* Limnetica, 839-850.
- Barnes de Colombia S. A. (2019). *Barnes de Colombia S.A.* Recuperado el 24 de 05 de 2019, de *Bombas sumergibles de pozos profundos:* <http://www.barnes.com.co/su-mergibles-pozo-profundo/>
- Battin, T. J., L. A. Kaplan, J. D. Newbold, & C. E. Hansen. (2003). *Contributions of microbial biofilms to ecosystem processes in stream mesocosms.* Nature 426:439-442. doi:10.1038/nature02152
- Batu, V. (1998). *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis.* New York: Wiley.
- Bellinger, E., & Sigee, D. (2015). *Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators.* USA: Wiley Blackwell. doi:10.1002/9781118917152
- Bere, T. (2010). *Benthic diatom community structure and habitat preferences along an urban pollution gradient in the Monjolinho River.* Acta Limnológica Brasiliensia 22(01), 80-92.
- Beyene, A., Awoke, A., & Triest, L. (2014). *Validation of a quantitative method for estimating the indicator power of diatoms for ecoregional river water quality assessment.* Ecological Indicators, 58-66.
- Black, K. P., & Rosenberg, M. A. (1994). *Suspended sand measurements in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques.* Coastal Engineering (24), 137-150.
- Bowden, W. B., Glime, J. M., & Riis, T. (2006). *Chapter 18: Macrophytes and Bryophytes.* En R. Hauer, & G. Lamberti, *Methods in stream ecology* (2nd ed., págs. 381-414). San Diego California: Elsevier Inc.
- Braun, J. (1932). *Plant Sociology: The study of Plant Communities.* New York.: McGraw Hill Book Co. doi: <https://doi.org/10.1038/132300a0>
- Briones, G., & García, I. (1997). *Aforo del agua en canales y tuberías* (2nd ed.). (Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Ed.) México, D. F.: Trillas.
- Candela, L. (2016). *Proyecto Arcal RLA/7/018. "Mejora del conocimiento de aguas subterráneas para contribuir a su protección, gestión integrada y gobernanza".* Monitoreo aguas subterráneas. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://docplayer.es/50555982-Monitoreo-aguas-subterraneeas.html>
- Caprioli, M., Katholm, A., Melone, G., Ramløv, H., Ricci, C., & Santo, N. (2004). *Trehalose in desiccated rotifers: a comparison between a bdelloid and a monogonont species.* (Pergamon, Ed.) *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 139(4), 527-532.
- Características. (2017). *10 características del ciclo del agua.* Recuperado el 09 de 10 de 2017, de Enciclopedia online de características: <https://www.caracteristicas.co/ciclo-del-agua/>
- Castro, M. A., & Guzmán, O. (1985). *Estudio comparativo de fórmulas de evapotranspiración potencial en Colombia.* Bogotá, D. C.: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT.
- Ceballos, J. L. (2015). *Protocolo básico para el seguimiento a la dinámica glaciar en Colombia.* Informe Interno, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Bogotá, D. C.
- CEN. (2012). *Water quality-guidance on pro-rata Multi-Habitat sampling of benthic macro-invertebrates from wadeable rivers.* EN 16150: 2012. Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- Chien, N. (1952). *The efficiency of depth-integrating suspended-sediment sampling.* Eos, Transactions American Geophysical Union., 33(5), 693-698. doi: <https://doi.org/10.1029/TR033i005p00693>
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos.* McGraw Hill.

- Cirujano, S., Cambra, J., & Gutiérrez, C. (2005). *Protocolos de muestreo y análisis para macrófitos*. En Confederación Hidrográfica del Ebro., Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Barcelona - España: Confederación Hidrográfica del Ebro, URS, Universidad de Barcelona, Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Universidad de Girona. Ministerio de Medio ambiente.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: Lewis Publishers.
- Clifford, N. J., Richards, K. S., Brown, R. A., & Lane, S. N. (1995). *Scales of Variation of Suspended Sediment Concentration and Turbidity in a Glacial Meltwater Stream*. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, Vol. 77 (No. 1/2), 45-65.
- Climatécnica. (2021). Climatécnica. Obtenido de <https://www.climatecnica.com/bombas-sumergibles-grundfos-mk.72.648.html#>
- Colby, B. R. (1964). *Discharge of Sands and Mean-Velocity Relationships in Sand-Bed Streams*. In Geological Survey Professional Paper 462-A. Sediment Transport in Alluvial Channels 1963-65. Washington: U. S. Geological Survey.
- Comisión Europea. (2000). *Directiva 2000/60/Ce del Parlamento Europeo y del Consejo*. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/2009-06-25>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Pruebas de bombeo*. Tlalpan, México, D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CORMACARENA & SIAM S. A. (2016). *Adelantar las actividades para la implementación del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico en su componente de agua subterránea, en relación con el inventario de puntos de agua subterránea en Puerto Gaitán, Meta - Informe Final*. Informe Final. Contrato No. 264-2016, Bogotá, D. C.
- CORPOCESAR. (2009). *Guía para el monitoreo de aguas subterráneas*. Valledupar: Corporación Autónoma Regional del Cesar.
- Coste, M., Boutry, S., Tison-Rosebery, J., & Delmas, F. (2009). *Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006)*. Ecological Indicators (9), 621-650.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (2nd ed., Tomo I). Barcelona, España: Ediciones Omega S. A.
- CVC. (23 de 10 de 2015). *Experiencia del monitoreo como elemento base en la toma de decisiones y gestión del recurso hídrico subterráneo en el Valle del Cauca*. II Encuentro Nacional sobre gestión de información asociada al agua. Bogotá, D. C. Obtenido de <http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/encuentro2/Ponencias/PDF/gpaez.pdf>
- Darrigan, G., Vilches, A., Legarralde, T., & Damborenea, C. (2007). *Guía para el estudio de macroinvertebrados*. I-Métodos de colecta y técnicas de fijación. ProBiota: Serie Técnica y Didáctica; No.10, 1-86.
- Davis, B. E. (2005). *A guide to the proper selection and use of federally approved sediment and water-quality samplers*. Vicksburg, MS: U.S. Geological Survey. Open File Report 2005-1087.
- Dekker, A. G., Malthus, T. J., & Hoogenboom, H. J. (1995). "The remote-sensing of inland water-quality". In *Advances in Environmental Remote Sensing*, Cap. 11 (pp. 123-142.). Nueva York: John Wiley.
- Díaz, C., & Rivera, C. A. (2004). *Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales*. Calsasia, 381-394.
- Díaz-Olarte, J., V. Valoyes-Valois, C. Guisande, N. Torres, A. González-Bermúdez, L. Sanabria-Aranda, A. Manjarrés, S. Duque, L. Marciales y M. Núñez-Avellaneda. (2007). *Periphyton and phytoplankton associated with the tropical carnivorous plant Utricularia foliosa*. Aquatic Botany, 87: 285-291.
- Dickinson, J. E., Land, M., Faunt, C. C., Leake, S., Reichard, E. G., Fleming, J. B., & Pool, D. (2006). *Hydrogeologic Framework Refinement, Ground-Water Flow and Storage, Water-Chemistry Analyses, and Water-Budget Components of the Yuma Area, Southwestern Arizona and Southeastern California*. U. S. Department of the Interior; U. S. Geological Survey. Virginia: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5135.
- Diez, J. (11 de 05 de 2012). *Evaporación, transpiración y evapotranspiración*. Curso de Grado para 3er año de la Licenciatura en Tecnología Ambiental. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/files/cstierra_pn/apuntes/unidad8.pdf
- DINAMA. (2004). *Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea*. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente - DINAMA.
- Direct Industry. (15 de 03 de 2020). *Direct Industry by Virtual Expo Group*. Obtenido de *Correntómetro universal con molinete F1*: <https://www.directindustry.es/prod/seba-hydrmetrie-gmbh-co-kg/product-63216-640768.html>
- Dodds, W. K., & Whiles, M. R. (2010). *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications of Limnology*. (2nd ed.). Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-01718-8>
- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos: Sistemática y Biología* (1st ed.). Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.
- Donato, J. C. (2002). *Métodos para el estudio del Fitoplancton en sistemas lénticos*. En G. Rueda, Manual de métodos en Limnología (pp. 23-28.). Bogotá, D. C.: Asociación Colombiana de Limnología.
- DURMAN. (2018). *Catálogo Bombas*, 2018. Recuperado el 24 de 05 de 2019, de <https://www.durman.com/descargas/bombas/catalogo2018.pdf>

- Edwards, T. K., & Glysson, G. D. (1999). *Techniques of Water - Resources Investigations of the U. S. Geological Survey*. Book 3. Applications of Hydraulics, Chapter C2. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. Reston, Virginia: USGS Science for a changing world.
- Envirotecnicos. (2021). Obtenido de <https://www.envirotecnicos.com/categoria-producto/productos/agua/bombas-agua-investigacion/>
- EPA. (2015). *Standard operating procedure for the standard/wellvolume method for collecting a ground-water sample from monitoring wells for site characterization*. Managing the Quality of Environmental Data, United States Environmental Protection Agency, Estados Unidos.
- Esquivel, H. E. (1997). *Herbarios en los Jardines Botánicos*. Ibagué: Ministerio del Medio Ambiente, Red Nacional de Jardines Botánicos. Obtenido de <https://kmo7.files.wordpress.com/2010/09/herbariosjb.pdf>
- Esteves, F. (2011). *Fundamentos de limnología* (3er ed.). Río de Janeiro: Interciência.
- European Standard. (2003). *Water quality-guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers*. EN 13946. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Standard. (2004). *Water quality—guidance standard for the identification, enumeration and interpretation of benthic diatom samples from running waters*. EN 14407. Brussels: European Committee for Standardization.
- Evans. (2021). Obtenido de <https://www.evans.com.co/categoria-producto/bombas/bombas-sumergibles/>
- FAO. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía - Boletín de suelos de la FAO 68*. Roma: N.W. Hudson. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, D. C.
- Froehlich, W. (2003). *Monitoring bed load transport using acoustic and magnetic devices*. In: *Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers*. Technological and Methodological Advances. Proceedings of the Oslo Workshop (19-21 June 2002) (eds. Jim Bogen and Des E. Walling). IAHS Publication No. 283, 201-210.
- Farhadian, O., & Pouladi, M. (2014). *Seasonal changes in the abundance and biomass of zooplankton from shallow mudflat river-estuarine system in Persian Gulf*. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology 18(2), 19-29. doi:10.14210/bjast.v18n2.p.19-29.
- Federal Inter-Agency Sedimentation Project. (1941). *Laboratory investigation of suspended-sediment samplers: Iowa City, Iowa University Hydraulics Laboratory*. Inter-Agency Report 5.
- Foster, S., & Gomes, D. C. (1989). *Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas: una evaluación de métodos y costos*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. CEPIS / OMS / OPS.
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamientos de datos*. Observatoire de Recherche pour l'Environnement.
- Galecio, J. E. (2007). *Métodos de aforo para la estimación de la recarga de acuíferos*. Santiago de Chile, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Galvis, G., Mojica, J. I., & Rodríguez, F. (1989). *Estudio ecológico de una laguna de desborde del río Metica, Orinoquía Colombiana*. Bogotá, D. C.: Universidad Nacional de Colombia - Fondo FEN-Colombia.
- Garay et al. (2004). *Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar - PNICM*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andrés" - INVEMAR.
- Geotech Environmental Equipment. (2015). *Muestreo de agua*. (I. Geotech Environmental Equipment, Productor) Recuperado el 30 de 06 de 2017, de http://spanish.geotechenv.com/water_sampling.html
- Geotech Environmental Equipment. (2021). Obtenido de https://spanish.geotechenv.com/water_sampling.html
- Geyh, M. (2002). *Sección IV Agua Subterránea Zona Saturada y no saturada*. En UNESCO - IAEA, Instituto Geológico y Minero de España, & W. G. Mook (Ed.), *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones* (pp. 315-419). Madrid, España: IGME.
- Gómez, J. A. (2017). *Actualización de la variable Evapotranspiración Potencial (ETP) o de Referencia (ETo) para Colombia*. Contrato 249 de 2017- IDEAM. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Gooding, D.J. (2001). *Photo-optical sedimentation tube*. Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29, 2001, poster-29. Reno, Nevada. Obtenido de http://pubs.usgs.gov/misc_reports/FISC_1947-2001/
- Gray, J. R., Gartner, J. W., Anderson, C. W., Fisk, G. G., Glysson, G. D., Gooding, D. J., Hornewer, N. J, Larsen, M. C., Macy, J. P., Rasmussen, P. P., Wright, S. A., Ziegler, A. C. (2010). *Chapter 1. Surrogate Technologies for Monitoring Suspended-Sediment Transport in Rivers*. En C. Poletto, & S. Charlesworth, *Sedimentology of Aqueous Systems* (1st ed., pp. 3 - 45). Wiley - BlackWell.

- Gray, L. (1993). *Response of Insectivorous Birds to Emerging Aquatic Insects in Riparian Habitats of a Tallgrass Prairie Stream* (Vol. 129 No. 2). The American Midland Naturalist. doi:10.2307/2426510
- GRDC. (2017). *Global Runoff Data Centre*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html
- Gröning, M., Lutz, H., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L., & Pölsenstein, L. (2012). *A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for $\delta^{18}O$ and δ^2H analysis of cumulative precipitation samples*. Journal of Hydrology (448), 195-200. Obtenido de www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Haase, P., Pauls, S., Schindehütte, K., & Sundermann, A. (2010). *First audit of macroinvertebrate samples from an EU Water Framework Directive monitoring program: human error greatly lowers precision of assessment results*. Journal of the North American Benthological Society, 29(4), 1279-1291.
- Hanna Instruments. (11 de 03 de 2020). *Medidor multiparámetro HI9829*. Obtenido de <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-9829-medidor-multiparametro>
- Heckman, C. W. (1998). *The seasonal succession of biotic communities in wetlands of the tropical wet-and-dry climatic zone: V. Aquatic invertebrate communities in the pantanal of Mato Grosso, Brazil*. International Review of Hydrobiology, 83(1), 31-63. doi: <https://doi.org/10.1002/iroh.19980830105>
- Helley, E. J., & Smith, W. (1971). *Development and Calibration of a Pressure - Difference Bedload Sampler*. Open - File Report. Menlo Park, California: United States Department of the Interior Geological Survey - Water Resources Division.
- Hillebrand, H., Dürselen, C. D., Kirschtel, D., Pollinger, U., & Zohary Tamar. (1999). *Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae*. Journal of Phycology, 403-424. doi:10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x
- HIMAT. (1987). *Manual del Observador Meteorológico - Estación Climatológica*. Bogotá, D. C.: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT.
- HIMAT. (1988). *Aforos Angulares Bote Cautivo*. Bogotá, D. C.: Subdirección de Estudios e Investigaciones, División de Redes, Sección de Instalación y Operación de Estaciones. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT.
- Hong Kong Observatory. (18 de 03 de 2019). *The Government of the Hong Kong Special Administrative Region*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de http://www.weather.gov.hk/wxinfo/aws/evap_pan.htm#
- Hötzel, G., & Croome, R. (1999). *A Phytoplankton Methods Manual for Australian Freshwaters*. Land and Water Resources and Development Corporation.
- Hubbell et al. (1956). *Progress Report Number 1. Investigations of some sedimentation characteristics of a sand-bed stream*. Open File Report. Lincoln, Nebraska: Geological Survey. Water Resources Division.
- Hurtado, G. (2000). *La evapotranspiración potencial en Colombia*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- HYDROTECHNIK. (s. f.). *Sondas de nivel portátiles para medición manual de niveles en pozos y aguas subterráneas*. Madrid, España: GWE PESA Engineering. Obtenido de http://www.pesawellengineering.es/files/pdf/Sondas_nivel.pdf
- IAEA. (2006). *Use of chlorofluorocarbons in hydrology. A guidebook*. International Atomic Energy Agency - IAEA, Vienna. Obtenido de <https://www.iaea.org/publications/7187/use-of-chlorofluorocarbons-in-hydrology>
- IAEA. (2012). *Procedimiento técnico para las estaciones de la Red Global de Isótopos en la precipitación (GNIP)*. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- IAEA. (2013). *IAEA-TECDOC-1723. Using isotopes for design and monitoring of artificial recharge systems*. Vienna: International Atomic Energy Agency - IAEA.
- IAEA. (2014). *Groundwater Sampling Procedures for Isotope Hydrology*. Viena: International Atomic Energy Agency - IAEA.
- IAEA. (20 de 08 de 2019). *Panorama de la hidrología isotópica*. IAEA BULLETIN, 60-1, 4-5. Recuperado el 12 de 11 de 2019, de <https://www.iaea.org/es/publications/magazines/bulletin/60-1>
- IAEA. (s. f.). *Sampling Procedures for Isotope Hydrology*. Viena. Recuperado el 03 de 05 de 2020, de <http://www.naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/other/Sampling%20booklet%20web.pdf>
- ICONTEC. (1995). *Calidad del Agua - Muestreo: Directrices para el diseño de programas de monitoreo*. NTC-ISO 5657-1. Bogotá, D. C., Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC.
- ICONTEC. (1996a). *Especificaciones técnicas para la construcción de un pozo de monitoreo para aguas subterráneas NTC 3948*. Bogotá, D. C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC.
- ICONTEC. (1996b). *Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo: Guía para el muestreo de aguas subterráneas NTC-ISO 5657-11*. Bogotá, D. C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC.
- ICONTEC. (2005). *NTC-ISO 5667-19. Calidad del Agua. Muestreo. Parte 19: Guía para el muestreo de sedimentos marinos*. Bogotá, D. C., Colombia: ICONTEC.
- IDEAM. (1997). *Guía de construcciones hidrometeorológicas*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2002). *Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.

- IDEAM. (2004). *Guía para el Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2006). *Guía y Protocolos del Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Contrato de Servicios de Consultoría No. C-0427-05. Félix Darío Sánchez Lancho. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2007). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2008). *Aplicativo verificación procesos muestras diarias de sedimentos SEDINCO*. Hernando Wilches. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2009). *Taller teórico - práctico "Estandarización y actualización de protocolos de monitoreo y proceso de información hidrológica"*. Dictado por Hernando Wilches. Girardot: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IDEAM. (2012). *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2013a). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IDEAM. (2013b). *Protocolo: Toma de muestras de aguas subterráneas - Bifenilos policlorados (PCB)*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014a). *Implementación del Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH en Colombia*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2014b). *Modelos Hidrogeológicos conceptuales*. Recuperado el 25 de 06 de 2017, de Aguas Subterráneas: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>
- IDEAM. (2015a). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IDEAM. (2015b). *Seminario Actualización en Diseño de Monitoreo de Aguas Subterráneas*. Evento en el marco del II encuentro nacional sobre la gestión de información asociada al agua y la Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas. Bogotá, D. C.
- IDEAM. (2016). *Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico*. Bogotá, D. C.: Sin publicar. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2017). *Cartilla de pronósticos de pleamares y bajamares del Pacífico Colombiano*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IGRAC. (2006). *Guideline on: Groundwater monitoring for general reference purposes*. Utrecht, Países Bajos: International Groundwater Resources Assessment Centre - IGRAC.
- Instrumentos del Sur S. A. (2017). *Instrumentos del Sur S. A.* Recuperado el 26 de 06 de 2017, de <http://www.idelsur.com/?cat=229>
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO [IOC]. (2010). *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*. UNESCO. (IOC Manuals and Guides, no. 55.) (IOC/2010/MG/55) 110 p. Paris: Karlson, B., Cusack, C. and Bresnan, E.
- INVEMAR. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)*. Santa Marta, D.T.C.H.: Programa Calidad Ambiental Marina - CAM. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés - INVEMAR.
- INVEMAR. (2013). *Aportes al diagnóstico del estado de las redes oceanográficas y meteorológicas marinas en Colombia - Documento Preliminar*. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés.
- INVEMAR. (2017). *Sistema de Información Ambiental Marina*. Recuperado el 08 de 06 de 2017, de Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés: <https://siam.inveamar.org.co>
- John, D. M., Whitton, B. A., & Brook, A. J. (2011). *The Freshwater Algal Flora of the Isles: An Identification guided to Freshwater and Terrestrial Algae* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kireta, A., Reavie, E., Sgro, G., Angradi, T., Bolgrien, H., & Jicha, T. (2012). *Planktonic and periphytic diatoms as indicators of stress on great rivers of the United States: Testing water quality and disturbance models*. *Ecological Indicators*, 222-231.
- Krusseman, G., & de Ridder, N. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data* (2nd ed., Vol. 47). The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Lampert, W., & Sommer, U. (2007). *Limnology: The ecology of lakes and streams* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., & Guerrero, M. (2011). *Estimación de la concentración y transporte de sedimentos de fondo en suspensión con Perfilador Acústico Doppler*. HIDRÁULICA FLUVIAL: PROCESOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN, OBRAS DE CONTROL Y GESTIÓN DE RÍOS. Héctor Daniel Farias, José Daniel Brea, Carlos Marcelo García (Editores). Santiago del Estero, Argentina. 2-4 noviembre de 2011: Memorias del Quinto Simposio Regional sobre HIDRÁULICA DE RÍOS ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM).
- Lavoie, I., Campeau, E., Zugic-Drakulic, N., Winter, J., & Fortin, C. (marzo de 2014). *Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: An overview of 10 years of index development and ongoing challenges*. *Science of the Total Environment* (475), 187-200.

- Lewis, A. J., & Rasmussen, T. C. (1996). *A New, Passive Technique for the In Situ Measurement of Total Suspended Solids Concentrations in Surface Water*. ERC 08-96, Environmental Resources Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA, for U. S. Department of the Interior, Geological Survey., 66 p.
- Li, L., Zheng, B., & Liu, L. (2010). *Biomonitoring and bioindicators used for River Ecosystems: Definitions, Approaches and Trends*. *Procedia Environmental Sciences*, 1510-1524. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.164>
- Liévano, A. O. (2007). *Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón*. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Livni, N., Avisar, D., & Mamane, H. (2015). *Manual de muestreo, técnicas de medición de parámetros in situ y estrategias de monitoreo para la vigilancia del agua subterránea*. Tel Aviv, Israel: Tel Aviv University.
- López, D. (30 de 03 de 2019). *Pluviómetros y pluviógrafos: Un afán histórico por medir la lluvia*. Recuperado el 24 de 08 de 2017, de <https://www.tutiempo.net/meteorologia/articulos/pluviometro-y-pluviografo.html>
- Lowe, R., & La Liberte, G. (2006). *Chapter 16: Benthic stream algae: Distribution and structure*. In R. Hauer, & G. Lamberti, *Methods in stream ecology* (pp. 327-356). Amsterdam: Elsevier Ing.
- Lowe, R. & Y. Pan. (1996). *Benthic algal communities as biological monitors*. In: Stevenson, R. J., M. L. Bothwell & R. L. Lowe (Eds.). *Algal eco-logy: freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, California, USA, 705-739.
- Maestro, S. M. (2016). *Aspectos básicos de hidroquímica. Composición química del agua*. Madrid, España: III Curso sobre Hidrogeología Aplicada.
- Malavoi, J., & Souchon, Y. (2002). *Description standardisée des principales facies d'écoulement observables en rivière: clé de détermination qualitative et mesures physiques*. *Bull. Fr. Pêche Piscic* (365), 357-372.
- Marbello, R. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Medidores en régimen crítico*. Medellín, Colombia: Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia.
- Martín, G., Toja, J., Sala, S., Fernández, M., Reyes, I., & Casco, M. A. (2010). *Application of diatom biotic indices in the Guadalquivir River Basin, a Mediterranean basin*. Which one is the most appropriated? *Environmental Monitoring and Assessment*, 519-534.
- Martínez, L. (11 de 12 de 2012). *Instrumentos para medir la evaporación y precipitación*. (Universidad Nor-Oriental Privada, & Gran Mariscal de Ayacucho, Edits.). Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/116430552/Instrumentos-para-medir-evaporacion-y-precipitacion>
- Martínez, M. V., & López, A. I. (1984). *Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Matthaei, C. D., Arbuckle, C. J., & Townsend, C. R. (2000). *Stable Surface Stones as Refugia for Invertebrates during Disturbance in a New Zealand Stream*. *Journal of the North American Benthological Society*, 19(1), 82-93. doi:10.2307/1468283
- Mattila, J., Räsänen, R. (1998). *Periphyton growth as an indicator of eutrophication; an experimental approach*. *Hydrobiologia* 377, 15-23. <https://doi.org/10.1023/A:1003265208397>
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D. C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT.
- MAVDT, & IDEAM. (2011). *Protocolos y procedimientos para el monitoreo del recurso hídrico*. Informe Final Contrato 214 de 2010. EPAM S. A. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- McCormick, P. & Stevenson, R. (1998). *Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida Everglades*. *Journal of Phycology* 34: 726-733.
- McHenry et al. (1967). *Performance of nuclear-sediment concentration gauges*. In International Atomic Energy Agency, *Symposium on isotopes in hydrology* (pp. 207-225.). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). *Protocolo de muestreo de fitoplancton en lagos y embalses*. Código M-LE-FP-2013. España.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación de Argentina. (2017). *Acuerdos Internacionales Sistema de Naciones Unidas Organización Meteorológica Mundial*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/organismos/onu/onuomm.htm>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2000). *Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia*. Bogotá, D. C., Colombia: Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Ecosistemas.
- Minshall G.W. (1984). *Aquatic insect-substratum relationships*. In: *The Ecology of Aquatic Insects*. (Resh VH and Rosenberg DM, eds). Praeger, New York. 358-400
- MinTIC. (2016). *Guía para el uso y aprovechamiento de datos abiertos en Colombia*. Bogotá, D. C.: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones - MinTIC.
- Mizuyama, T. Fujita, M. and Nonaka, M., 2003, *Measurement of bed load with the use of hydrophones in mountain rivers*, 222-227, in J. Bogen, T. Fergus & D. Walling (eds.): *Erosion and Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances*. Int'l Assoc. Publ. 283.
- Montagnini, M. D., & Amsler, M. L. (2007). *Erosiones en una curva de meandro en el río Colastiné*, Provincia de Santa Fe. Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba, Argentina.
- Mook, W. G. (2002). Sección I. Introducción. *Teoría, Métodos y Correcciones*. En UNESCO - IAEA, Instituto Geológico

- y Minero de España, & W. G. Mook (Ed.), *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones* (pp. 13-170). Madrid, España: IGME.
- Mueller, D. S., & Wagner, C. R. (2006). *Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport*. Scientific Investigations Report 2006 - 5079. Reston, Virginia: Prepared in cooperation with Environment Canada. U.S. Department of the Interior - U. S. Geological Survey.
- Nordin, C. J., Cranston, C. C., & Mejía, A. B. (1983). *New technology for measuring water and suspended - sediment discharge of large rivers*. Proceedings of the Second International Symposium on River Sedimentation, 11 - 16 October, 1983. Nanjing, China: Beijing. Water Resources and Electric Power Press, 1145-1158.
- Novo, E. M., Hansom, J. D., & Curran, P. J. (1989). *The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration*. *Int. J. Remote Sens.* 10 (7), 1283-1289.
- Ochoa, B. (10-14 de 06 de 2013). *Curso Internacional "Hidrología y Monitoreo Hidrológico en Ecosistemas Andinos"*. Lima, Perú.
- OEA. (2017). *Programa UNESCO/OEA ISARM-Américas Acuíferos Transfronterizos de las Américas*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de Organization of American States - Department of Sustainable Development: http://www.oas.org/dsd/WaterResources/projects/ISARMAmericas_esp.asp
- OIEA/GNIP. (2014). *Guía para el muestreo de la precipitación V2.02*. Organismo Internacional de Energía Atómica - Global Network of Isotopes in Precipitation.
- OMM. (2008). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial - OMM N° 8.
- OMM. (2011). *Guías de prácticas hidrológicas OMM-N° 168 (6° ed., Vol. I Hidrología - De la medición a la información hidrológica)*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. OMM-No. 385. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial - OMM.
- OMM, Banco Mundial, USAID. (2015). *El valor del tiempo y el clima: evaluación económica de los servicios meteorológicos e hidrológicos*. OMM - N° 1153. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial - OMM, Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional - USAID. Fondo Mundial para la Reducción de los Desastres y la Recuperación - GFDRR del Grupo del Banco Mundial.
- OTT Hydromet. (2019a). *Sensores para el medio ambiente*. (OTT Hydromet, Editor) Recuperado el 23 de 07 de 2019, de Productos- Nivel de agua: <http://www.ott.com/es-la/productos/nivel-de-agua-168/>
- OTT Hydromet. (2019b). *Sensores para el medio ambiente*. (OTT Hydromet, Ed.). Recuperado el 23 de 07 de 2019, de Instrucciones de funcionamiento Sonda manométrica OTT PLS: <http://www.ott.com/es-la/productos/nivel-de-agua-86/ott-pls-284/>
- OTT. (2019). OTT HydroMet. Obtenido de <https://www.ott.com/es-la/aplicaciones/agua-subterranea-38/>
- Pabón, J. D., Rojas, P. J., Montealegre, J. E., Robertson, K., Ceballos, J. L., Martínez, N., & Nájuez, E. (2001). *El Océano*. En IDEAM, *El medio ambiente en Colombia*. Bogotá D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Pearce, F. M. (1991). *The use of ICP-MS for the analysis of natural waters and evaluation of sampling techniques*. *Environmental Geochemistry and Health*, 13(2), 51-55.
- Pedrollo S.p.A. (2021). Obtenido de <https://www.pedrollo.com/es/productos/sumergidas-1/sumergida-de-3-137>
- Phillips, J. M., & Walling, D. E. (1995). *An assessment of the effects of sample collection, storage and resuspension on the representativeness of measurements on the effective particle size distribution of fluvial suspended sediment*. *Water Res.* 29, 2498-2508.
- Pinilla Agudelo, G. A. (2017). *Prácticas de Limnología: guías de laboratorio y campo*. Bogotá, D. C.: Facultad de Ciencias Universidad Nacional.
- Pinilla, G. (2010). *An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia*. *Ecological Indicators*, 848-856. doi:10.1016/j.ecolind.2010.01.006
- PNUMA; OMS; UNESCO; OMM. (1994). *Guía operativa GEMS/AGUA*. Tercera Edición. Proyecto PNUMA/OMS/UNESCO/OMM sobre el monitoreo mundial de la calidad del agua. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Power, M. E. (1990). *Effects of Fish in River Food Webs*. *Science*, 250(4982), 811-814. <https://doi.org/10.1126/science.250.4982.811>
- Prosser, S., Martínez, A., & Elías, M. (2013). *A new set of primers for COI amplification from freshwater microcrustaceans*. *Molecular Ecology Resources*, 13 (6), 1151-1155. doi:10.1111/1755-0998.12132
- Prygiel, J., & Coste, M. (2000). *Guide méthodologique pour la mise en oeuvre de l'Indice Biologique Diatomées NFT 90-354*. Bordeaux - Francia: Bordeaux: Agence de l'Eau Artois-Picardie, Cemagref.
- Raig. (18 de 03 de 2019). *Raig Instrumentos. Meteorología - Óptica - Precisión*. Recuperado el 23 de 08 de 2017, de Todo sobre pluviómetros: <https://www.raig.com/noticias/todo-sobre-pluviometros>
- Ramírez, A. (2006). *Ecología. Métodos y análisis de poblaciones y comunidades*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 271 p.
- Ramírez, A., & Viña, G. (1998). *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis* (1a ed.). Bogotá, D. C.: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., & Church, M. A. (2002). *Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler*. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128, 473-483. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(473)

- Reynolds, C. S. (2006). *Ecology of phytoplankton. Ecology, Biodiversity and conservation*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542145>
- RIRH. (2017). *Red Interamericana de Recursos Hídricos*. Recuperado el 20 de 06 de 2017, de Una Red del Agua para Todos: <http://www.iwrn.org/index.php?lang=es>
- Riss, W., Ospina, R., & Rodríguez, J. D. (2002). *Establecimiento de valores de Bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá*. *Caldasia*, 24(1), 135-156.
- Rivera, C. A., & Zapata, Á. (2009). *Criterios generales para la recolección, preservación, manejo de muestras y monitoreo de ecosistemas acuáticos epicontinentales*. En A. Acosta, Técnica de campo en ambientes tropicales: Manual para el monitoreo en ecosistemas acuáticos y artrópodos terrestres (1a ed., pp. 191-215.). Bogotá, D. C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rodríguez, C. O. (1975). *Determinación de la velocidad y dirección del agua subterránea en la Isla de San Andrés utilizando radiotrazadores*. *Geología Colombiana*, 9, 51-64. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30404>
- Roldán, G. (1992). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Colección Ciencia y Tecnología Universidad de Antioquia. Medellín. 128, Vol. 1.
- Roldán, Gabriel. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia, Fondo FEN, Colciencias. Obtenido de <https://www.ianas.org/docs/books/wbp13.pdf>
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Uso del método BMWP/Col. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Roldán, G. (2016). *Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica*. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, 40(155), 254-274. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Roldán, G., & Ramírez John. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical* (2ª ed.). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Rozanski, K., Froehlich, K., & Mook, W. G. (2002). *Sección III, Agua Superficial*. En UNESCO - IAEA, Instituto Geológico y Minero de España, & W. G. Mook (Ed.), *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Principios y Aplicaciones (pp. 243-301). Madrid, España: IGME.
- Rueda, G. (2002). *Manual de métodos en limnología*. (1a ed.). Bogotá, D. C.: Asociación Colombiana de Limnología.
- Ruiz, E., & Martínez, M. (2015). *Hidrología Aplicada: Evaporación y transpiración*. (Universidad del país vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, Edits.). Recuperado el 27 de 09 de 2017, de <https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=353>
- Samboní, N. (2009). *Estimación del índice de escasez empleando los indicadores de calidad y contaminación del agua en la cuenca alta del Río Cauca*. Tesis de Maestría, Programa Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Sánchez, F. (15 de 10 de 2019). *Hidrología, Hidrogeología*. Obtenido de Evapotranspiración: <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- Sánchez, M. (2001). *Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile*. (Geografía, Ed.) *Revista de Geografía Norte Grande* N° 28, 310. Obtenido de http://revista-nortegrande.cl/archivos/28/01_28_2001.pdf
- Sandbox. (2021). Obtenido de <https://www.sandboxcientifica.com/ingenieria-ambiental/>
- Schlumberger Water Services. (2014). *Manual de Diver*. Países Bajos.
- Schmidt, U. (1998). *Vegetación acuática y palustre de la sabana de Bogotá y plano del río Ubaté*. Tesis de grado para optar al título de magíster. Bogotá, D. C.: Universidad Nacional de Colombia.
- SCMH. (1974). *Apuntes de clase para el curso de hidrología práctica* (Parte I). Bogotá, D. C., Colombia: Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología - SCHM.
- Seiler, K.-P. (2002). *Sección V. Impacto antrópico sobre los sistemas subterráneos*. En UNESCO - IAEA, Instituto Geológico y Minero de España, & W. G. Mook (Ed.), *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*. Principios y Aplicaciones (pp. 427-484). Madrid, España: IGME.
- SFRC. (05 de 08 de 2020). *School of Forest Resources & Conservation*. Obtenido de Fisheries and Aquatic Sciences: <http://sfrc.ufl.edu>
- SGC. (2016a). *Modelo Hidrogeológico del departamento de La Guajira*. Bogotá, D. C.: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2016b). *Modelo Hidrogeológico de la zona sur del eje cafetero-Departamento del Quindío*. Bogotá, D. C.: Grupo de exploración de aguas subterráneas, Servicio Geológico Colombiano.
- Shiel, C. B., Duvergé, P. L., Smiddy, P., & Fairley, J. S. (1998). *Analysis of the diet of Leisler's bat (Nyctalus leisleri) in Ireland with some comparative analyses from England and Germany*. *Journal of Zoology*, 246(4), 417-425. doi: <https://doi.org/10.1017/S0952836998009819>
- Sierra, C. A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico* (1a ed.). (Ediciones de la U, Ed.) Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Smol, J. P., & Stoermer, E. F. (2010). *The Diatoms: Applications for the environmental and earth sciences*. (2nd ed.). UK: University Press, Cambridge.
- Smoot, G., & Novak, C. (1969). *Chapter 6. Discharge - Moving Boat Method*. In U. S. Geological Survey (Ed.), *Measurement of discharge by moving - boat method*. *Techniques of Water - Resources Investigations 03-A11* (Vol. I). doi:10.3133/twri03A11
- Smucker, N., & Vis, M. (2011). *Diatom biomonitoring of streams: Reliability of reference sites and the response of metrics to environmental variations across temporal scales*. *Ecological Indicators*, 1647-1657.
- Solinst. (2017). *Bomba Peristáltica*. (Solinst Canada Ltd., Productor). Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <https://www.solinst.com/espanol/productos/muestreadores-y-bombas-neumaticas/410-bomba-peristaltica/ficha-tecnica/>
- Solinst. (2021). Obtenido de <https://www.solinst.com/espanol/productos/ds/>

- SonTek. (06 de 08 de 2018). *FlowTracker2 Training Chapter 6 - Taking Multi-Point Measurements*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=nGZpQNhMXUg>
- Soska G. (1975). *Ecological relations between invertebrates and submerged macrophytes in lake littoral*. *Ekologia Polska* 23: 393-415.
- Stallman, R. W. (1976). *Chapter B1. Aquifer-Test Design, Observation and Data Analysis*. Book 3. Applications of Hydraulics. In USGS, *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Washington, D. C.: U. S. Geological Survey.
- Stark, J. D., Boothroyd, I. K., Harding, J. S., Maxted, J. R., & Scarsbrook, M. R. (2001). *Protocols for sampling macroinvertebrates in Wadeable streams*. New Zealand Macroinvertebrate Working Group report No. 1.
- Stevenson, R. J., & Bahls, L. L. (1999). *Periphyton Protocols*. In M. Barbour, J. Gerritsen, B. D. Snyder, & J. B. Stribling, *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish* (pp. 104-126.). Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, Office of water - USEPA 841-B-99-002.
- Sun, J., & Liu, D. (2003). *Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton*. *Journal of Plankton Research*, 1331-1346. doi:10.1093/plankt/fbg096
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Best, J. L., & Parsons, D. R. (2007). *Comparison of Fixed- and Moving Vessel Measurements with an ADP in a Large River*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, 1299 p.
- Taylor, C., & Alley, W. (2001). *Ground-Water-Level Monitoring and the importance of Long-Term Water-Level Data*. Denver, Colorado: U. S. Geological Survey Circular 1217.
- Tecnología y Recursos de la Tierra, S. A. L. (1991). *Aplicación de técnicas especiales al estudio hidrológico de zonas de baja permeabilidad. Isótopos y trazadores*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Teledyne RD Instruments. (2008). *WinRiver II User's Guide; P/N 957-6231-00*. Teledyne RD Instruments. A Teledyne Technologies Company. Obtenido de <http://www.teledynemarine.com/rdi>
- Tuinhof, A., Foster, S., Karim, K., Héctor, G., & Nanni, M. (2006). *Requerimientos de monitoreo de agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua*. Washington, D. C., Estados Unidos: GW-MATE Banco Mundial.
- Uil, H., Geer, F. V., Gehrels, J., & Kloosterman, F. (1999). *State of the art on monitoring and assessment of groundwaters*. Lelystad, Netherland: Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO, Delft, The Netherlands.
- UIT. (2017). *Cambio climático*. Recuperado el 09 de 10 de 2017, de Unión Internacional de Telecomunicaciones: https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=01&ipage=ict_and_climate_change&ext=html
- UJTL. (2018). PRT-LIMN-001 y 002. *Protocolos de campo y laboratorio para comunidades hidrobiológicas*. Laboratorio de limnología. Acreditación resolución 0923 del 17 de mayo de 2016. Bogotá, D. C.: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano - UJTL.
- Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú*. Lima: Ministerio de Ambiente.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3rd ed.). Peninsula Publishing.
- USGS. (09 de 11 de 2017). *Water Science for Schools - El Ciclo del Agua*. Recuperado el 21 de 10 de 2017, In USGS science for a changing world: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- UWITEC. (12 de 08 de 2019). *UWITEC, Sampling Equipment*. Obtenido de <http://www.uwitec.at>
- Vadeboncoeur Y., Steinman A. D. (2002). *Periphyton function in lake ecosystems*. *Scientific World Journal*. 2002 May 29; 2:1449-68. doi:10.1100/tsw.2002.294. PMID: 12805932; PMCID: PMC6009390.
- Valdés, J., Samboní, N., & Carvajal, Y. (2011). *Desarrollo de un Indicador de la Calidad del Agua usando Estadística Aplicada, Caso de Estudio: Subcuenca Zanjón Oscuro*. *Rev. Tecnológicas* (No. 26), 16 p.
- Valencia, M. (s. f.). *Curso de Aguas Subterráneas - Pruebas de bombeo de pozos*. Bogotá, D. C.: Aguas Subterráneas Ltda.
- Van Rijn, L. C. (2006). *Manual of Sediments Transport Measurements*. Amsterdam: Aqua Publication.
- Vargas, M. C., & Bobadilla, L. (s. f.). *Guías para el monitoreo de calidad de aguas subterráneas*. Bogotá, D. C.: Ingeominas. Sin publicar.
- Vargas, N. O. (2001). *Propuesta para la formulación, diseño e implementación de la Red Básica Nacional de seguimiento y muestreo de aguas subterráneas*. Bogotá, D. C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Venrick, E. L. (1978). *How many cells to count?* In Sournia, A. (ed.), *Monographs on Oceanographic Methods 6: Phytoplankton Manual*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. 167-180.
- Vicente, E., De Hoyos, C., Sánchez, P., & Cambra, J. (2005). *Protocolos de muestreo y análisis para fitoplancton*. En Confederación hidrográfica del Ebro, *Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Barcelona - España: Confederación Hidrográfica del Ebro, URS, Universidad de Barcelona, Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Universidad de Girona. Ministerio de Medio ambiente.
- Villafañe, V., & Reid, F. (1995). *Métodos de microscopía para la cuantificación del fitoplancton*. En K. Alveal, M. E. Ferrario, E. C. Oliveira, & E. Sar, *Manual de métodos ficológicos* (pp. 170-185.). Concepción Chile: Universidad de Concepción.

- VRBA, J. (1998). *Background monitoring for groundwater quality*. In UNESCO, *Monitoring for groundwater management in (semi)-arid regions* (pp. 35-45.). París, Francia.
- VRBA, J., & Soblsek, P. (1988). *Groundwater Monitoring*. In UNESCO-UNEP, *Geology and the environment, an International Manual*. Checoslovaquia: UNESCO.
- Wallace, R., & Snell, T. (2010). Rotifera. In J. H. T., & A. P. C., *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates* (pp. 173-235). Italy: Academic Press.
- Wantzen K. M., Junk W. J. (2000). *The importance of stream-wetland-systems for biodiversity: a tropical perspective*. In: GOPAL B, JUNK WJ, DAVIES JA (eds) *Biodiversity in Wetlands: assessment, function and conservation*. Backhuys, Leiden, The Netherlands, 11-34.
- Wantzen, K. M., & Pinto-Silva, V. (2006). *Uso de Substratos Artificiais para Avaliação do Impacto do Assoreamento*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, 11(1), 99-107.
- Wantzen K. & Rueda G. (2009). *Técnicas de muestreo de macroinvertebrados bentónicos*. En: Domínguez E. & Fernández H. R. (eds.). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología*. Tucumán (Argentina): Fundación Miguel Lillo. 656.
- Wetzel, R. (1990). *Clean water: A fading resource*. In V. Ilmavirta, & R. Jones, *the dynamics and use of lacustrine ecosystems*. Develop. Hydrobiol. Junk (Vol. 79, pp. 21-30.). Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-011-2745-5
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). San Diego: Academic Press.
- Wetzel, R., & Likens, G. (1991). *Limnological analyses* (2nd ed.). New York - USA: Springer-Verlag.
- Wetzel, R., & Likens, G. (2000). *Limnological Analyses* (3rd ed.). New York - USA: Springer-Verlag.
- Whipple, G., Fair, G., & Whipple, M. (1927). *The Microscopy of Drinking Water*. New York: John Wiley and Sons.
- Whitton, B. A., & Potts, M. (2000). *The ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space*. Kluwer Academic Publisher.
- Wren, D. G., Kuhnle, R. A. (2003). *Surrogate techniques for suspended-sediment measurement*. In: *Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*. Reno, NV. U.S. Geological Survey Circular 1250.
- Wright, S. A., Topping, D. J., & Williams, C. A. (2010). *Discriminating silt-and-clay from suspended-sand in rivers using side-looking acoustic profilers*. 12 p. Joint Federal Interagency Conference 2010: Hydrology and sedimentation for a changing future: existing and emerging issues. Las Vegas, Nevada.
- Zúñiga, M. D. (2009). *Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental*. En J. Cantera, Y. Carvajal & L. M. Castro (Comps). *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. Cali: Programa Editorial de la Universidad del Valle.



Embalse de Tominé-Guatavita
▣ Sebastián Gutiérrez

Glosario

En el siguiente enlace puede consultar de manera actualizada y dinámica los diferentes términos empleados en el desarrollo del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.

<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>



Anexos

Anexo 7-1	Formato diario de observaciones meteorológicas	584
Anexo 8-1	Libreta para observaciones mensuales de niveles, temperaturas del agua y muestreo de sedimentos en suspensión.....	585
Anexo 8-2	Lecturas fluviométricas y temperaturas diarias	591
Anexo 8-3	Formato cartera de nivelación	593
Anexo 8-4	Formato cartera de aforos	594
Anexo 8-5	Aforo y cálculo de caudal (m ³ /s)	595
Anexo 8-6	Formato de recolección de datos e información de medidas sobre la superficie del glaciar	596
Anexo 8-7	Formato muestras diarias de sedimentos	598
Anexo 8-8	Formato resumen de medición detallada de materiales en suspensión	599
Anexo 8-9	Formato medición detallada de sedimentos en suspensión	600

Anexo 8-10	Formato aforo de sedimentos en suspensión	601
Anexo 8-11	Formato aforo integrado líquido y sólido con bolsa plegable.....	602
Anexo 8-12	Formato aforo de sedimentos en suspensión bolsa plegable.....	603
Anexo 8-13	Formato aforo por suspensión y cálculo de caudal (m ³ /s).....	604
Anexo 8-14	Formato de control de filtración de aforos sólidos	605
Anexo 8-15	Formato de control de calcinación de aforos sólidos.....	606
Anexo 8-16	Formato captura de datos en campo para agua superficial	607
Anexo 8-17	Formato plan de muestreo	609
Anexo 8-18	Formato ficha descriptiva de estaciones de muestreo	611
Anexo 8-19	Formato de registro taxonómico y número de organismos	613
Anexo 8-20	Formato lista de chequeo para el monitoreo del recurso hídrico.....	614
Anexo 8-21	Formato captura de datos en campo	615
Anexo 8-22	Captura de datos de campo para macroinvertebrados acuáticos y diatomeas	617
Anexo 9-1	Formato de toma de niveles de agua subterránea.....	619
Anexo 9-2	Formato de pruebas de bombeo	620
Anexo 9-3	Formato de toma de datos de calidad de aguas subterráneas.....	623
Anexo 9-4	Lista de chequeo de equipos y materiales para el monitoreo de aguas subterráneas.....	625
Anexo 9-5	Formato de cadena de custodia	626
Anexo 10-1	Formato de toma de muestras de isótopos en agua lluvia.....	627
Anexo 10-2	Formato de toma de muestras mensuales de isótopos en agua lluvia.....	628
Anexo 10-3	Formato de toma de muestras de isótopos en agua superficial	629
Anexo 10-4	Formato de toma de muestras de isótopos en agua subterránea	630

Formato diario de observaciones meteorológicas

Estación: _____ Código: _____
 Municipio: _____ Elevación: _____
 Categoría: _____ Fecha: _____

Día	HLC	Más o menos	Temperatura y humedad				Nubosidad categoría	Fenómenos						Lecturas a las 07 HLC				
			Mínima 07 Máxima 19	Termómetro		Termógrafo °C		Higrógrafo %	Lluvia	Granizo	Helada	Bruma	Niebla	Tormenta eléctrica	Viento fuerte	Lluvia PM mm	Evaporación TEV mm	Recorrido ANM Km
				Seco °C	Húmedo °C													
1	7																	
	13																	
	19																	
2	7																	
	13																	
	19																	
3	7																	
	13																	
	19																	
4	7																	
	13																	
	19																	
5	7																	
	13																	
	19																	
6	7																	
	13																	
	19																	
7	7																	
	13																	
	19																	
8	7																	
	13																	
	19																	

Día	HLC	Más o menos	Temperatura y humedad				Nubosidad categoría	Fenómenos						Lecturas a las 07 HLC				
			Mínima 07 Máxima 19	Termómetro		Termógrafo °C		Higrógrafo %	Lluvia	Granizo	Helada	Bruma	Niebla	Tormenta eléctrica	Viento fuerte	Lluvia PM mm	Evaporación TEV mm	Recorrido ANM Km
				Seco °C	Húmedo °C													
9	7																	
	13																	
	19																	
10	7																	
	13																	
	19																	
11	7																	
	13																	
	19																	
12	7																	
	13																	
	19																	
13	7																	
	13																	
	19																	
14	7																	
	13																	
	19																	
15	7																	
	13																	
	19																	
16	7																	
	13																	
	19																	

Convenciones :
 PM: Pluviómetro; TEV: Tanque de evaporación; ANM: Anemómetro.

Libreta para observaciones mensuales de niveles, temperaturas del agua y muestreo de sedimentos en suspensión.

Corriente: _____

Estación: _____

Código: _____

Departamento: _____

Municipio: _____

Cotas de referencia: _____

Arbitraria

Real

Cotas plano cero de la mira: _____

Fecha: _____

Nombre (s) observador (es):

Dirección: _____

Nombre (s) inspector (es): _____

Observaciones extraordinarias durante crecidas

Cuando el nivel del agua pase de _____ cm en la mira, el observador deberá hacer lecturas extraordinarias de nivel, temperatura del agua y sedimentos (en la estación que tenga este programa) cada _____ horas, hasta que el nivel vuelva a bajar de _____ cm.

Nombre del funcionario.

Cargo: _____

Fecha: _____

Nota

En caso de pérdida, favor devolver la libreta al observador o remitirla por correo al:

Esta libreta contiene información que solo interesa al organismo en mención.

Gracias.

Mes: _____ Año: _____

Día	Niveles (cm) horas		Temperatura (°C) horas		Sedimentos en suspensión número de la botella			Observaciones
	06	18	06	18	¼ del ancho	½ del ancho	¾ del ancho	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Día	Niveles (cm) horas		Temperatura (°C) horas		Sedimentos en suspensión número de la botella			Observaciones
	06	18	06	18	¼ del ancho	½ del ancho	¾ del ancho	
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								

Mes: _____ Año: _____

Aforo y cálculo de caudal (m³/s)


Río: _____ Cuenca: _____ Estación: _____ Fecha: _____ Hora inicial: _____ Final: _____ Nivel inicial: _____ Final: _____ Medio: _____ Velocidad media: _____ m/s Ancho: _____ m. Área sección: _____ m² Caudal: _____ m³/s.	Molinete N°.: _____ Tipo: _____ Rotor: _____ N°. del aforo desde la última calibración del molinete: _____ Ecuación o N°. de la tabla de calibración: _____ _____ Tipo de aforo: _____ Método: _____
--	--

Distancias desde PR (m) Orilla	Profundidades (m)		Revoluciones			Velocidades (m/s)			Sección			Caudal parcial (m³/s)
	PT	PA	(N°)	(s)		VP	VMV	VM	PM (m)	AP (m)	SP (m²)	
			N	T	N / T							

Observaciones especiales:	Total	m	m²	m³/s
Aforadores:	Calculó:			Revisó:
PR: Punto fijo de referencia PT: Profundidad total PA: Profundidad de aforo N: Número de revoluciones	T: Tiempo de aforo N/T: Revoluciones por segundo VP: Velocidad puntual VMV: Velocidad media en la vertical			VM: Velocidad media PM: Profundidad media AP: Ancho parcial SP: Sección parcial


Formato de recolección de datos e información de medidas sobre la superficie del glaciar

La recolección de los datos para la operación estadística balance de masa glaciar se obtiene por medio de mediciones directas sobre la superficie glaciar del sitio seleccionado. Normalmente se realizan medidas en la zona de ablación y de acumulación por medio de una red de estacas o balizas. Dadas las condiciones de la obtención, hechas sobre la superficie del glaciar de estudio, se establece imprimir o emular exactamente en las libretas de campo las veces que sea necesario, los siguientes formatos o instrumentos de recolección.

1. Formato para impresión - medidas sobre balizas de ablación				
Balance de masa Datos de campo Balizas de ablación		Fecha: dd/mm/aaaa	Quiénes:	
# Baliza	Emergencia (cm)	Sección	Nieve (cm)	 (x)
Balance de masa Datos de campo Balizas de ablación		Fecha: dd/mm/aaaa	Quiénes:	
# Baliza	Observaciones:			

Formato de recolección de datos e información de medidas sobre la superficie del glaciar

2. Formato para impresión - medidas sobre pozo de almacenamiento

Balance de masa Datos de campo Balizas de ablación		Fecha: dd/mm/aaaa	Quiénes:	
Profundidad del pozo (cm):				
# Muestra	Longitud (cm)	Peso total (g)	Tipo	 (x)

Balance de masa Datos de campo Balizas de ablación		Fecha: dd/mm/aaaa	Quiénes:	
# Muestra	Observaciones:			

Formato muestras diarias de sedimentos

Código				Estación																	
Corriente				Departamento																	
Municipio				Latitud	Longitud	Altitud	Entidad														

Código	TI	Año	Mes

Día	Hora	Mira cm	Distancia desde PR	Muestra o filtro N°.	Volumen ml	Crisol N°.	Tara mg	Peso bruto mg	Caudal medio m³/s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
01			1/4						
			1/2						
			3/4						
02			1/4						
			1/2						
			3/4						
03			1/4						
			1/2						
			3/4						
04			1/4						
			1/2						
			3/4						
05			1/4						
			1/2						
			3/4						
06			1/4						
			1/2						
			3/4						
07			1/4						
			1/2						
			3/4						
08			1/4						
			1/2						
			3/4						
09			1/4						
			1/2						
			3/4						
10			1/4						
			1/2						
			3/4						
11			1/4						
			1/2						
			3/4						
12			1/4						
			1/2						
			3/4						

Convenciones

TI: Tipo de Información, Ejemplo: Nivel, o aforo solido

Formato medición detallada de sedimentos en suspensión

																		Fecha									
																		dd	mm	aa							
																		PAG.		de:							
Estación:				Corriente:				Zona:				Subzona:				Código:											
N:		E:		Altitud:		Equipo:		Integrado:		Puntual:		Hora inicial:		Hora final:													
Nivel inicial (m):				Nivel final (m):				Nivel promedio (m):				Caudal:				m³/s		l/s:									
Inspector:						Laboratorista:						Área operativa:															
Dis- tancia desde PR	Profundidad		Velocidad		Mu.	Volumen	Crisol	Tara	Peso	C	Cm	GSP	GSP	Dy	GSPV	GSV	GSV	Dx	S								
	Total	Puntual	Aforador	Proceso	Nº	ml (gr)	Nº	mg	mg	mg/l	mg/l	g/m².s	g/m².s	m	g/m.s	g/m.s	g/m.s	m	kg/s								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20								
1																											
1/4																											
1/2																											
3/4																											

Convenciones

PR: Punto de referencia; Mu.: Muestra; C: Concentración; Cm: Concentración media; GSP: Gasto sólido puntual; GSPV: Gasto sólido puntual por vertical; GSV: Gasto sólido en la vertical; Dy: Distancia en Y; Dx: Distancia en X; S: Transporte.

Formato aforo de sedimentos en suspensión

Inspector:				Estación:				Código		TI	Fecha			Hora inicial	
Laborista:				Corriente:		Depto.:		2		9	11	A	M	D	17
								A		S					:
T R	Hora final	Temperatura (°C)	Equipo	Nivel inicial (cm)	Nivel final (cm)	Nivel promedio (cm)	Caudal (m³/s)	# Verticales	T _A	θ	S	<input type="checkbox"/> Calcinación a _____ °C <input type="checkbox"/> Filtración sin calcinación <input type="checkbox"/> Evaporación			<input type="checkbox"/> Integrado <input type="checkbox"/> Puntual
	22	27	31	39	44	49	54	61	63	64	65				
T R	Observaciones						Aforadores:								
3	22														
T R	Distancia punto de referencia (B)	Profundidad (m)		Velocidad (m/s)		Muestra	Volumen (m³) (F)	Crisol N°.	Tara (g) (G)	Peso (g) (H)					
		Total (C)	Puntual (D)	Aforador	Proceso (E)										
3	1/4						22			27			33		
	1/2						39			33			50		
	3/4						56			44			67		
T R	22	.	29	.	34	.	39			45			50		56
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									
		.		.		.									

Convenciones

TI: Tipo de información, en este caso AS: aforo sólido.

TA: Tipo de aforo.

θ: Ángulo de arrastre.

S: Sección (Número de secciones del aforo).

Formato aforo por suspensión y cálculo de caudal (m³/s)

Hoja: _____ de: _____ Hojas Río: _____ Cuenca: _____ Estación: _____ Código: _____ Fecha: _____ Hora inicial: _____ Hora final: _____ Velocidad media: _____ (m/s): _____ Ancho: _____ (m) Área de sección: _____ (m ²) Caudal: _____ (m ³ /s)	Molinete N°.: _____ Tipo: _____ Rotor: _____ Aforo desde la última calibración: _____ Ecuación(es) N°. tabla de calibración: _____ Método: _____ Nivel inicial: _____ Nivel final: _____ Nivel medio: _____
--	---

Distancia desde PR. (m) orilla	(1) AS (m)	(2) AA GS	(3) LS + CL (m)	(4) CL (m)	(5) (m) (3) - (4)	(6) PA (m)	(7) N	(8) T (s)	(9) N/T	(10) VP (m/s)	(11) VMV (m/s)	(12) C2 (m)	(13) (m) (5) - (12)	(14) PM (m)	(15) VM (m/s)	(16) AP (m)	(17) SP (m ²)	(18) (m ³ /s) (15)-(17)

Observaciones:				Total
AS: Altura de suspensión AA: Ángulo de arrastre LS: Línea sumergida CI: Corrección por AS	PA: Profundidad de aforo N: Número de revoluciones T: Tiempo N/T: Revoluciones por segundo VP: Velocidad puntual	VMV: Velocidad media en la vertical C2: Corrección PO LS PO: Profundidad observada LS: Línea sumergida PT: Profundidad total	AP: Ancho parcial SP: Sección parcial PM: Profundidad media VM: Velocidad media	Inspector Calculó Revisó

Formato de control de filtración de afloramientos sólidos

Estación o corriente	Fecha de afloramiento	Fecha de filtración	Nº. muestras

Formato captura de datos en campo para agua superficial

Código de laboratorio (para llenar en el laboratorio):

Responsable del muestreo: _____ Firma: _____

Fecha de muestreo (dd/mm/aaaa): / / Hora (hh:mm): a. m. p. m.

Corriente: _____ Estación: _____

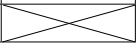
Municipio: _____ Departamento: _____ Código estación: _____

Latitud ° ' " Longitud ° ' " Altitud m s.n.m. Mira cm

pH: _____ Temperatura: _____ °C C.E. _____ μS/cm mS/cm Tipo de muestra: Simple ___ Integrada ___ Compuesta ___

OD Winkler: _____ Vol. Alícuota 1: _____ ml Vol. Tiosulfato 1: _____ ml O.D Winkler 1: _____ mg/l

Concentración Tiosulfato: _____ N Vol. Alícuota 2: _____ ml Vol. Tiosulfato 2: _____ ml O.D Winkler 2: _____ mg/l

Calibración pH		Calibración conductividad eléctrica	
Inventario de pHmetro No.:	T (°C)	Inventario de conductímetro No.:	T (°C)
Buffer de pH 7.00		Cero al aire	
Buffer de pH 4.00		Estándar 1413 μS/cm	
Pendiente		Estándar de control (μS/cm)	

Código sub muestra	Descripción	Efectuar análisis de:	Preservación	Vo. Bo. LQB	Observaciones
1	Muestra				
2	Réplica				
3	Testigo				
4	Adicionado				
5	Muestra				
6	Réplica				
7	Testigo				
8	Adicionado				
9	Testigo				
10	Adicionado				
11	Muestra				
12	Réplica				
13	Testigo				
14	Adicionado				
15	Muestra				
16	Muestra en sedimentos				
17	Muestra				
18	Réplica				
19	Adicionado				
20	Muestra				
21	Réplica				
22	Otros				

Formato captura de datos en campo para agua superficial

23					
24					
25					
26					

Espacio exclusivo para diligenciar en el Laboratorio

LQB: Líder Química Básica

Observaciones

Apariencia del cuerpo de agua: objetos flotantes _____ olor _____ otros _____

Nubosidad / Precipitación durante el muestreo sí no

Actividades en la zona cercana al punto de muestreo:

Agricultura	sí	no	Tipo	
Ganadería	sí	no	Tipo	
Industria	sí	no	Tipo	
Población	sí	no	Tipo	Ciudad (>20 000 hab.) <input type="checkbox"/> Pueblo <input type="checkbox"/> Caserío <input type="checkbox"/> Casa <input type="checkbox"/> Población estimada: _____
Otras				

Se conoce sobre aplicación intensiva de plaguicidas: sí no Cuál: _____

Se conoce sobre aplicación intensiva de fertilizantes: sí no Cuál: _____

Envío al laboratorio

Fecha de envío: (dd/mm/aaaa): / / Cantidad de paquetes enviados:

Forma de transporte: Aéreo Terrestre Otro: _____ Empresa: _____

Uso exclusivo del laboratorio

Recepción en el laboratorio

Nombre de quien recibe: _____ Firma: _____

Fecha de recibo: (dd/mm/aaaa): / / Cantidad de paquetes recibidos: neveras

Inventario: Botellas de vidrio Botellas de plástico Bolsas Formato sí no

Estado de las neveras: Correcto Sin sello Destapadas Refrigeración: Buena Aceptable Nula

Botellas mal tapadas Botellas rotas Botellas sin rótulo

Observaciones: _____

Radicación de muestras

Nombre de quien radica: _____ Firma: _____

Fecha de almacenamiento (dd/mm/aaaa): / / Hora (hh:mm): : a. m. p. m.

Observaciones: _____

Responsable digitación: _____ Vo. Bo. digitación: _____

Formato plan de muestreo

Coordinador: _____ Contactos de emergencia: _____ Periodo hidrológico: _____

Objetivo del muestreo: _____ Rango de fechas: _____

Estación y código	Acceso, descripción, características y observaciones	Contactos	Tipo de muestra	Matrices	Tipo variables	Controles calidad
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica
			<input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Compuesta <input type="checkbox"/> Integrada	<input type="checkbox"/> Agua Sup <input type="checkbox"/> Sedimento	<input type="checkbox"/> In situ-FQ <input type="checkbox"/> Microbiológico <input type="checkbox"/> Hidrobiológico <input type="checkbox"/> Metales <input type="checkbox"/> Caudal	<input type="checkbox"/> Blanco <input type="checkbox"/> Testigo <input type="checkbox"/> Adicionado <input type="checkbox"/> Réplica

Formato plan de muestreo

Participantes		Riesgos			Transp. de personal
Responsabilidad	Nombres	Físicos	Químicos	Biológicos	<input type="checkbox"/> Terrestre
Alistamiento y lista de chequeo		<input type="checkbox"/> Ruido	<input type="checkbox"/> Ácidos	<input type="checkbox"/> Microorganismos	<input type="checkbox"/> Fluvial
Verificación de equipos		<input type="checkbox"/> Temperatura	<input type="checkbox"/> Gases	<input type="checkbox"/> Anfibio o reptil	<input type="checkbox"/> Aéreo
Diligenciar formatos		<input type="checkbox"/> Caídas a nivel	<input type="checkbox"/> Vapores	<input type="checkbox"/> Insectos	Transp. de muestras
Variables in situ		<input type="checkbox"/> Radiación UV	<input type="checkbox"/> Polvos	<input type="checkbox"/> Mamíferos	<input type="checkbox"/> Terrestres
Toma de muestras, preservación y manejo de controles de calidad		<input type="checkbox"/> Golpes y cortes	<input type="checkbox"/> Sustancias	<input type="checkbox"/> Heces u orgánicos	<input type="checkbox"/> Fluvial
Control de temperatura, embalaje y envío de muestras		Otro:	Otro:	Otro:	<input type="checkbox"/> Aéreo

Formato ficha descriptiva de estaciones de muestreo

Nombre de la estación: _____ Código de la estación: _____

Corriente: _____ Municipio: _____ Departamento: _____
Latitud: _____ Longitud: _____ Altitud: _____ m s. n. m.

Corriente vadeable Corriente no vadeable

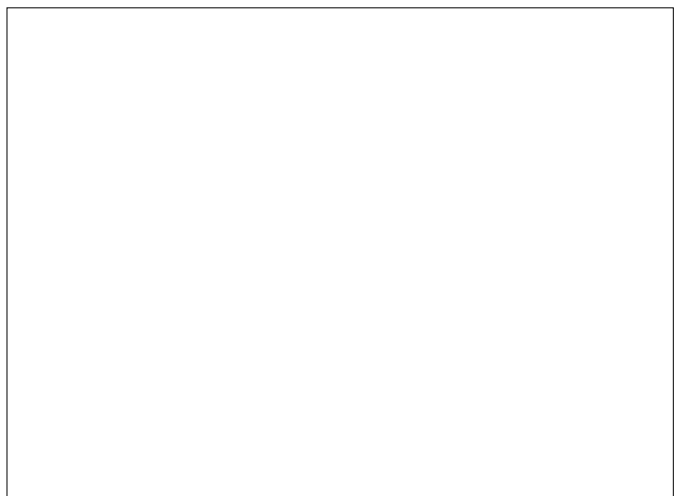
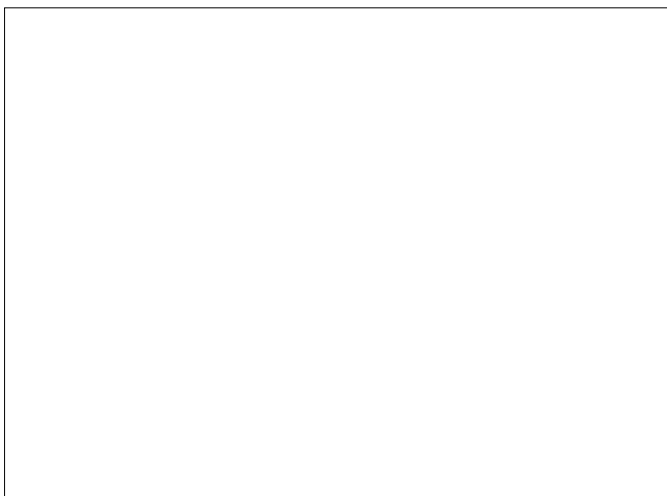
Descripción general de la estación
Profundidad media (m): _____ Ancho del cauce (m): _____ Velocidad de la corriente (m/s): _____

Uso actual del suelo: _____
Cambios de uso del suelo en los últimos años: _____
Especies predominantes en la vegetación de ribera: _____

Parámetros fisicoquímicos muestreados: _____

Comunidades biológicas muestreadas: _____

Registro fotográfico de la estación:



Formato ficha descriptiva de estaciones de muestreo

Esquema del lugar de muestreo:

Ruta de acceso que facilita el muestreo:

Aspectos relevantes por tener en cuenta para el muestreo de esta estación:

Histórico de muestreos:

Fecha de muestreo:

dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.
dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.
dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.
dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.
dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.
dd	-	mm	-	aaaa	Hora:	hh:mm	a. m.	p. m.

Formato lista de chequeo para el monitoreo del recurso hídrico

Salida de elementos a campo		Objeto de la comisión	Revisión 1	Revisión 2	Llegada de elementos de campo		
Alistamiento bodega Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:	Revisión comisionado Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:		Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:	Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:	Alistó comisionado Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:	Revisión bodega Fecha: dd/mm/aaaa Hora: Responsable:	
Para protección, seguridad y calidad							
Gafas y sombrero	Tapabocas	Guantes	Fontanero	Chaleco salvavidas	Adicionado	Cámara y cargador	
Bolsa residuos	Machete	Botas	Linterna	Bolsa para residuos	Testigo	GPS y mapa	
Baterías de equipos	Cinta y tijeras	Neveras	Bloqueador solar	Botiquín	Blanco	Plan de muestreo	
Hidratación	Fichas seguridad químicos	Marcador	Bolígrafo y tabla de soporte	Doc. identificación	Testigo temperatura		
Instructivos trabajo	Formatos captura datos	Instructivos equipos	Buffer calibración (4.0-7.0-10.0) (1413.60)	Hielo, pilas, refrigerantes	Solución Mantenimiento sondas	ARL	
Para medición de parámetros en campo y toma de muestras fisicoquímicas y microbiológicas							
Multiparámetros ref.:	Balde integrador con dispensador	Cinta indicadora de pH	Recipientes rotulados	Solución alcaliyoduro	Bureta	H ₂ SO ₄	
Sondas	Frasco lavador	Botella muestreadora	Botella Winkler	Tiosulfato de sodio	Probeta	HNO ₃	
Balde con lazo	Agua destilada	Mezclador o agitador	Solución de MnSO ₄	Solución almidón	Erlenmeyer	Toallas	
Para aforo de caudal							
Planillas	Malacate	Tabla con polea	Molinete completo	Cola estabilizadora	Ecosonda	Cinta aislante	
Cinta métrica	Varilla de vadeo	Contador revoluciones	Lazo	Escandallo	Caja herramientas		
Para toma de muestras de sedimentos							
Pala plástica		Bandeja de cuarteo			Bolsas rotuladas		
Para toma de muestras de macroinvertebrados acuáticos							
Corazonador	Bolsas o recipientes rotulados		Tamiz		Draga		
Red Surber y atomizador		Pinceles	Etanol 96%		Formol 40%		
Para toma de muestras de diatomeas bentónicas							
Cuadrante	Recipiente enjuague	Cepillo duro (1 x estación)	Frasco lavador etanol 96%		Recipientes ámbar rotulados		
Relacione los responsables del envío de las muestras y los números de guía de transporte.							
Observaciones	*N:(NO) S:(SÍ)						

Formato captura de datos en campo

Código de laboratorio: _____

1. Información de campo

Responsables del muestreo: _____ Firmas: _____

Fecha de muestreo: - - hora: Corriente: _____

Estación: _____ Municipio: _____ Departamento: _____

Latitud: _____ Longitud: _____ Altitud: _____ m s. n. m.

pH: _____ Temperatura: _____ °C Conductividad: _____ μS/cm mS/cm Oxígeno disuelto: _____ mg/l

Período hidrológico muestreado: aguas altas aguas bajas aguas en ascenso aguas en descenso

Cambios atípicos del caudal: crecidas sequías Tipo de corriente: vadeable no vadeable

2. Descripción general del sitio de muestreo:

Profundidad media (m): _____ Ancho del cauce (m) _____ Velocidad de la corriente (m/s): _____

Uso del suelo: ganadería agricultura área protegida explotación de recursos naturales centros poblados urbanos

centros poblados rurales industria minería

Vegetación de ribera: pastos herbáceas arbustos arbóreas banca erosionada banca intervenida

Vegetación de ribera cubre la mayor parte del tramo muestreado: sí no

Aspecto general del agua: limpia limpia con objetos flotantes contaminada mal olor espuma manchas de aceite

Perturbaciones aguas arriba: presas canalizaciones vertimientos

Perturbaciones del ambiente en el momento del muestreo (lluvia, niebla, paso de animales): _____

3. Descripción específica del muestreo de ficoperifiton:

Sustratos duros: Sustratos no removibles: Sustratos blandos: Macrófitas, hojas, musgos: Sustratos artificiales:

Descripción de sustratos muestreados: _____

Área muestreada (cm²): _____ Tiempo de muestreo para muestreo semicuantitativo (min.): _____

4. Descripción específica del muestreo de diatomeas y ficoperifiton:

Sustratos muestreados (%): cantos rodados (6-25 cm) bloques (>25 cm) hojarasca

sustratos no naturales (ladrillos, baldosas) macrófitas vegetación inundada infraestructura en concreto

Otros sustratos muestreados: _____ Número de sustratos muestreados: _____ Área total muestreada aprox. (cm²): _____

5. Caracterización del tramo de muestreo de macroinvertebrados:

Tipo de hábitat				Porcentaje	Número de unidades de muestreo	Medidas de la red (base/tamaño de poro)	Área muestreada cm ²	Observaciones
No.	Microhábitat	Lótico	Léntico					
1	Superficie del agua							
2	Arenas-limos-arcillas							
3	Gravas-cantos rodados							
4	Bloques							
5	Sustratos artificiales (ladrillos, baldosas)							
6	Macrófitas emergentes							
7	Macrófitas sumergidas							
8	Vegetación inundada							
9	Restos vegetales (madera, ramas, hojarasca)							
Total: 100 %					Total:			

6. Descripción específica del muestreo de plancton:

Profundidad disco Secchi (m): _____ Profundidad punto de muestreo (m): _____

Fitoplancton: Tipo de muestra: Cualitativa Cuantitativa Integrada Puntual

Profundidades de toma de muestras (m): _____ Volumen filtrado (l) - Muestra cualitativa: _____

Formato captura de datos en campo

Zooplancton: Tipo de muestra: Cualitativa Cuantitativa Integrada Puntual
 Profundidades de toma de muestras (m): _____ Volumen filtrado (l): _____

7. Descripción específica del muestreo de macrófitas:

Cobertura vegetal de las orillas: Pastizal Estrato arbóreo Estrato arbustivo Actividad antrópica
 Morfología de las orillas: Pendiente suave Pendiente fuerte Playas Sinuosidad
 Georreferenciación de los transectos: _____

8. Esquema del lugar de muestreo: señalar margen y dirección de la corriente, marcar lugar de muestreo de diatomeas y macroinvertebrados, particularidades de la orilla que permitan la identificación de los puntos en posteriores muestreos.

9. Observaciones:

Envío al laboratorio

Fecha de envío: - -

Número de frascos ficoperifiton: Número de frascos diatomeas:
 Número de frascos macroinvertebrados: Número de bolsas macroinvertebrados:
 Número de frascos fitoplancton: Número de frascos zooplancton:
 Número de frascos macrófitas: Número de bolsas macrófitas:
 Forma de transporte: Aéreo Terrestre Otro: Empresa: _____

**Uso exclusivo del laboratorio
Recepción en el laboratorio**

Nombre de quien recibe: _____ Firma: _____

Fecha de recibo: - - Hora:
 Número de frascos ficoperifiton: Número de frascos diatomeas:
 Número de frascos macroinvertebrados: Número de bolsas macroinvertebrados:
 Número de frascos fitoplancton: Número de frascos zooplancton:
 Número de frascos macrófitas: Número de bolsas macrófitas:

Formato de campo: sí no Estado de las neveras que contienen el material: Correcto Sin sello Destapadas
 Refrigeración: Buena Aceptable Nula
 Observaciones: _____

Radicación de muestras

Nombre de quien radica: _____ Firma: _____

Fecha de almacenamiento: - - Hora:
 Observaciones: _____

Captura de datos de campo para macroinvertebrados acuáticos y diatomeas

Código de laboratorio (para diligenciar en el laboratorio de calidad ambiental):

Responsable del muestreo: _____ Firma: _____ Hora: _____ Fecha: _____

Corriente: _____ Estación: _____ Municipio: _____ Depto.: _____

Latitud: _____ Longitud: _____ Altitud: _____ m. s. n. m. pH: _____ Temperatura: _____ °C OD: _____ mg/l CE: μS/cm _____

Periodo hidrológico de muestreo y cambios atípicos de caudal:

Aguas altas Aguas bajas Aguas en ascenso Aguas descenso Crecidas Sequías Corriente vadeable s__ n__

Descripción general sitio de muestreo:

Profundidad media (m): _____ Ancho del cauce (m): _____ Velocidad (m/s): _____ Perturbaciones durante muestreo (lluvia, niebla, paso de animales): _____

Vegetación de ribera: Pastos Herbáceas Arbustos Arbóreas Banca erosionada Banca intervenida

Vegetación de ribera cubre la mayor parte del tramo muestreado: s__ n__ Perturbaciones aguas arriba: s__ n__ Presas Canalizaciones Vertimientos

Aspecto general del agua Limpia Con objetos flotantes Contaminada Mal olor Espuma Manchas de aceite

Uso del suelo Ganadería Agricultura Área protegida Explotación de recursos naturales
 Industria Minería Centros poblados urbanos Centros poblados rurales

Descripción específica del muestreo de diatomeas:

% Sustratos muestreados Canto rodado (6-25 cm) Bloques >25 cm Hojarasca Sustrato no natural o artificial Macrófitas Vegetación inundada
 Infraestructura en concreto Otros sustratos muestreados: _____ No. sustratos muestreados: _____ Área total aprox. (cm): _____

Caracterización del tramo de muestreo macroinvertebrados:

Tipo de hábitat	Lótico <input type="checkbox"/> Léntico <input type="checkbox"/>	Porcentaje	Número de unidades de muestreo	Área de la red (cm²)	Área total muestreada (cm²)	Observaciones
Nº.	Microhábitat					
1	Superficie del agua					
2	Arenas-limos-arcillas					
3	Gravas-cantos rodados					

Tipo de hábitat	Lótico <input type="checkbox"/> Léntico <input type="checkbox"/>	Porcentaje	Número de unidades de muestreo	Área de la red (cm ²)	Área total muestreada (cm ²)	Observaciones
4	Bloques					
5	Sustratos artificiales (ladrillos, baldosas)					
6	Macrófitas emergentes					
7	Macrófitas sumergidas					
8	Vegetación inundada					
9	Restos vegetales (madera, ramas, hojarasca)					
Totales		100%				

Esquema del lugar de muestreo: Señalar margen y dirección de la corriente, marcar lugar de muestreo para diatomeas y macroinvertebrados, particularidades de la orilla, que permitan identificación de los puntos en posteriores muestreos.

Observaciones:

Captura de datos de campo para macroinvertebrados acuáticos y diatomeas

Cadena de custodia

Envío al laboratorio

Fecha del envío (dd/mm/aaaa):		Número de muestras de diatomeas:			
Número de bolsas con macroinvertebrados:		Número de frascos con macroinvertebrados:			
Forma de transporte:	Aéreo <input type="checkbox"/>	Terrestre <input type="checkbox"/>	Otro <input type="checkbox"/>	Empresa: _____	

Uso exclusivo del laboratorio

Recepción en el laboratorio

Nombre de quien recibe:		Firma:			
Fecha de recibido:		Hora:			
Número de muestras de diatomeas:		Número de frascos con macroinvertebrados:			
Formato de campo: _____	Estado de las neveras que contienen el material:		Correcto <input type="checkbox"/>	Sin sello <input type="checkbox"/>	Destapadas <input type="checkbox"/>
Estado de la refrigeración de las muestras:	Buena <input type="checkbox"/>	Mala <input type="checkbox"/>	Nula <input type="checkbox"/>	Observaciones:	

Radicación de muestras

Nombre de quien radica:		Firma:			
Fecha de almacenamiento:		Hora:			
Observaciones: _____					

Formato de toma de niveles de agua subterránea

Información general

Nombre del proyecto/programa: _____
 Diligenciado por: _____ Fecha: dd / mm /aaaa

Información del punto

Nombre del propietario: _____ Vereda: _____
 Dirección del predio: _____ Municipio: _____
 Teléfono: _____ Departamento: _____

Tipo de punto: Pozo Aljibe Piezómetro Manantial
 Condiciones del punto: Productivo Reserva Abandonado Inactivo Sellado Monitoreo
 Coordenadas: _____ E _____ N Altura: _____ m
 Identificador del punto: _____

Información de medición de niveles

Datos de construcción Régimen de bombeo: _____ horas/día
 Diámetro de la perforación: _____ in _____ día/semana
 Profundidad del punto: _____ m Tiempo de bombeo: _____ horas/día
 Altura de la boca-cabeza del punto: _____ m
 Tiempo desde el apagado de la bomba: _____ minutos _____ horas
 Nivel medido del agua: _____ m
 Tipo de medición: estático dinámico

Formato de pruebas de bombeo

Información general

Nombre del proyecto/programa: _____

Diligenciado por: _____

Fecha: dd / mm /aaaa

Información del punto

Identificador del punto: _____

Nombre del propietario: _____

Vereda: _____

Dirección del predio: _____

Municipio: _____

Teléfono: _____

Departamento: _____

Coordenadas: _____ E _____ N

Altura: _____ m

Información de la prueba

Fecha inicio prueba: dd / mm /aaaa

Hora inicio prueba: dd / mm /aaaa

Duración del bombeo: _____ (min.)

Duración de la recuperación: _____ (min.)

Caudal promedio: _____ (l/s)

Tipo de prueba: Caudal constante

Slug test

Caudal variable

Escalonada

Valvuleo

Otra

Método de medida del caudal: Baldeo

Reportado

Estimado

Venturímetro

Vertedero

Canaleta Parshall

Volumétrico

Cortador

Totalizador

Molinete

Trazador

Orificio

Tubo pitot

Equipo utilizado: Bomba

Compresor

Motobomba

Datos de la prueba de bombeo

Pozos de observación:

Nombre o identificación del punto	Distancia al pozo de bombeo

Croquis de ubicación de pozos de observación

Observaciones

Prueba a caudal constante-Datos del bombeo

Pozo de bombeo

Pozo de observación

Identificador del punto: _____

Diferencia entre el punto de lectura y la placa de nivelación: _____ m

Diámetro del pozo: _____

Profundidad del nivel estático: _____ m

Profundidad del pozo: _____

Fecha de medición del nivel estático: dd / mm /aaaa

Hora de medición del nivel estático: _____

Fecha/hora	Tiempo (min.)	Profundidad del nivel (m)	Abatimiento (m)	Caudal medido (l/s)	Observaciones
	0				
	0.5				
	1				
	1.5				
	2				
	2.5				
	3				
	3.5				
	4				
	4.5				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
	15				
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				

Prueba a caudal constante-Datos de recuperación

Pozo de bombeo

Pozo de observación

Identificador del punto: _____

Diferencia entre el punto de lectura y la placa de nivelación: _____ m

Diámetro del pozo: _____

Profundidad del nivel dinámico: _____ m

Profundidad del pozo: _____

Fecha de medición del nivel dinámico: dd / mm /aaaa

Hora de medición del nivel dinámico: _____

Fecha/hora	Tiempo (min.)	t/t'	Profundidad del nivel (m)	Abatimiento residual (m)	Observaciones
	0				
	0.5				
	1				
	1.5				
	2				
	2.5				
	3				
	3.5				
	4				
	4.5				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
	15				
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				

Tomado y modificado del formato para pruebas de bombeo a caudal constante 1. INGEOMINAS 2. SDA-INGEOMINAS

Formato de toma de datos de calidad de aguas subterráneas

Información general

Nombre del proyecto/programa: _____
 Diligenciado por: _____ Fecha: dd / mm /aaaa

Información del punto

Nombre del propietario: _____ Vereda: _____
 Dirección del predio: _____ Municipio: _____
 Teléfono: _____ Departamento: _____
 Tipo de punto: Pozo Aljibe Piezómetro Manantial Agua superficial
 Coordenadas: _____ E _____ N Altura: _____ m
 Identificador del punto: _____

Información del muestreo

Lugar de muestreo: Boca del pozo Llave Tanque Zona de filtros Nacimiento
 Otro ¿Cuál? _____
 Métodos de muestreo: Manual Bailer Bombeo Compresor
 Condición del muestreo: _____

Información de las muestras:

Botella N°.	Filtrada		Preservada		Acidificada		Profundidad de la toma	Unidad hidrogeológica captada	Observaciones (tipo de filtrado utilizado, tipo de preservante, entre otros)
	Sí	No	Sí	No	Sí	No			

Medición de campo

Parámetros in situ									
Parámetro	Temperatura °C	Conduct. (µs/cm)		pH	Alcalinidad	SDT (mg/l)	Potencial redox	Oxígeno disuelto	Otro ¿cuál?
Método de medida									
Valor parámetro									
Pozo purgado:	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Nivel estático antes de iniciar el purgado: _____ m			Caudal de bombeo: _____ l/s			
			Profundidad de la bomba de purgado: _____ m			Volumen purgado: _____ l			
			Duración del purgado: _____			Volumen de agua extraído: _____ l			

Mediciones in situ para purga

Hora de inicio de medición	Temperatura °C	Conduct. (µs/cm)	pH	Potencial redox	Oxígeno disuelto	Turbiedad	Nivel dinámico del agua subterránea
t 1							
t 2							
t 3							
t 4							

Rangos de estabilización de purga:

Parámetro por medir	Criterio de finalización de purga
Oxígeno disuelto	+/- 0.2 mg/l
Conductividad eléctrica	+/- 5.0 µΩ/cm si los valores son inferiores a 1000 µΩ/cm
	+/- 10.0 µΩ/cm si los valores son superiores a 1000 µΩ/cm
PH	+/- 0.1 unidad de pH
Temperatura	+/- 0.1 °C
Turbiedad	< 5 NTU (Unidades nefelométricas de turbiedad).
Eh (Potencial redox)	+/- 30 mV

Observaciones: _____

Tomado y modificado del formato control de visitas- Análisis fisicoquímicos. SDA-INGEOMINAS

Lista de chequeo de equipos y materiales para el monitoreo de aguas subterráneas

Nombre del proyecto/programa: _____

Diligenciado por: _____ Fecha: dd / mm /aaaa

Para medición de niveles:

Equipo para medición de niveles

Sonda

Diver

Otro ¿Cuál?: _____

Geoposicionador

Se comprobó el correcto funcionamiento de los equipos

Cinta métrica

Formato para la captura de datos

Copias de los manuales de fabricantes del equipo de campo

Para toma de muestras:

Equipo para toma de muestras

Medidor multiparamétrico

Bomba de succión ¿Cuál?: _____

Bailer

Muestreador discreto

Otro ¿Cuál?: _____

Geoposicionador

Se comprobó el correcto funcionamiento de los equipos

Recipientes para toma de muestras

Reactivos para la preservación de muestras

Fichas de seguridad de preservantes

Frasco lavado con agua destilada

Elementos de filtrado

Papel indicador universidad

Balde de plástico o vaso precipitador

Copias de los manuales de fabricantes del equipo de campo

Formato para la captura de información

Libreta de campo

Información de las características del punto de muestreo

Neveras de icopor o de plástico

Cinta pegante o de enmascarar

Hielo

Esferos

Rótulos

Bolsas de plástico

Papel absorbente

Para protección y seguridad de las personas que efectúan el muestreo:

Overol o ropa de trabajo cómoda

Gafas de seguridad

Guantes látex

Guantes de caucho

Botas

Impermeable para lluvia

Para supervivencia en campo:

Botiquín de primeros auxilios

Sombrero, bloqueador solar, agua para beber

Repelente contra insectos

Lentes de sol

Linterna

Pito

Formato de toma de muestras de isótopos en agua lluvia

Información general

Nombre del proyecto/programa: _____

Diligenciado por: _____

Información del punto

Ubicación: _____

Coordenadas: _____ E _____ N Altura _____ m

Identificador del punto: _____

Medición de campo

Mes de recolección: _____ Año: _____

Día	Hora	Precipitación del totalizador (mm)*	Precipitación del totalizador (ml)*	Temperatura (°C)	Presión de vapor (hPA)	Humedad relativa (%)	Observaciones
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
Media mensual							

Listado de muestras

No.	Identificador de muestra	Fecha de muestra	Muestras tomadas (chequee con X)		
			¹⁸ O/ ² H	³ H	Otros ¿Cuáles?
1					
2					
3					
4					

* La medida de precipitación en el totalizador o el pluviómetro dependerá del método de medición (regla, probeta, balde, etc.).

Formato de toma de muestras mensuales de isótopos en agua lluvia
Información general

Nombre del proyecto/programa: _____

Diligenciado por: _____

Información del punto

Ubicación: _____

Coordenadas: _____ E _____ N Altura: _____ m

Identificador del punto: _____

Medición de campo

Año de recolección: _____

Mes	Desde		Hasta		Cantidad total mensual de precipitación (mm)*	Cantidad total mensual de precipitación (ml)*	Temperatura del aire (°C) (promedio mensual)	Presión de vapor (hPA) (promedio mensual)	Humedad relativa del aire (%) (promedio mensual)	Observaciones
	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora (00:00 a.m./p. m.)	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora (00:00 a.m./p.m.)						
Enero										
Febrero										
Marzo										
Abril										
Mayo										
Junio										
Julio										
Agosto										
Septiembre										
Octubre										
Noviembre										
Diciembre										

Listado de muestras

No.	Identificador de muestra	Fecha de muestra	Muestras tomadas (chequee con X)		
			¹⁸ O/ ² H	³ H	Otros ¿cuáles?
1					
2					
3					
4					

* La medida de precipitación en el totalizador o el pluviómetro dependerá del método de medición (regla, probeta, balde, etc.).

Formato de toma de muestras de isótopos en agua subterránea
Información general

Nombre del proyecto/programa: _____
Diligenciado por: _____

Medición de campo

Identificador de la muestra	Desde		Hasta		Tipo de muestra (1)	Coordenadas del punto		Altura (m)	Acuífero muestreado	Profundidad de la muestra (m)	Parámetros de campo				Observaciones
	Fecha (aaaa/mm/dd)	Hora (00:00 a. m./p. m.)	Fecha (aaaa/mm/dd)	Hora (00:00 a. m./p. m.)		Este	Norte				Temperatura °C	Conductividad (mS/cm)	pH	Alcalinidad	

Pozo purgado Sí No Nivel estático antes de iniciar el purgado: _____ m Caudal de bombeo: _____ l/s
 Profundidad de la bomba de purgado: _____ m Volumen purgado: _____ l
 Duración del purgado: _____ Volumen de agua extraído: _____ l

Mediciones in situ para purga

Hora de inicio de medición	Temperatura °C	Conduct. (mS/cm)	pH	Potencial redox	Oxígeno disuelto	Turbiedad	Nivel dinámico del agua subterránea
t 1							
t 2							
t 3							
t 4							

Rangos de estabilización de purga:

Parámetro por medir	Criterio de finalización de purga
Oxígeno disuelto	+/- 0.2 mg/l
Conductividad eléctrica	+/- 5.0 µΩ/cm si los valores son inferiores a 1000 µΩ/cm
	+/- 10.0 µΩ/cm si los valores son superiores a 1000 µΩ/cm
PH	+/- 0.1 unidad de pH
Temperatura	+/- 0.1 °C
Turbiedad	< 5 NTU (Unidades nefelométricas de turbiedad).
Eh (Potencial redox)	+/- 30 mV

Listado de muestras

No.	Identificador de muestra	Fecha de muestra	Muestras tomadas (chequee con X)																			Observaciones		
			Isótopos-otros						Fisicoquímicos															
			¹⁸ O/ ² H	³ H	¹³ C	¹⁴ C	Gases nobles	Otro ¿cuál?	Bicarbonatos	Carbonatos	Sulfatos	Cloruros	Nitratos	Nitritos	Amoníaco	Fosfatos	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Otro ¿cuál?		Filtrado/acidificado	
1																								
2																								
3																								
4																								

(1) Pozo (PO); piezómetro (PIZ); aljibe (ALJ); manantial (MAN).



Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua 2021



Con el apoyo de:

