CO2 humedales | ecopetrol | Fundación Natura Colombia

Propuesta de

Protocolo

para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Propuesta de

Protocolo

para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Claudia Patricia **Andramunio-Acero**
Yesid Fernando **Rondón-Martínez**
Yennifer **García-Murcia**
Yenny Beatriz **Mendoza Plazas**
Mónica Tatiana **López-Muñoz**
Lina María **Parada Alzate**
Jhenny Liliana **Salgado Vásquez**
Luis Alfredo **Moreno-Pérez**
Patricia **Téllez Guio**
Sidney Adriano **Pérez Villegas**

Propuesta de

Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Ecopetrol

Apoyo técnico y Administrativo del Convenio
Específico N.° 3044288

Xiomara Sanclemente Manrique
Lorena Ortiz Melo
Maria Juliana Salcedo Hernández
Adriana Velandia Valero
Jorge Gaviria Chicuasuque

Fundación Natura Colombia

Clara Ligia Solano Gutiérrez
Directora ejecutiva

Nancy Vargas Tovar
Subdirectora técnica

Lorena Franco Vidal
Subdirectora técnica

Sandra Galán
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas Hurtado
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres
Jefe administrativa y de gestión humana

Eliana Marcela Garzón Fierro
Jefe de comunicaciones

Gustavo Andrés Segura Clavijo
Jefe de proyecto CO2 Humedales

Autores

Equipo técnico CO2 Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero
Profesional monitoreo de carbono
Líder técnica del protocolo

Yesid Fernando Rondón-Martínez
Profesional de apoyo transversal

Yennifer García-Murcia
Profesional de biomasa y materia orgánica muerta

Yenny Beatriz Mendoza Plazas
Profesional de suelos y sedimentos

Mónica Tatiana López-Muñoz
Profesional de biodiversidad

Lina María Parada Alzate
Profesional SIG agua y biodiversidad

Jhenny Liliana Salgado Vásquez
Profesional estadístico y gestión de la información

Luis Alfredo Moreno-Pérez
Profesional de apoyo local

Patricia Téllez Guio
Sidney Adriano Pérez Villegas
Profesionales SIG Datos de Actividad

Colaboradores técnicos

Profesionales de campo y análisis:
José Andrés Posada-García
Jaime Luis Cervantes Cruzado
Nathalie Morales García
Javier Sunyer MacLennan
Liliana Ospina Calle
Carolina Bustamante-Gil
Osvar Cupitra Gómez
Santiago Cañón Escobar

Profesionales Fundación Natura de apoyo en el proceso de formulación e implementación:

Michelle Hernández Fernández
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez
Luz Patricia Hernández Arango
Sandra Milena Palacio Taborda
Nicolas Romero-Peña

Colaboradores locales

Francisco Villalobos Ríos
Danilson Segovia Zambrano
Rodolfo Segovia Daza
Vicente Buitrago Segovia
Deibis Armando Martínez Martínez
Omaida Rangel Rangel
Genaro Madrid Álvarez
Alvenis Carpio Castro
Elvin Dewin Cabarcas Monterrosa
Jorge Adolfo Rangel Piñeres
Jaider Guerra Guillen
Celso Moreno Mejía
Fabio Moreno Mejía
Omar Antonio Morales Hurtado
Teobaldo Cervantes Cadena
Edilso Iglesia Machado

Edición

Danyth Janneth Fandiño Lerma
Líder de comunicaciones CO2 Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero
Editora

Diego Alejandro Quintero Candela
Lina Daniela Mutis Prado
Diseño gráfico

Andrea Julieth Castellanos Leal
Diagramación

Claudia Campos Rozo
Corrección de estilo

Alejandro Peña García
José Manuel Pantoja Surmay
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez
Fotografía

Cítese como:
Andramunio-Acero, C., Rondón-Martínez, Y., García-Murcia, Y., Mendoza, Y., López-Muñoz, M., Parada, L., Salgado, J., Moreno-Pérez, L., Téllez, P. y Pérez, S. (2024). Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol S. A.

ISBN digital: 978-628-7629-24-0

Aviso legal
© Fundación Natura Colombia
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de este documento para fines educativos u otros fines no comerciales, con previa autorización de los titulares de los derechos de autor y citando la fuente. Se prohíbe la reproducción de este documento para fines comerciales.

Esta publicación se realizó en el marco del Proyecto CO2 Humedales, Convenio Específico No. 3044288 entre Fundación Natura Colombia y Ecopetrol S.A.

Agradecimientos

Agradecemos a Ecopetrol, Gerencia de cambio climático, a Santiago Martínez Ochoa, Xiomara Sanclemente y su equipo técnico por el interés y apoyo para el desarrollo de esta propuesta de Protocolo.

Al equipo de la Fundación Natura: Clara Solano, directora ejecutiva; Nancy Vargas, subdirectora técnica; Gustavo Segura, coordinador del convenio; y a todo el equipo técnico, administrativo y financiero que participó en el desarrollo de la propuesta de Protocolo, por el apoyo y acompañamiento permanente.

A los profesionales de las Corporaciones Autónomas Regionales Corpocesar y Corpamag, a la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), a las alcaldías de los municipios de Chimichagua, Tamalameque y El Banco y a los líderes comunitarios y demás actores locales que participaron en las actividades de desarrollo.

A los profesionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), especialmente de las subdirecciones de Ecosistemas e Información Ambiental y Estudios Ambientales, que participaron en las diversas mesas técnicas para orientar la construcción de este insumo para el país y, en particular, a los profesionales Liz Johanna Díaz Cubillos y Juan David Turriago García, quienes con sus orientaciones fortalecieron el ejercicio de construcción de la presente propuesta de Protocolo.

A SouthPole, por su acompañamiento y participación en las mesas técnicas.

A los 32 biomonitores (pescadores y pescadoras) del Complejo Cenagoso de Zapatosa, que voluntariamente participaron durante un año en el reporte de información para identificar áreas y momentos importantes del ciclo reproductivo de los peces de este complejo de humedales.

A todo el equipo de trabajo local (técnico, logístico y administrativo) que participó en los dos muestreos del piloto de validación de la presente propuesta de Protocolo, por su compromiso y profesionalismo para el cumplimiento del objetivo.

Acrónimos, siglas y convenciones

AFOLU	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra
AUNAP	Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca
AVC	Alto Valor de Conservación
BA	Biomasa Aérea
BARA	Biomasa Arbórea Aérea
BARS	Biomasa Arbórea Subterránea
BNAA	Biomasa No Arbórea Aérea
BNAS	Biomasa No Arbórea Subterránea
BUR	Informe Bienal de Actualización
CAR	Corporación Autónoma Regional
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CIFOR	The Center for International Forestry Research
CLC	Corine Land Cover
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DA	Datos de Actividad
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
EE	Enraizada Emergente
EF	Enraizada con Hojas Flotantes
EH	Enraizada en Zonas Húmedas
ENA	Estudio Nacional del Agua
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FC	Factor de Conversión de Carbono
FE	Factor de Emisión
FSC	Forest Stewardhip Council
GEE	Google Earth Engine
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPS	Sistema de Posicionamiento Global a partir de Satélites
GDB	Geodatabase de Almacenamiento de Información Geográfica
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MCP	Monitoreo Comunitario Participativo
MCPPe	Monitoreo Comunitario Participativo Pesquero
MEC	Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia
MO	Materia Orgánica
MOM	Materia Orgánica Muerta
MOS	Materia Orgánica del Suelo
MRV	Monitoreo, Reporte y Verificación
RENARE	Registro Nacional de Reducción de GEI
SIAC	Sistema de Información Ambiental de Colombia
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINA	Sistema de Información Ambiental
SINGEI	Sistema Nacional de Inventario de Gases de Efecto Invernadero
SMByC	Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono
SWAMP	Sustainable Wetlands Adaptation and Mitigation Program
TS	Transparencia Secchi
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
EPA	Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América USGS Servicio Geológico de los Estados Unidos
ZM	Zonas de Muestreo

Tabla de Contenido

Prólogo 18

1. Contexto general 23

Introducción 24
Antecedentes 30
Objetivos 34
Alcance 36
Marco de referencia 40

2. Humedales del Magdalena Medio y Bajo 51

3. Metodología 55

Etapa de premuestreo 56
Etapa de muestreo 115
Etapa de análisis 160
Criterios Técnicos para el cálculo de emisiones o absorciones de CO_2 a partir de factores de emisión (FE) y datos de actividad (DA) 174
Indicadores ambientales 185
Variables unificadas para el muestreo de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo 206
Índicadores propuestos para el seguimiento a la estimación de los contenidos de carbono: un sistema de monitoreo 220
Estrategia para la gestión de la información 243
Propuestas de implementación 247

4. Recomendaciones técnicas 257

Ventanas de implementación 258
Metodologías de sistemas de información geográfica y sensores remotos 260
Metodologías de estimación de contenidos de carbono 261
Metodologías para los análisis de biodiversidad 263
Reportes y gestión de la información 265
Anexos técnicos 267
Bibliografía 269

Listado de tablas

Tabla 1. Definiciones nacionales de humedal como base para la definición técnica operativa. 41
Tabla 2. Definiciones empleadas en las subcategorías de uso y cambio de uso de la tierra para humedales en el BUR-3 (2022). 41
Tabla 3. Representatividad de ecosistemas síntesis acuáticos para el área hidrográfica del Magdalena-Cauca (IDEAM, 2020). 62
Tabla 4. Extensión de ecosistemas de humedal por tipo de ambiente según el MEC, para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo (IDEAM, 2020). 63
Tabla 5. Detalle por tipo de cobertura para los ecosistemas de humedal de la cuenca del Magdalena Medio y Bajo (MEC, 2017). 64
Tabla 6. Humedales declarados como sitios Ramsar en Colombia para el área hidrográfica Magdalena-Cauca. 66
Tabla 7. Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo. ZH: zona hidrográfica, SZH: subzona hidrográfica 66
Tabla 8. Criticidad de subzonas por área hidrográfica y por categoría de análisis según el ENA (2018). 69
Tabla 10. Categorías de escalas y su respectivo nivel de detalle cartográfico (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2018). 79
Tabla 11. Listado de entidades y plataformas web en las que se realiza la búsqueda de información geográfica relacionada con humedales en Colombia. 80
Tabla 12. Ejemplo de homologación de la información geográfica de suelos a clases IPCC. 82
Tabla 13. Ejemplo de homologación de la información de cobertura y usos de la tierra a clases definidas por el IPCC. 84
Tabla 14. Ejemplo de homologación de la información de cobertura y usos de la tierra a clases definidas por el IPCC. 86
Tabla 15. Imágenes de satélite adecuadas para las diferentes escalas cartográficas. 99
Tabla 16. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes de radar Sentinel-1. 101
Tabla 17. Código desarrollado en Google Earth Engine para la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest. 104
Tabla 18. Compartimientos de carbono. Modificado del IPCC (2003) y BioCarbon Fund (2008). Adaptado para la ejecución del proyecto. 112
Tabla 19. Definición de depósitos de carbono asociados a la biomasa. Modificado de Yepes et al. (2011); Cisneros-de la Cruz et al. (2021). 115
Tabla 20. Definición de variables para la determinación de biomasa en cobertura tipo bosque, no bosque y MOM. 119
Tabla 21. Clave simplificada de los órdenes de suelos del sistema de clasificación del USDA (SSS, 2010). 131
Tabla 22. Clasificación de suelos orientada al monitoreo de suelos para estimaciones de GEI (IPCC, 2006). 132
Tabla 23. Detalle para la definición del suelo según su material de origen. 133
Tabla 24. Orden de los suelos para procesos de homologación. 134
Tabla 25. Tipos de arcillas para procesos de homologación de suelos. 134
Tabla 26. Propuesta de homologación de suelos para el Protocolo de estimación de contenidos de carbono. 136
Tabla 27. Variables a monitorear para estimar los contenidos de carbono en suelos y sedimentos 138
Tabla 28. Variables biológicas propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo. 145
Tabla 29. Variables complementarias propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo. 146
Tabla 30. Métodos propuestos para el levantamiento en campo de las variables consideradas para cada grupo. 148
Tabla 31. Ventajas y desventajas de los métodos de medición del flujo de carbono (Bradford y Ryan, 2008). 152
Tabla 32. Niveles de precisión del analizador de gases portátil LI-COR 7810, usado para el monitoreo de GEI en la propuesta de Protocolo. 156
Tabla 33. Especificaciones de medición del analizador portátil de gases de sondas, usado para el monitoreo de GEI en la propuesta de protocolo. 158

Tabla 34. Modelos alométricos generales a considerar para la estimación de biomasa áerea de árboles y palmas de humedales del Magdalena Medio y Bajo. 161
Tabla 35. Ecuaciones alométricas generales para estimación de biomasa subterránea..... 161
Tabla 36. Ejemplo de reporte de contenidos de carbono de la cobertura por zona de muestreo (estrato). 165
Tabla 37. Valoración del cambio en las existencias de carbono (FE). 176
Tabla 38. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes ópticas Sentinel-2. 188
Tabla 39. Ecuaciones y funcionalidad de los índices espectrales propuestos para el monitoreo de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. NIR: Infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta. 189
Tabla 40. Códigos desarrollados en Google Earth Engine para el cálculo de los índices espectrales..... 190
Tabla 41. Valores por intensidad de la escala del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 2008). 203
Tabla 42. Ejemplo de matriz de comparación de criterios con la escala de valores del PAJ..... 203
Tabla 43. Variables finales por compartimiento y proceso para la implementación de ejercicios de monitoreo para estimar contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo. 206
Tabla 44. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva: componente arbóreo, arbustivo y herbáceo. 221
Tabla 45. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva: componente vegetación acuática y MOM. 223
Tabla 46. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva y muerta..... 225
Tabla 47. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de reserva de carbono almacenado en suelos. 227
Tabla 48. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de riqueza en biodiversidad..... 229

Tabla 49. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de abundancia/densidad/cobertura correspondiente al compartimiento de biodiversidad..... 230
Tabla 50. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de cambio de superficie de humedal continental natural. 233
Tabla 51. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de superficie de humedal que permanece como tal. 236
Tabla 52. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de tasa promedio anual de cambio de la superficie natural de los humedales cubierta por diferentes coberturas (Adaptación de la "Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)" (IDEAM, 2019). 239

Listado de figuras

Figura 1. Resumen esquemático de la contribución de los humedales a la meta nacional según las NDC. 27
Figura 2. Resumen del papel de los humedales (naturales y gestionados) en los informes Bienales de Actualización de Cambio Climático de Colombia (BUR). 28
Figura 3. Mapa de ecosistemas de humedales de la macrocuenca Magdalena-Cauca.. 53
Figura 4. Fases y pasos del análisis prospectivo.. 57
Figura 5. Matriz de influencias directas (MID) para la captura de datos de influencia y dependencia de los motores de transformación 59
Figura 6. Interpretación del resultado del análisis prospectivo MICMAC.. 60
Figura 7. Etapas del proceso de selección de la ventana de muestreo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo.. 61
Figura 8. Mapa de riesgo municipal frente al cambio climático para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo..... 70
Figura 9. Esquema para determinar las zonas de muestreo en humedales del Magdalena Medio y Bajo..... . 77
Figura 10. Esquema de selección de las ZM del compartimiento de biodiversidad. 87
Figura 11. Procesos metodológicos para la identificación de períodos hidrometeorológicos de los humedales del Magdalena Medio y Bajo..... 87
Figura 12. Modelo SPAW para calcular la disponibilidad de agua en el suelo..... 95
Figura 13. Etapa de preprocesamiento digital de imágenes satelitales para el análisis de extensión de los humedales del Magdalena Medio y Bajo..... 100
Figura 14. Fases de la ejecución de Random Forest en Google Earth Engine..... 102
Figura 15. Ejemplo de la preparación de las muestras de entrenamiento previo a la ejecución del algoritmo Random Forest en GEE. ... 103
Figura 16. Suma algebraica de los ráster clasificados para el periodo seco de las temporalidades de 2016 y 2018.. 106
Figura 17. Reclasificación del ráster resultado de la suma por temporalidades. Ejemplo del periodo seco (diciembre a febrero) de los años 2016 y 2018. 107
Figura 18. Filtrado del ráster resultado de la reclasificación. 107
Figura 19. Conversión de ráster a polígono y su tabla de atributos con el cálculo del área..... 108
Figura 20. Proceso de eliminación de polígonos con áreas menores a 25 ha..... 109
Figura 21. Proceso de diferenciación y clasificación de humedal y no humedal..... 109
Figura 22. Componente de vegetación para la captura de carbono en humedales.. 116
Figura 23. Zonificación de la vegetación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.. 117
Figura 24. Diseño de la parcela para la estimación de los depósitos de carbono asociados a la vegetación en humedales continentales del Magdalena Medio y Bajo..... 121
Figura 25. Subparcelas para MOM (hojarasca) en la parcela principal. .. 121
Figura 26. Principales transformaciones de carbono en los humedales. 123
Figura 27. Muestreo de biomasa de la vegetación acuática..... 125
Figura 28. Muestreo de biomasa de herbáceas. 126
Figura 29. Muestreo de biomasa de cobertura tipo bosque..... 127
Figura 30. Metodología para el levantamiento en campo de información para la estimación de biomasa arbórea y no arbórea. 128
Figura 31. Muestreo de materia orgánica muerta (MOM). 129
Figura 32. Identificación del material botánico. 130
Figura 33. Propuesta de homologación de suelos USDA-IPCC. 135
Figura 34. Detalle de la parcela y ubicación de los sitios de muestreo, a: suelos y b: sedimentos. 140
Figura 35. Técnica para tomar muestras de densidad aparente del suelo. . 141
Figura 36. Ejemplo de algunos de los métodos de campo propuestos para los grupos y variables biológicos..... 151
Figura 37. Sistema de flotación y amarre para estabilidad de la cámara estática de medición de flujos de GEI en sistemas acuáticos..... 153
Figura 38. Ejemplo de instalación de cámaras estáticas sobre suelo, agua y vegetación acuática en humedales del Magdalena Medio y Bajo. 154
Figura 39. Lectura de flujos de carbono en tiempo real..... 156
Figura 40. Medición en campo de CO_2 y humedad relativa con el equipo CO_2 Meter GCH-2018. 157

Figura 41. Medición de metano CH_4 en campo con el monitor de gas metano Spd203 Vetus. 158
Figura 42. Procedimiento para realizar la medición de flujo y concentración de gases en campo (CO2, metano y vapor de agua). 159
Figura 43. Proceso de estimación de carbono orgánico para los compartimientos de biomasa y MOM.. 164
Figura 44. Procedimiento detallado para la estimación de biomasa y contenidos de carbono de cada compartimiento (biomasa y MOM)..... 165
Figura 45. Ejemplo de algunos de los procedimientos necesarios para la estimación de la biomasa de algas (fitoplancton y ficoperifiton) y macroinvertebrados.. 173
Figura 46. Ejemplo de conversión de coberturas de humedales. 174
Figura 47. Estimación del cambio en las existencias de carbono (FE). 175
Figura 48. Esquema general de la metodología para la descripción de los DA. 177
Figura 49. Diagrama de flujo del proceso para el monitoreo de los DA.. .. 178
Figura 50. Metodología para el cálculo de emisiones o absorciones de CO2. 184
Figura 51. Etapas de la metodología para el cálculo y análisis de índices espectrales para el monitoreo de humedales del Magdalena Medio y Bajo. 186
Figura 52. Archivos de entrada y archivo de salida para el proceso de cálculo de estadísticos zonales como tabla. 193
Figura 53. Modelo jerárquico diseñado para identificar zonas con Altos Valores de Conservación..... 201
Figura 54. Propuesta de estructura de base de datos de carbono en humedales. 244
Figura 55. Pasos para el análisis estadístico de datos.. 245
Figura 56. Ruta metodológica propuesta para la identificación de Altos valores de Conservación (AVC) y el planteamiento, implementación y monitoreo de iniciativas de conservación..... 248
Figura 57. Lineamientos metodológicos para el MCP..... 251

Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del número de parcelas de muestreo..... 78
Ecuación 2. Cálculo de la presión de saturación de vapor..... 90
Ecuación 3. Cálculo de la presión media de saturación de vapor. 90
Ecuación 4. Cálculo de la presión real. 91
Ecuación 5. Cálculo de la radiación solar. Fórmula modificada de Ángstrom-Prescott. 91
Ecuación 6. Cálculo de la radiación extraterrestre (FAO, 2006)..... 91
Ecuación 7. Cálculo de la declinación solar. 91
Ecuación 8. Cálculo del ángulo solar del zenit. 91
Ecuación 9. Cálculo de la distancia inversa entre el sol y la tierra. 92
Ecuación 10. Cálculo de la radiación neta. 92
Ecuación 11. Cálculo de la radiación neta de onda corta. 92
Ecuación 12. Cálculo de la radiación de onda larga. 92
Ecuación 13. Cálculo de la radiación de un día despejado..... 92
Ecuación 14. Cálculo del albedo de la vegetación, a partir de imágenes de satélite Sentinel-2 de 10 m de resolución espacial. 93
Ecuación 15. Cálculo del modelo de oferta de agua..... 96
Ecuación 16. Cálculo para la relación entre la evapotranpiración y la precipitación. 96
Ecuación 17. Cálculo de la evapotranspiración potencial..... 96
Ecuación 18. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo). Ecuación de FAO Penman-Monteith. 96
Ecuación 19. Cálculo de NDVI a partir de imágenes de satélite multiespectrales..... 97
Ecuación 20. Cálculo del Kc para herbazales (Reyes-González et al., 2016)..... 97
Ecuación 21. Cálculo del Kc para bosques, vegetación secundaria y arbustales (Poblete-Echeverria et al., 2013). 97
Ecuación 22. Cálculo del Kc para cultivos (Calera et al., 2016)..... 97
Ecuación 23. Cálculo del Kc para pastos introducidos (Reyes-González et al., 2016). 97
Ecuación 24. Cálculo del parámetro empírico w(x)..... 97
Ecuación 25. Cálculo del contenido de agua volumétrico AWC(x)..... 97
Ecuación 26. Cálculo de la evapotranspiración de referencia para humedales, aguas abiertas y zonas urbanas..... 98
Ecuación 27. Índice Kappa..... 106
Ecuación 28. Cálculo de la materia orgánica del suelo..... 137

Ecuación 29. Cálculo para estimar la densidad aparente del suelo. 141
Ecuación 30. Cálculo para estimar la densidad aparente del suelo, recomendada cuando hay limitaciones para la toma de muestras. 141
Ecuación 31. Cálculo para la estimación de la biomasa. 160
Ecuación 32. Cálculo para la estimación de la biomasa muerta (MOM) .. 162
Ecuación 33. Cálculo para la estimación del contenido de carbono para la biomasa y la MOM según tipo de cobertura. 163
Ecuación 34. Cálculo para la estimación del contenido total de carbono para biomasa 164
Ecuación 35. Cálculo del contenido de carbono orgánico del suelo 166
Ecuación 36. Cálculo del error estándar para el cálculo de la incertidumbre. 168
Ecuación 37. Cálculo del intervalo de confianza para el cálculo de la incertidumbre. 168
Ecuación 38. Cálculo de la incertidumbre. 169
Ecuación 39. Cálculo para la estimación de la incertidumbre integrada ... 169
Ecuación 40. Cálculo del Dato de Actividad. 176
Ecuación 41. Fórmula de identificación de cambios de cobertura 181
Ecuación 42. Tasa promedio anual de cambio de la superficie. 182
Ecuación 43. Cálculo del porcentaje total de la cobertura natural. 182
Ecuación 44. Cálculo del porcentaje total de ganancia de la cobertura natural. 183
Ecuación 45. Cálculo del porcentaje total de pérdida de cobertura natural. 183
Ecuación 46. Primera ecuación para el cálculo del flujo de GEI. 185
Ecuación 47. Cálculo para la corrección por vapor de agua para los flujos de GEI. 185
Ecuación 48. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)... 189
Ecuación 49. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). 189

Ecuación 50. Índice de Área Foliar (LAI). 189
Ecuación 51. Índice de clorofila (GCI). 189
Ecuación 52. Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI) 189
Ecuación 53. Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI). 189
Ecuación 54. Índice Normalizado de Área Quemada (NBRI). 189
Ecuación 55. Cálculo de la media por periodo para análisis espectrales. 192
Ecuación 56. Cálculo del coeficiente de variación para índices espectrales. 193
Ecuación 57. Cálculo de superposición ponderada para procesos de zonificación. 205

Prólogo

En el marco de la *Estrategia 2040: Energía que Transforma*, como Grupo Empresarial Ecopetrol (GE) hemos encaminado nuestros esfuerzos a crecer mediante una transición energética justa y, así, contribuir a la mitigación de los impactos asociados con el cambio climático. En este sentido, se ha definido un plan de descarbonización enfocado en cuatro líneas estratégicas: la gestión del inventario de gases de efecto invernadero (GEI); la identificación, el desarrollo y la implementación de iniciativas de reducción de emisiones; la diversificación hacia negocios de bajas emisiones y la optimización del portafolio actual; y la implementación y la consolidación de un portafolio de compensación a través de *soluciones naturales del clima (SNC)* para compensar las emisiones residuales que no se logren evitar o reducir en la operación.

Las SNC son estrategias que aprovechan los procesos naturales para mitigar el cambio climático y adaptarse a sus efectos. Estas incluyen la protección, restauración y gestión sostenible de ecosistemas de bosque, humedales, pastizales y océanos, que actúan como sumideros de carbono, mediante la absorción y el almacenamiento de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera. Además de favorecer la captura de carbono, estas soluciones generan beneficios para la biodiversidad, en relación con la cantidad y calidad del recurso hídrico, y contribuyen a la resiliencia frente a eventos climáticos extremos. Esto beneficia tanto al medio ambiente como a las comunidades humanas.

Junto con el fortalecimiento y la implementación del portafolio de SNC hemos logrado la consolidación de alianzas con actores que cuentan con una gran experticia a nivel nacional, como la Fundación Natura, con quienes adelantamos desde el año 2021 el Convenio "CO2 humedales". A partir de este convenio se sumaron esfuerzos orientados a la conservación y restauración de ecosistemas continentales de humedal y a la identificación de acciones para la mitigación de emisiones de GEI generadas por la degradación de estos ecosistemas.

La función ecológica de los humedales como sumideros naturales de carbono y reductores de GEI ha sido documentada como un proceso eficiente en ecosistemas conservados. Sin embargo, en la actualidad algunos humedales presentan un alto grado de degradación, producto de diversas actividades humanas que limitan esta función; así, los humedales han pasado de almacenar grandes cantidades de carbono a emitirlas.

Ante este deterioro, y dada la importancia de profundizar en este tema en un país como Colombia, en el que los ecosistemas de humedal representan gran parte del territorio nacional, iniciativas como la de "CO2 humedales" contribuyen al cierre de brechas en el conocimiento del rol que cumplen los humedales en el balance global de carbono. También ayudan a la identificación de medidas de gestión efectivas para su conservación, y al análisis de la viabilidad de habilitación de oferta de créditos de carbono en ecosistemas diferentes al de bosque, en un país megadiverso.

Todas estas acciones han aportado a nuestras metas de biodiversidad y servicios ecosistémicos a 2030, mediante la siembra y/o entrega de árboles; la implementación de procesos de conservación y/o restauración en diferentes zonas del país; la conservación de especies silvestres que se encuentran en alguna categoría de amenaza; la consolidación de áreas de conservación empresarial; y el fortalecimiento del portafolio de SNC.

Estamos seguros de que la propuesta de *Protocolo para la estimación de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo,* desarrollada en el marco del convenio, constituye una contribución relevante. Aquí se presenta un marco conceptual y metodológico que abarca técnicas costo-efectivas de campo y laboratorio, sin dejar de lado procesos de inclusión de tecnología avanzada y variables de implementación complementarias, todas ellas alineadas con las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), con lo que se busca cumplir con los estándares internacionales, pero adoptadas y adaptadas a condiciones nacionales, regionales y locales.

La implementación de esta propuesta de Protocolo permite no solo estructurar la línea base de contenidos de carbono en estos ecosistemas estratégicos, sino realizar el monitoreo y seguimiento de su estado desde un enfoque ecosistémico, lo que a su vez incluye las orientaciones necesarias para el levantamiento de información de biodiversidad y la identificación de Altos Valores de Conservación (AVC). Además, proporciona una guía para el desarrollo de procesos de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) como elemento fundamental en la apropiación del conocimiento y el fortalecimiento de la gobernanza local.

Agradecemos al equipo directivo, coordinador y técnico de la Fundación Natura, a los equipos de Ecopetrol y del IDEAM, así como a las comunidades y otras instituciones que participaron en este proceso, por su rigurosidad, disposición y contribuciones para fortalecer este documento técnico, e invitamos a quienes adelantan acciones dirigidas a la conservación y restauración de los humedales en el contexto de las SNC a consultar esta propuesta de Protocolo, que consideramos será de gran utilidad.

Xiomara Sanclemente
Gerente de Cambio Climático
Ecopetrol S.A

Prólogo

Presentamos una propuesta de *Protocolo para la estimación integral de los contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Este es el producto de un esfuerzo interinstitucional adelantado por Ecopetrol y la Fundación Natura, y con la participación de comunidades locales del complejo Cenagoso de la Zapatosa, especialmente en el proceso de monitoreo y gestión, en el que se toman en cuenta sus conocimientos y capacidades. Esta propuesta es un aporte a Colombia, a las regiones tropicales y a los humedales de agua dulce: es el resultado de la construcción de una metodología unificada con herramientas y lineamientos técnicos para mitigar el cambio climático y promover la conservación de estos ecosistemas. Todo esto se enfoca en la posibilidad de que a futuro el país pueda generar un sistema de monitoreo de humedales y carbono.

Los humedales de agua dulce, entre otros ecosistemas naturales, han sido empujados a un nivel crítico que ha traído cambios potencialmente irreversibles. La variabilidad climática es un fenómeno que afecta la disponibilidad, calidad y cantidad del agua, y genera modificaciones en lo que hoy conocemos como el ciclo hidrológico y sus servicios, en los procesos asociados a la diversidad y en las funciones ecológicas. También se suman a estos efectos adversos factores como la alteración de la función ecológica de los humedales, la ocupación y transformación de sus rondas, la agricultura y la ganadería extensiva, la introducción de especies, la descarga directa de aguas domésticas e industriales, y la disposición inadecuada de residuos sólidos, entre muchos otros. Esto ha ocasionado una evidente degradación de los hábitats y podría poner en riesgo su capacidad de resiliencia frente al cambio climático.

Entonces, motivados por la urgencia de atender estos ecosistemas, Ecopetrol y la Fundación Natura gestionaron el proyecto "CO2 humedales", de donde viene la presente propuesta de Protocolo. El proyecto buscó generar conciencia sobre el papel de los humedales en la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero, proceso que se da gracias a la captura de carbono que realizan estos ecosistemas. Así, nos enfocamos en la formulación de acciones para restaurar y gestionar las funciones naturales de los humedales y preservar su papel como reservorios naturales, no solo de agua, sino también de biodiversidad y de medios de sostenimiento para las poblaciones que los habitan.

La mayor fortaleza de este documento radica en que su formulación metodológica siguió los lineamientos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) e incorporó los cuatro compartimientos establecidos por este para la estimación de contenidos de carbono: biomasa (aérea, terrestre y acuática), materia orgánica muerta, suelos (incluyendo también sedimentos) y biodiversidad (terrestre y acuática). Todos los insumos usados para su construcción vienen de la oficialidad nacional –por ejemplo, la selección de la escala de muestreo–, pero durante el desarrollo del proyecto se generaron recomendaciones para que esta gestión estatal pueda ser refinada y adaptada a regiones o territorios más locales. Esto fue lo que sucedió en el proceso de validación, el cual tuvo como escenario principal el Complejo Cenagoso de Zapatosa, el humedal natural de agua dulce más grande del país.

Además, en esta propuesta la biodiversidad no es una adicionalidad, como suele pasar en los proyectos de carbono, sino que se asume como uno de los compartimientos de monitoreo más importantes para la conservación y la restauración ecosistémica de los humedales. Su monitoreo comprende el carbono disponible en el ecosistema acuático, presente en los organismos que lo habitan o usan como fuente de obtención energética o de hábitat frecuente o transicional, según la variabilidad hidrológica, responsable de la dinámica funcional de estos humedales.

Con la implementación de esta propuesta de Protocolo insistimos en la importancia de que todas las estrategias de manejo territorial estén enfocadas en el aumento, la recuperación o, por lo menos, la conservación de las reservas de carbono de los humedales naturales del país. De esta manera se podrá evidenciar la necesidad de fortalecer las acciones de restauración ecosistémica como una solución natural para detener la pérdida de biodiversidad y seguir contando con los humedales como un aliado efectivo en la lucha contra el cambio climático.

Clara Solano
Directora ejecutiva
Fundación Natura

1 CONTEXTO GENERAL

Introducción

De manera natural, un ecosistema tiene la capacidad de autorregularse a partir de procesos que año tras año modelan su estado, hecho que posibilita el desarrollo de la vida en todas sus expresiones. El cambio climático es, por ejemplo, un evento natural; sin embargo, el planeta Tierra ha sufrido acontecimientos extremos que han llevado inclusive a extinciones masivas.

En la actualidad, la Tierra experimenta un proceso de calentamiento originado por modificaciones en la inclinación de su eje con respecto al sol, lo que altera la temperatura habitual de cada región y, por tanto, las condiciones de la vida misma. Este calentamiento es también consecuencia de actividades humanas que generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente debido a la quema de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural.

Algunos ecosistemas son considerados estratégicos, no solo por su aporte a la mitigación y adaptación al cambio climático, sino también por la amplia oferta de servicios ecosistémicos que prestan, como es el caso de los humedales. Entre las grandes bondades de estos se pueden señalar las siguientes: (i) la amortiguación de inundaciones, ya que reducen la velocidad del agua y la cantidad de material que con ella deriva; (ii) la oferta de agua y alimento debido a la diversidad que albergan; y (iii) la capacidad para almacenar carbono, que gracias a eso no será emitido a la atmósfera. A pesar de estos beneficios, muchas de las acciones que actualmente se efectúan en estos ecosistemas generan modificaciones que desvirtúan su función ecológica, lo que supone un reto enorme de articulación entre los diferentes actores encargados de tomar decisiones para su adecuada gestión.

Así, es posible encontrar humedales en tierras medias y bajas, como también en la alta montaña. En particular, la región Andina concentra los centros poblados más importantes del territorio nacional, aporta más del 70% del Producto Interno Bruto (PIB) y, a su vez, se baña con las aguas de la cuenca del río Magdalena. Esto la convierte en la arteria fluvial más importante del país. La zona cuenta además con una gran extensión de bajos inundables al interior de sus valles, que reciben y amortizan los impactos generados durante el recorrido del río hasta su descarga en el mar Caribe.

La geografía de la región define en el tramo alto de la cuenca la mayor actividad erosiva, lavando material en su continuo, donde los tramos medio y bajo son las zonas de mayor depósito por medio de los pulsos de inundación anual que se generan por los dos momentos de lluvias. Esto, en particular, resalta la fragilidad de los humedales ante el cambio climático, ya que la alteración del patrón hidroclimatológico, sumado a la cantidad de presiones generadas por el hombre, comprometen su viabilidad. Los estudios realizados para entender estos ecosistemas se han concentrado en aspectos ligados a las dinámicas de conectividad hídrica, la oferta de servicios ecosistémicos, la gestión del riesgo y algunos aspectos ecológicos, particularmente de las comunidades biológicas que los habitan. Sin embargo, en materia de cambio climático no se ha avanzado mucho en cuanto a su función, y

tampoco existe desde el sector ambiental un lineamiento concreto para su manejo.

Por lo anterior, la visión a escala de cuenca, a partir de un análisis multicriterio, puede ser un mecanismo que permita tomarle ventaja al cambio climático, en una carrera que transcurre a gran velocidad y que de momento nos deja en una posición de desventaja. Vincularnos como sociedad, conocedores de nuestro impacto en el corto, mediano y largo plazo, es un excelente punto de partida para avanzar en la generación de conocimiento y proponer acciones cada vez más robustas.

Al ser Colombia un país adscrito a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ha realizado progresos en la medición de GEI a partir de las Comunicaciones Nacionales y los Informes Bienales de Actualización (BUR) para los módulos que establece el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), que constantemente buscan mejorar la exactitud y la medición y, con esto, proponer estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Pero, ¿cuál es el papel de los humedales en estos reportes?

Importancia de esta propuesta de protocolo

En materia de mediciones de GEI, la CMNUCC estableció un esquema de reportes para los países firmantes: el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV). En Colombia este fue establecido por medio de la Resolución 1447 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Gracias a este instrumento, el país cuenta con una herramienta para hacerles seguimiento a las emisiones de GEI, actividad líderada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que, de acuerdo con los módulos que plantea el IPCC, establece los lineamientos nacionales y hace seguimiento al esquema de mediciones que actualmente se genera por medio de los BUR y, anteriormente, por las Comunicaciones Nacionales (CN).

El proceso del MRV en Colombia ha permitido mejorar las metodologías utilizadas y robustecer el esquema por medio de actualizaciones y nuevos reportes que proporciona el Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI). Igualmente, ha contribuido a los procesos de gestión relacionados con la vinculación de diferentes sectores socioeconómicos que contribuyen con información y que, con eso, aportan a la propuesta de acciones concretas para la reducción de emisiones de GEI, que es tarea del Registro Nacional de Reducción de GEI (RENARE), plataforma vigente desde septiembre de 2020. Esta plataforma mide de manera indirecta los avances del país de cara a los compromisos adquiridos ante la CMUNCC, por medio de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC); entre las metas propuestas está la reducción de sus emisiones en un 51% para 2030 (IDEAM et al., 2021). Es importante recalcar que los humedales, pese a ser identificados como ecosistemas estratégicos en estas comunicaciones nacionales, aún no están incluidos como depósitos de carbono en la meta de mitigación nacional (Figura 1).

Por su parte, para el sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) los humedales, específicamente los naturales y gestionados (3B4), constituyen una de sus categorías de interés.

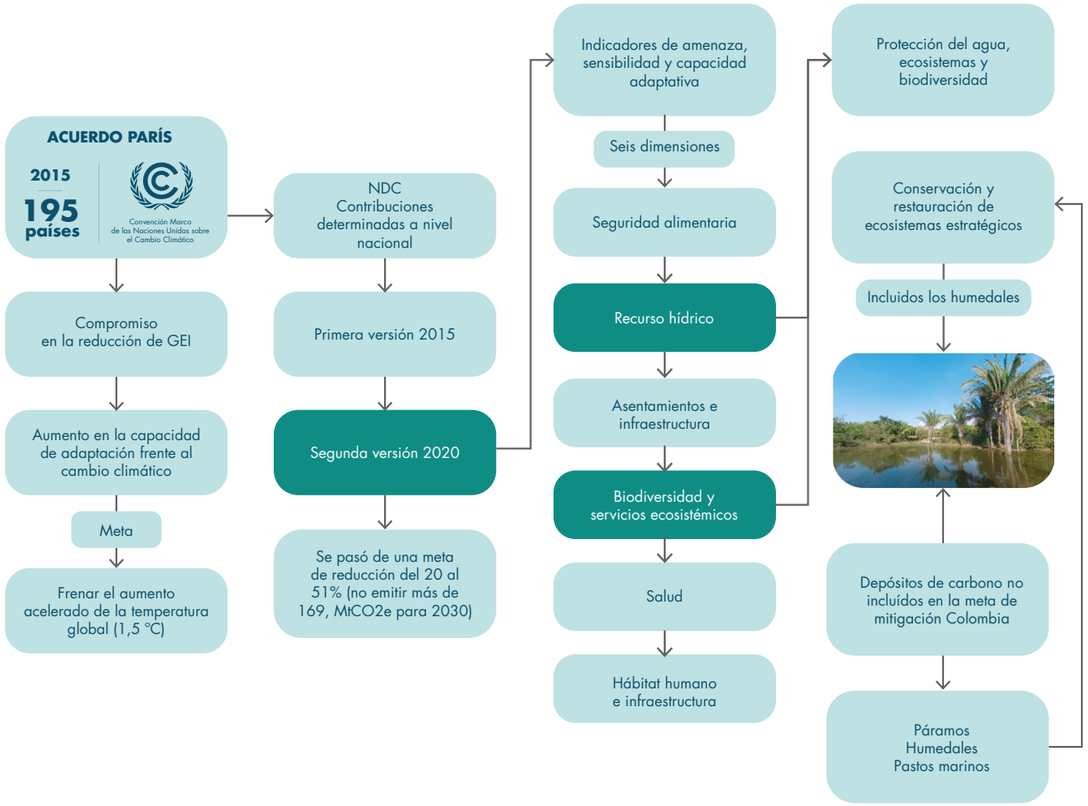


Figura 1. Resumen esquemático de la contribución de los humedales a la meta nacional según las NDC. Fuente: elaboración propia (2024)

Para el caso de los humedales naturales, hasta la fecha no hay reportes y, por tanto, se desconoce lo que sucede en estos ecosistemas en materia de emisiones de GEI (Figura 2) y también en cuanto a las existencias de carbono contenido en sus múltiples componentes. Esto no ha permitido tener una línea base nacional para evaluar el grado de transformación por cambio climático que están sufriendo estos ecosistemas estratégicos.

Esto puede cambiar en la medida que dentro del INGEI se empiece a incluir información sobre los contenidos de carbono cuantificados para los diferentes compartimientos del IPCC, y podría iniciarse con los reportes para la vegetación y los suelos presentes en estos ambientes. No obstante, hay que tener especial cuidado para no efectuar dobles cuantificaciones o duplicidad en la información. Por ejemplo, el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC) se enfoca particularmente en las coberturas vegetales de tipo bosque de tierra firme, por lo cual es importante excluir sus áreas de reporte en los límites del humedal natural a ser cuantificado. Por lo anterior, generar reportes sobre los suelos y las coberturas vegetales presentes dentro de los ecosistemas definidos

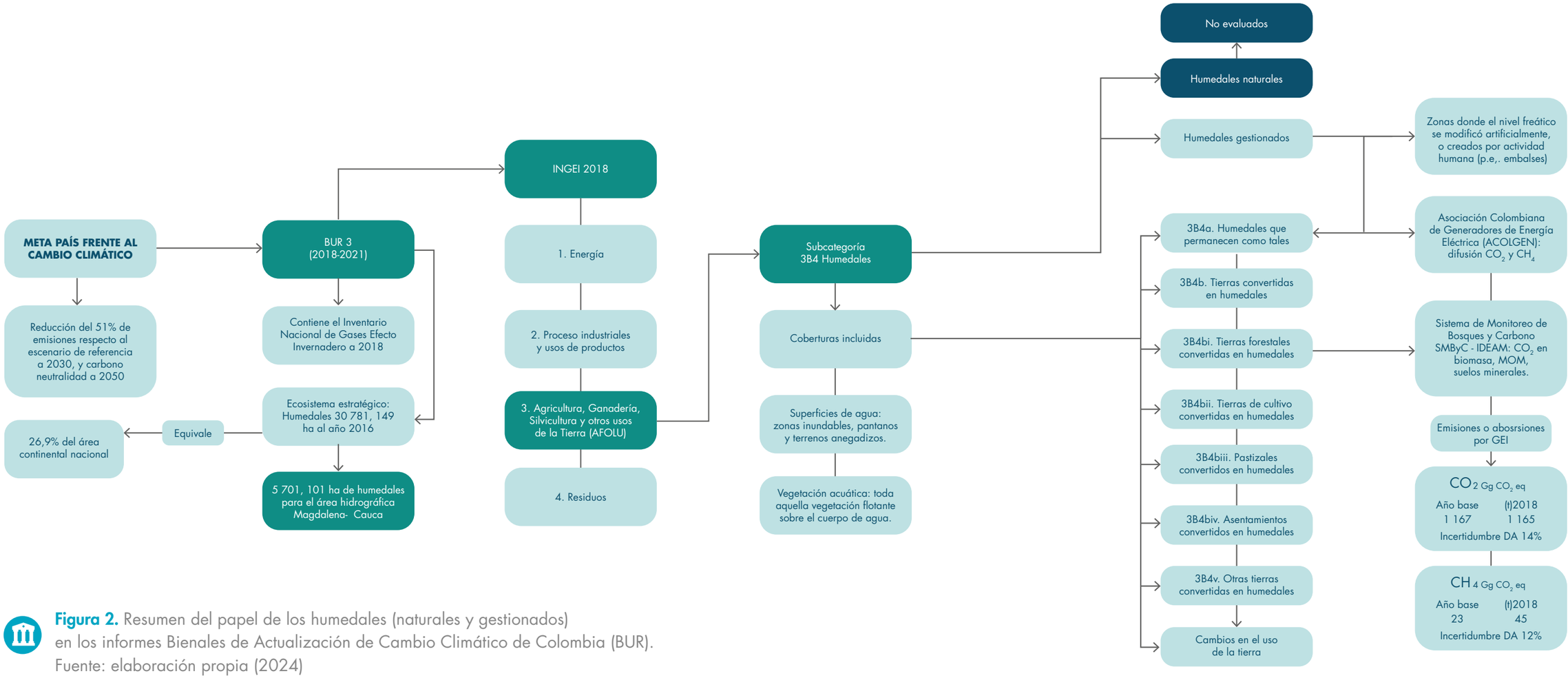


Figura 2. Resumen del papel de los humedales (naturales y gestionados) en los informes Bienales de Actualización de Cambio Climático de Colombia (BUR). Fuente: elaboración propia (2024)

como humedales naturales contribuirá a las cuantificaciones de GEI para el sector AFOLU y, de esta manera, no solo se aportará a la producción de conocimiento sobre la función de los humedales en materia de cambio climático, sino también al cumplimiento de los compromisos adquiridos como país en materia de reducción de emisiones. En función de este análisis, la presente propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*[1] es una herramienta metodológica que le sirve al país para generar reportes de depósitos de carbono de los ecosistemas de humedal natural continental de tierras medias y bajas, particularmente los contenidos en la macrocuenca Magdalena-Cauca, a partir de métodos que incluyen información sobre los compartimientos de biomasa (aérea y acuática), materia orgánica muerta (MOM), suelos y sedimentos, y biodiversidad. Este último aspecto es un nuevo eslabón para las estimaciones de contenidos de carbono a nivel nacional. Esta propuesta de Protocolo se basa en metodologías costo-eficientes que permiten identificar el estado de esos ecosistemas estratégicos para el país, y pone sobre la mesa la importancia de su conservación para la mitigación de los efectos del cambio climático. Un propósito adicional de esta propuesta de Protocolo es que sea replicable en zonas que cuenten con las condiciones aquí contempladas para su implementación, sin limitar su uso en términos de escala o región. Este texto ofrece lineamientos generales que permiten su aplicabilidad en otras zonas del país con ajustes metodológicos recomendados, pero con la misma base técnica conceptual. Esto, a futuro, va a ayudar a establecer una línea base del almacenamiento de carbono para los humedales naturales, con proyección para la creación de un Sistema de Información Ambiental de los ecosistemas acuáticos del país.

1 De aquí en adelante, este documento se nombra como propuesta de Protocolo

Antecedentes

Colombia ha generado instrumentos normativos en materia de cambio climático y biodiversidad que evidencian el papel de los humedales y sus atributos a nivel nacional e internacional. A continuación, se presenta una línea de tiempo con este contexto en la que se señalan los avances y las recomendaciones de estos procesos, que sirvieron de base para la formulación de la presente propuesta de Protocolo.

> *Los humedales son ecosistemas estratégicos: su planificación y ordenamiento ambiental territorial deben basarse en perspectivas sistémicas por medio de enfoques multisectoriales para el diseño de estrategias de manejo, la articulación y participación de actores públicos, privados, de la sociedad civil y demás organizaciones. Ley 99 de 1993.*

Complejo Cenagoso de Zapatosa: humedal natural más grande del país. Fotografía: Jose Manuel Pantoja Surmay.

Biodiversidad
Cambio climático
General
Humedales y agua
Suelos

Sierra Nevada de Santa Marta
Península de la Guajira
Serranía del Perijá
Lago de Maracaibo
Río Cesar
Complejo Cenagoso de Zapatosa
Depresión Momposina
Río Cauca
Río Magdalena

1971
Convención
Creación convención cuidado de humedales a nivel mundial
Ramsar

1972
Conferencia UN medio humano
Gestión racional del medio ambiente
Naciones Unidas (UN)

1973
Ley 23
Código de recursos naturales y protección medio ambiente (aire, suelo y agua)
Gobierno nacional

1988
Planel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC)
Creación del Panel
Naciones Unidas (UN)

1992
Tratado de Río medio ambiente y desarrollo
Acuerdos internacionales para la integridad del sistema ambiental
Naciones Unidas (UN)

1993
Ley 99
Creación MADS (CARs, SINA), Planificación y ordenamiento ambiental de los humedales
Gobierno nacional

1994
Ley 165
Adopción del Convenio de diversidad biológica
Gobierno nacional

Ley 164
Ingreso de Colombia a la convención
Convención Marco de las UN para el Cambio Climático (CMUNCC)

1995
COP 1
Acciones conjuntas para combatir el Cambio climático (CC). Se desarrolla anualmente
Naciones Unidas (UN)

1997
Protocolo de Kioto
Adoptado en Colombia según Ley 629 del 2000
Naciones Unidas (UN)

Ley 357
Política Nacional para humedales interiores de Colombia
Gobierno nacional

1998
Ley 461
Ingreso de Colombia a la Convención Convención UN lucha contra Desertificación y Sequía (UNCCD)

2001
Primera Comunicación Nacional (1990-1994)
Primer reporte GEI para Colombia
IDEAM

2004
Resolución 157
Uso sostenible, conservación y manejo de humedales
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)

2006
Resolución 196
Guía técnica formulación PMA para humedales
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)

2010
Política Nacional gestión integral del recurso hidrico
Políticas para garantizar sostenibilidad del recurso hídrico
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

Segunda Comunicación Nacional (2000-2004)
Segundo reporte de GEI para Colombia
IDEAM

2011
CONPES 3700
Políticas y acciones en materia de CC
Departamento Nacional de Planeación (DNP)

2012
Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC)
Desligar el crecimiento económico de las emisiones de GEI
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

Política Nacional de gestion integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (PNGIBSE)
Promover la gestión integral de la biodiversidad
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

2015
Primer Informe Bienal de CC (BUR1)
Actualización de reportes GEI (2010-2012)
IDEAM

Ley 1753
Creación del Registro Nacional de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (RENARE)
Congreso de la República de Colombia

Cumbre de UN sobre desarrollo sostenible
Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
Naciones Unidas (UN)

Contribución Determinada a Nivel de Colombia (NDC)
Medidas y metas de adaptación al CC
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

2016
Creación del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA)
Coordina y articular acciones de GEI
Gobierno nacional

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)
Reducir riesgos a ecosistemas y poblaciones frente a CC
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

2017
Segundo Informe Bienal de CC (BUR2)
Serie de tiempo 1990-2012 y actualización de reportes previos
IDEAM

Política Nacional de CC
Incorporar gestión de CC en desarrollo resiliente bajo en carbono
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

2018
Resolución 1447
Reglamenta el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) en Colombia
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

2021
Tercer Informe Bienal de CC (BUR3)
Actualización 1990-2012, inventario 2013-2014
IDEAM

2022
Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal
Informe de evaluación mundial de diversidad biológica y servicios de los ecosistemas
Naciones Unidas (UN)

2023
COP 28
Acciones conjuntas para combatir el CC
Naciones Unidas (UN)

Antecedentes y marco normativo

Representación artística de los tramos medio y bajo de la macro cuenca Magdalena-Cauca

Objetivos

El objetivo general de la presente propuesta de Protocolo es generar una metodología para la estimación de contenidos de carbono (C) en los diferentes compartimientos establecidos por el IPCC para los ecosistemas acuáticos colombianos, especialmente humedales del Magdalena Medio y Bajo, todo esto soportado por los siguientes objetivos específicos:

1 Establecer, bajo criterios técnicos multidisciplinares, los compartimientos y temporalidades a monitorear en humedales para la estimación del carbono, apoyados en información de línea base o en la necesidad misma de su generación bajo estándares nacionales.

2 Establecer una definición operativa de humedal para estimar los datos de actividad, como los cambios e intervenciones de la superficie terrestre, según las directrices del IPCC y los avances nacionales, para ecosistemas de la cuenca del Magdalena Medio y Bajo.

3 Estimar, a partir de las categorías de datos de actividad (DA), los factores de emisión/remoción para ecosistemas de la cuenca del Magdalena Medio y Bajo.

4 Visibilizar la biodiversidad acuática como un componente importante dentro de la estimación de contenidos de carbono en ecosistemas de humedal.

5 Trabajar en conjunto con los actores institucionales responsables de los reportes de cuantificación de carbono, de modo que los lineamientos generados por la propuesta de Protocolo puedan ser replicables a nivel nacional, bajo los estándares de validación de los reportes frente al cambio climático.

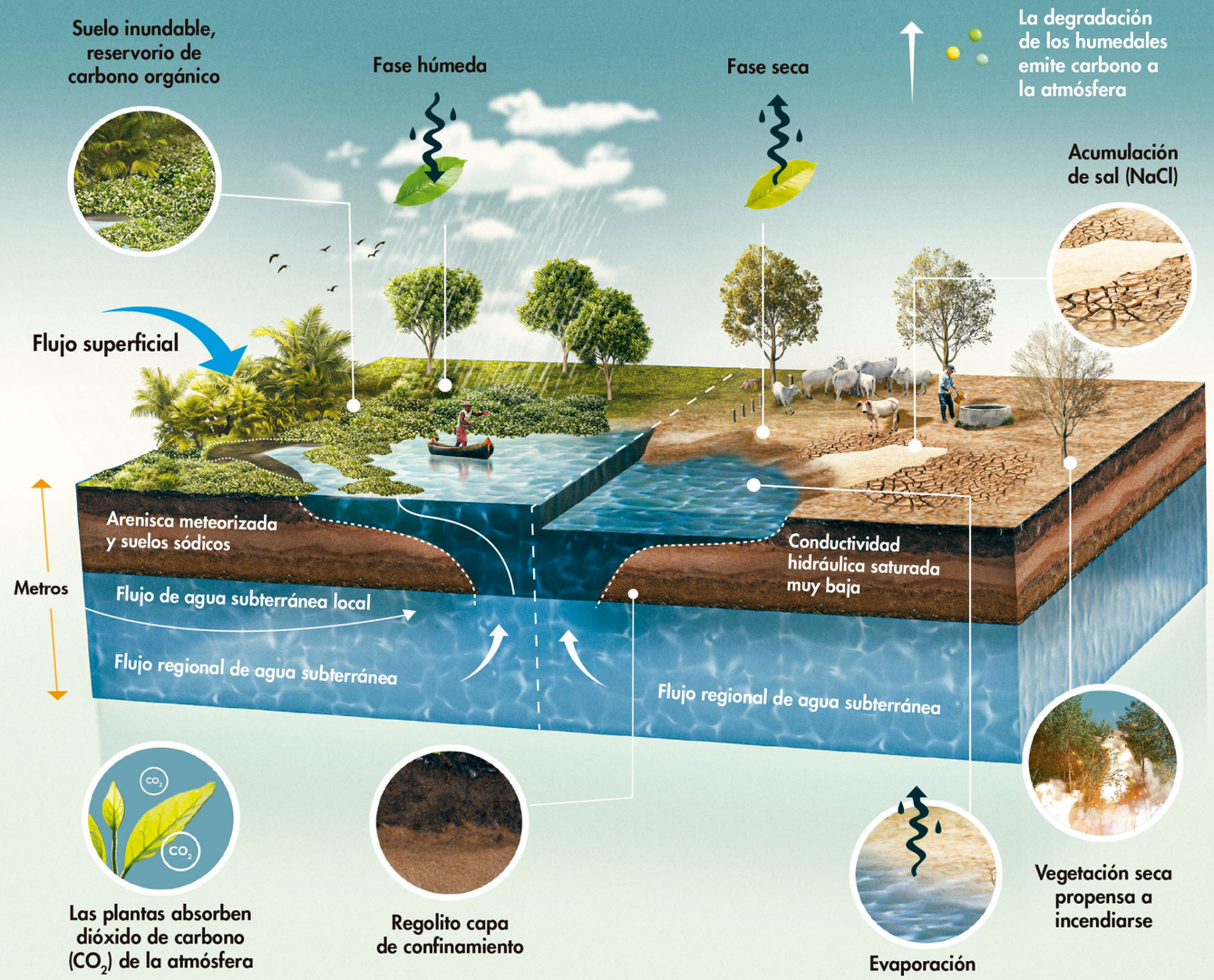
Alcance

Esta propuesta de Protocolo es un instrumento de aplicación local y regional construido con insumos cartográficos oficiales (escala 1:100 000) tomados como base para evaluar los contenidos de carbono en los compartimientos de suelos y sedimentos, biomasa y MOM, y para identificar Altos Valores de Conservación (AVC) para la biodiversidad que habita los humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Para su validación se realizaron dos ejercicios de muestreo a partir de la temporalidad hidroclimatológica de la macrocuenca Magdalena-Cauca, correspondientes a la temporada seca (aguas bajas) y a la temporada de lluvia (aguas altas). La primera ventana de monitoreo seleccionada fue el Complejo Cenagoso de Zapatosa, cuyos resultados se encuentran en los ocho anexos que generó esta propuesta de Protocolo como proceso de validación y que pueden consultarse ingresando al cógido QR disponible al final de la publicación.

La estimación de contenidos de carbono para la biomasa se enfoca en la vegetación acuática y en las zonas de transición entre la superficie de agua y tierra firme, lo que excluye la vegetación contemplada por el SMByC, con el fin de evitar duplicidad en la cuantificación. Para los suelos se incluyen también los sedimentos presentes en los ecosistemas de humedal, tanto en las zonas de transición como en la cubeta misma.

En el caso particular de la biodiversidad acuática, además de establecer listados de riqueza y abundancia como línea base, se incorporan atributos ecológicos para la estimación de contenidos de carbono, tales como biovolumen y/o biomasa. Como complemento, se incluyen lineamientos para el desarrollo de ejercicios de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) como herramienta vinculante en los esquemas de gobernanza local. Ejercicios que, a su vez, apuntan a obtener una mayor cantidad de información en torno a los ecosistemas de humedal y las acciones que podrían desarrollarse para hacer frente al cambio climático.



Representación gráfica de la dinámica del carbono y los efectos del cambio climático en humedales naturales continentales

> *Área ocupada por cuerpos de agua naturales lénticos interiores (dulceacuícolas) conectados total o parcialmente con algún afluente[1], ubicada entre[2] los 0 y 2800 m s. n. m. con una extensión de área total de inundación mínima[3] de 25 ha ocupada por vegetación hidrófita[4] y con periodos de inundación anual[5] de mínimo 90 días continuos.*

Las metodologías propuestas se construyeron no solo a partir de información primaria, sino también desde el planteamiento de esquemas de monitoreo por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfico (SIG) y teledetección. Finalmente, toda la información contenida en este documento surtió un proceso de validación según los lineamientos establecidos por el Sistema Estadístico Nacional (SEN), de modo que pueda ser replicado e implementado en línea con los organismos oficiales del país encargados de generar información sobre este tema.

Así, en el contexto de la propuesta de Protocolo y para su aplicabilidad se establece un concepto operativo que describe los humedales en términos de extensión, altitud, vegetación, periodo de inundación, hidroclimatología y suelos:

Esta propuesta de Protocolo va dirigida a los todos actores del Sistema Nacional Ambiental (SINA), autoridades ambientales (ministerios y Corporaciones Autónomas Regionales, CAR), institutos de investigación, autoridades locales y regionales y, en general, a cualquier entidad del orden público o privado interesada en el monitoreo de los humedales continentales del país, particularmente aquellos presentes en el Magdalena Medio y Bajo.

1 Magnitud establecida según la temporalidad climática de la región.

2 Delimitación altitudinal de la Estrategia de Monitoreo de la Alta Montaña (EMA) del IDEAM (2019).

3 Área mínima correspondiente a la escala cartográfica oficial nacional 1:100 000.

4 Se excluyen coberturas tipo bosque de tierra firme y se incluyen tierras de cultivo y pastizales gestionadas no cuantificadas que estén dentro del área de estudio.

5 Promedio de años normales, excluyendo eventos extremos.

Marco de referencia

Los términos considerados en este marco de referencia son relevantes porque establecen las bases teóricas sobre las que se construyó este documento. Estas incluyen desde el contexto general hasta los diferentes compartimientos que contiene esta propuesta de Protocolo: suelos y sedimentos, biomasa vegetal y biodiversidad. Además, se proporcionan definiciones detalladas del componente de SIG, necesarias para su implementación.

Conceptualización general:

Ecosistema

Se adopta la definición del Convenio de Diversidad Biológica (1992), que refiere que un ecosistema es un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos en su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional materializada en un territorio, la cual se caracteriza por presentar homogeneidad en sus condiciones biofísicas y antrópicas.

Humedal

Se reconocen las definiciones nacionales de humedal y se toman como punto de partida para la propuesta de la definición técnica de humedal bajo la cual está construido la propuesta de este Protocolo (véase la sección Alcance; Tabla 1).

Tabla 1. Definiciones nacionales de humedal como base para la definición técnica operativa.

Fuente/institución	Definición
Convención Ramsar. Adoptada por el MADS Colombia mediante la Ley 357 de 1997.	Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.
Jaramillo et al. (2014). Colombia anfibia. IAvH	Tipo de ecosistema que debido a condiciones geomorfológicas e hidrológicas permite la acumulación de agua (temporal o permanentemente) y que da lugar a un tipo característico de suelo y a organismos adaptados a estas condiciones.
IPCC (2006). Guía para Inventarios de GEI (Humedales)	Cuerpos de agua donde las actividades humanas han causado cambios en la cantidad de superficie cubierta por agua, típicamente a través de la regulación del nivel del agua.
IDEAM et al. (2020). Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC).	Son áreas donde el suelo está saturado de agua o permanece inundado una parte del año, y pueden tener diferente temporalidad de las inundaciones y el drenaje. Así, algunas pueden permanecer inundadas por más de seis meses al año (otras pueden estar sujetas a inundaciones o encharcamientos durante lapsos inferiores a tres meses en el año), tiempo en el que las unidades de tierra se entrelazan con funciones de control de flujos de agua y producción biológica.

Fuente: elaboración propia (2024)

Para el caso de las definiciones empleadas en las subcategorías de uso y cambio de uso de la tierra del Tercer Informe Bienal de Actualización (BUR-3) (IDEAM et al., 2022), se incluyeron los humedales como subcategorías de coberturas en superficies de agua y vegetación acuática (Tabla 2).

Tabla 2. Definiciones empleadas en las subcategorías de uso y cambio de uso de la tierra para humedales en el BUR-3 (2022).

Subcategoría	Coberturas que incluye	Definición	Cita
3B4 Humedales	Superficies de agua	Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.	IDEAM, 2010.
	Vegetación acuática	Bajo esta categoría se clasifica toda aquella vegetación flotante que se encuentra establecida sobre cuerpos de agua, recubriéndolos en forma parcial o total. Comprende vegetación biotipológicamente clasificada como Pleustophyta, Rizophyta y Haptophyta.	

Variabilidad climática

Se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa) (IDEAM et al., 2016).

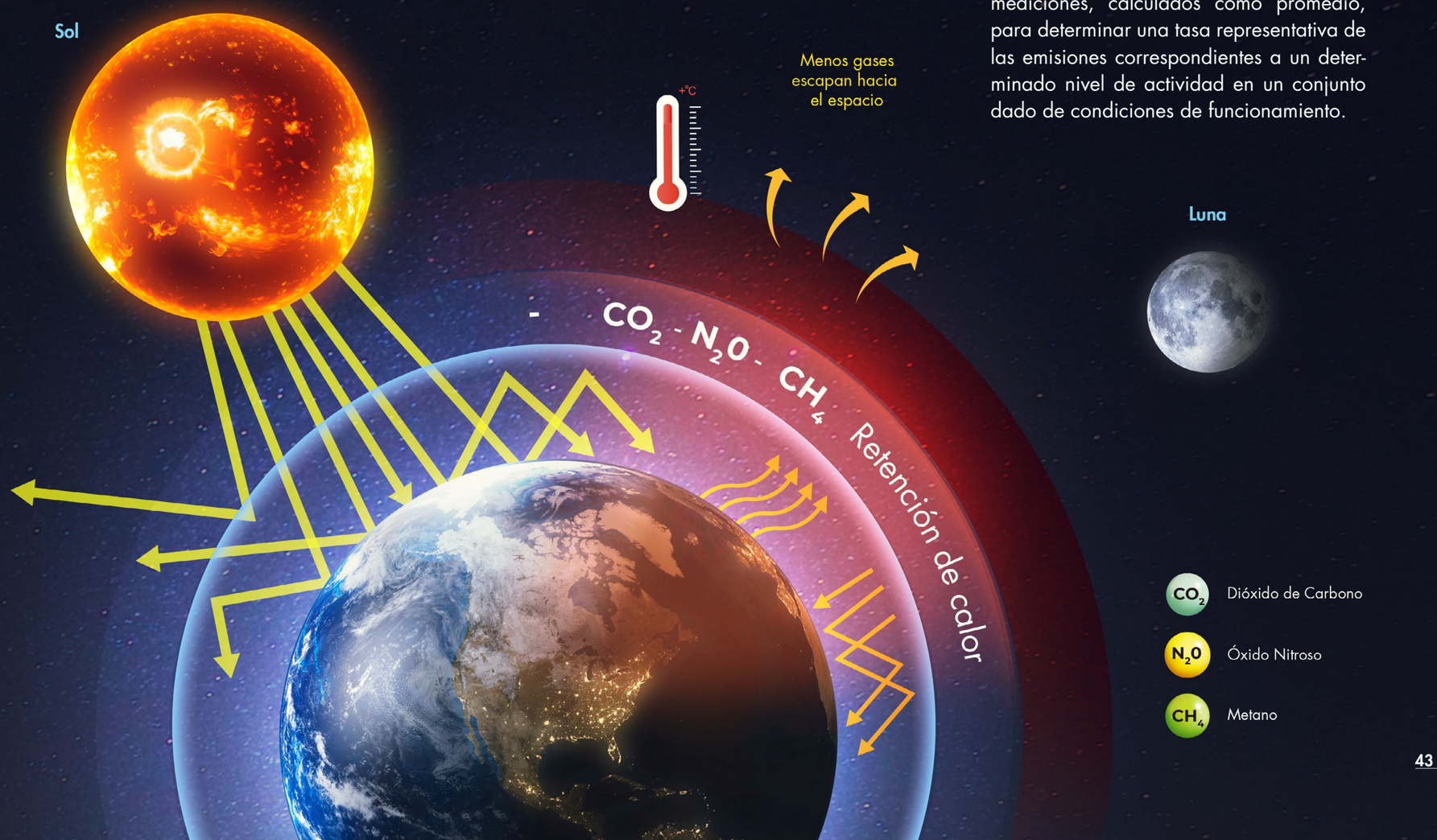
Cambio climático

Se define como la variación en las condiciones del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) que se manifiesta en cambios del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que perdura durante extensos períodos, generalmente decenios o lapsos de tiempo más largos. El cambio climático puede atribuirse a procesos internos naturales o a factores externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o alteraciones antropógenas persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (Vide, 2009).

La CMNUCC (1992), en su artículo 1, define el cambio climático como "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables" (p. 3). La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2013).

Gases de efecto invernadero (GEI)

Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H2O), el dióxido de carbono (CO2), el óxido nitroso (N2O), el metano (CH4) y el ozono (O3) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre (IPCC, 2009).



Reservorio

Componente del sistema climático, distinto de la atmósfera, con capacidad para almacenar, acumular o liberar una sustancia objeto de estudio (como carbono, GEI o precursores). Son reservorios de carbono, por ejemplo, los océanos, los suelos o los bosques. Un término equivalente es depósito (obsérvese que la definición de depósito suele abarcar también la atmósfera).

La cantidad absoluta de una determinada sustancia en un reservorio durante un tiempo dado se denomina reserva (IPCC, 2013).

Datos de actividad

Datos sobre la magnitud de las actividades humanas que dan lugar a las emisiones o absorciones que se producen durante un período determinado; son fundamentales para evaluar el impacto ambiental y comprender las tendencias en el cambio climático.

Factor de emisión

Coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico que constituye la fuente de las últimas emisiones. Los factores de emisión se basan a menudo en una muestra de datos sobre mediciones, calculados como promedio, para determinar una tasa representativa de las emisiones correspondientes a un determinado nivel de actividad en un conjunto dado de condiciones de funcionamiento.

Monitoreo

Proceso diseñado científicamente para observar, medir, muestrear y analizar diversos tipos de variables de manera periódica y mediante métodos técnicos normalizados. 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 (IDEAM et al., 2020).

Monitoreo comunitario participativo (MCP)

Proceso que involucra a la comunidad a través de espacios y estrategias de participación activa en el levantamiento de información y en la generación, construcción y gestión del conocimiento del territorio. Adicionalmente, involucra el trabajo conjunto con los diferentes actores que hacen parte de este, y los integra al monitoreo, a través del diálogo de saberes y los conocimientos tradicionales y científicos (IDEAM et al., 2021).

Compartimiento biomasa y materia orgánica muerta (MOM):

Cantidad de materia viva de origen vegetal o animal presente en un momento dado, en un área determinada (García y Martínez, 2014), que dentro de su estructura corporal contiene carbono; el material vegetal terrestre incluye biomasa aérea (tallos, ramas, corteza, semillas y follaje vivo) (Yepes et al., 2011; Cisneros-de la Cruz et al., 2021a) y biomasa subterránea (raíces para la absorción de agua y nutrientes y para las demás funciones fisiológicas y de sostén).

Vegetación acuática

Vegetación que crece y se desarrolla en ambientes acuáticos, constituida por herbáceas cuya dinámica varía en el tiempo, según la estacionalidad hidroclimática (temporada lluvia y seca), y en el espacio (distribución en la cubeta de agua), de forma que se pueden distinguir las comunidades acuáticas sumergidas, flotantes y enraizadas (Rial, 2003).

Materia orgánica (MO)

Material no vivo que se encuentra en algún grado de descomposición, ya sea en pie o caído sobre la superficie del suelo, con un diámetro igual o mayor a 10 cm (Yepes et al., 2011; Cisneros-de la Cruz et al., 2021a), además del detrito, considerado como materia orgánica (tejidos animales y vegetales), excretas, exudados y microorganismos sin vida, que a su vez dinamizan los procesos de los ciclos de los biogeoelementos dentro de las redes tróficas (Moore et al., 2004; Pozo et al., 2009).

Compartimiento suelos y sedimentos:

Suelo

Capa superficial de la tierra que comprende minerales, materia orgánica, microorganismos, aire y agua, cuya interacción genera propiedades físicas, químicas y biológicas únicas que influyen en su capacidad para sostener la vida vegetal y animal, así como en la producción agrícola y la conservación del medio ambiente (IDEAM, 2019).

Suelo hídrico

También conocidos como suelos de humedal. Son suelos que se encuentran saturados de agua de forma temporal o permanente, lo que les proporciona características específicas. Conforman áreas ecológicamente importantes que proveen hábitats para diversas especies de flora y fauna, así como servicios ambientales vitales, como la regulación del ciclo hidrológico y la protección contra inundaciones (USDA y NRCS, 2018).

Sedimentos

Son las partículas sólidas transportadas y depositadas por el agua, el viento o el hielo, que se acumulan en la superficie de la Tierra. Estas partículas pueden variar en tamaño desde arcilla hasta grava y son fundamentales en procesos geológicos, como la formación de suelos y la configuración del paisaje (Avnimelech et al., 2001; Parra, 2005).

Compartimiento biodiversidad:

Biogeografía

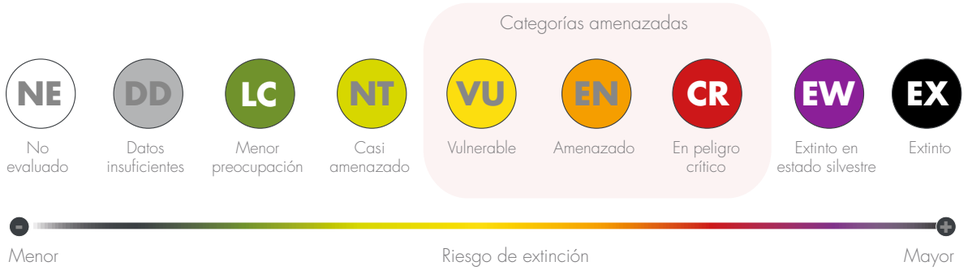
Disciplina que estudia la distribución geográfica de los seres vivos en el tiempo y el espacio, a partir de los diversos factores que dieron lugar a tal distribución (Contreras-Medina, 2006). Los aspectos biogeográficos se consideran en relación con el "área de distribución de las especies", es decir, aquella fracción del espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa en forma no efímera con el ecosistema (Zunino y Palestrini, 1991). Esta área de distribución depende, entre otros factores, de la historia (biología) de las especies y de su capacidad de dispersión. En este sentido, según Conabio (2023), se encuentran términos relacionados, como especie nativa o autóctona, especie endémica, especie exótica y especie invasora.

Categorías de conservación

Sistemas de clasificación de los estados de conservación de las especies (o de su riesgo de extinción). Para este caso se siguen los lineamientos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), que define las siguientes categorías (Renjifo et. al, 2002): Alto valor de conservación (AVC). Es un alto valor biológico, ecológico, social o cultural excepcionalmente significativo o de importancia crítica. El Consejo de Administración Forestal (FSC) define seis categorías de AVC: diversidad de especies, ecosistemas y mosaicos a escalas de paisaje, ecosistemas y hábitats, servicios ecosistémicos, necesidades de las comunidades y valores culturales.

Iniciativas o estrategias comunitarias de conservación

De acuerdo con el MADS y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH, 2018) y, en línea con la guía propuesta por UICN y la Comisión Mundial de Áreas Protegidas (WCPA, 2017), las estrategias complementarias de conservación se definen como "medidas gubernamentales o no gubernamentales que se expresan en un espacio geográfico definido, diferente a un área protegida, que buscan mantener y promover en el tiempo las contribuciones materiales e inmateriales de la naturaleza a la sociedad y aportar a la conservación in situ de la biodiversidad, mediante una forma de gobernanza que involucra uno o varios actores (públicos, privados o comunitarios)".



Componente de sistemas de información geográfica:

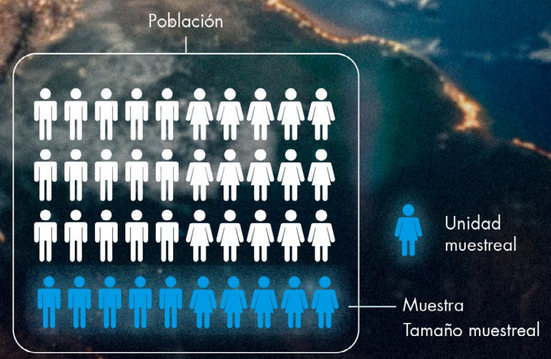
Evaluación multicriterio (EMC)

Conjunto de técnicas orientadas a asistir los procesos de toma de decisiones y que permiten evaluar el territorio en relación con determinados objetivos y definir rigurosamente los procesos operativos y los juicios que orientan la valoración de diferentes variables e indicadores (Da Silva y Cardozo, 2015).

Proceso analítico jerárquico (PAJ)

Para el análisis jerárquico se aplican procesos de desarrollo con base en las decisiones de EMC a diferentes niveles de complejidad, las cuales se encuentran como solución para problemas complejos. En estos procesos, mediante la aplicación de una matriz de comparación entre criterios, se determinan las acciones más apropiadas para la investigación. Saaty (2008) define la escala numérica que indica qué tan dominante o importante es un criterio frente a otro. En los métodos del PAJ se establece la jerarquía de atributos, que consta de tres niveles (Berumen y Llamazares-Redondo, 2007):

- Planteamiento del objetivo general en la parte superior.
- Atributos o criterios que definen las alternativas en el medio. Cuando los atributos o criterios no son suficientemente explícitos o claros, se incluyen subcriterios más operativos entre el nivel de criterios y el de alternativas.
- Alternativas que concurren en la parte inferior.



Zonificación temática

Es uno de los procesos fundamentales para el ordenamiento territorial, ya que define aquellas zonas con un manejo o destino homogéneo, para establecer una normativa y unas políticas de uso de los ecosistemas, a fin de cumplir los objetivos de conservación para una ventana piloto determinada (Long et al., 2010). La generación cartográfica de mapas de zonificación incluye la regionalización o el agrupamiento de objetos en el espacio, herramientas que son el punto de partida para organizar, visualizar y sintetizar información geográfica de origen multivariado. Según Ng y Han (2002), la zonificación temática se define como el agrupamiento de unidades espaciales básicas que están contiguas, pero que debido a sus características particulares difieren de su entorno.

Componente estadístico:

Población

Conjunto de elementos acotados en un tiempo y en un espacio determinados, con alguna característica común observable o medible. Cuando la población es finita se indica que el tamaño poblacional es el número de elementos de esta y se denota como N.

Muestra

Subconjunto de elementos de la población; debe ser representativa, para poder generalizar los resultados a toda la población.

Unidad muestreal

Es el elemento mínimo o entidad de la muestra. Es decir, son las unidades mínimas de observación o medición de los datos (parcelas, zonas) de distinto tamaño.

Tamaño muestreal

Número de elementos de la población que conforman la muestra y se denota con n.

2 HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO

Cerca del 27% del territorio nacional son humedales (30 781 149 ha), siendo la Orinoquia la región de mayor representatividad, seguida de la Amazonia y la macrocuenca Magdalena-Cauca (IDEAM et al., 2021; IDEAM, 2022). El área hidrográfica Magdalena-Cauca ocupa 27 101 006,26 ha, y está conformada por los tramos alto, medio y bajo de los ríos Cauca y Magdalena, además de las cuencas de los ríos San Jorge, Nechí, Saldaña y Sogamoso (IDEAM, 2013a); cubre 19 departamentos y 733 municipios por los que fluyen sus aguas hasta su descarga en el mar Caribe.

Aspectos del relieve, como la presencia de la cadena montañosa de los Andes, generan un gradiente de ecosistemas que va desde el nivel del mar hasta alturas superiores a los 5000 m s. n. m. Conforme se reduce la elevación, se forman bajos inundables en los que se depositan las aguas que drenan desde las partes altas de las montañas, formando un entramado de humedales que se hacen más frecuentes en los trechos medio y bajo de la cuenca. De las hectáreas totales de la macrocuenca, aproximadamente 5 701 101 ha son propiamente humedales (Figura 3).

Se reconocen alrededor de 1900 ciénagas en estos tramos, con un área de 3200 km^2 aproximadamente (Montoya-Moreno y Aguirre-Ramírez, 2008), que dependen fundamentalmente de la conectividad con sus principales tributarios. Las ciénagas se nutren de las aguas de estos, producto de los desbordes que se presentan en los periodos de lluvias. Por tanto, en un escenario de cambio climático y de modificación constante y rápida de las condiciones hidráulicas, se pueden desencadenar alteraciones importantes para la viabilidad de los procesos físicos, químicos y ecológicos propios de estos ecosistemas (Jiménez-Segura et al., 2020). La macrocuenca Magdalena-Cauca es una de las áreas más transformadas del país, alberga al 77% de la población colombiana y soporta la generación del 85% del PIB. La confluencia de la heterogeneidad espacial y temporal, con centenares de formas de uso de los recursos naturales, produce una variedad de conflictos socioecológicos que requieren ser gestionados a partir del conocimiento. Allí, las acciones de monitoreo se hacen prioritarias y constituyen un desafío de alta complejidad para el país (León et al., en preparación).

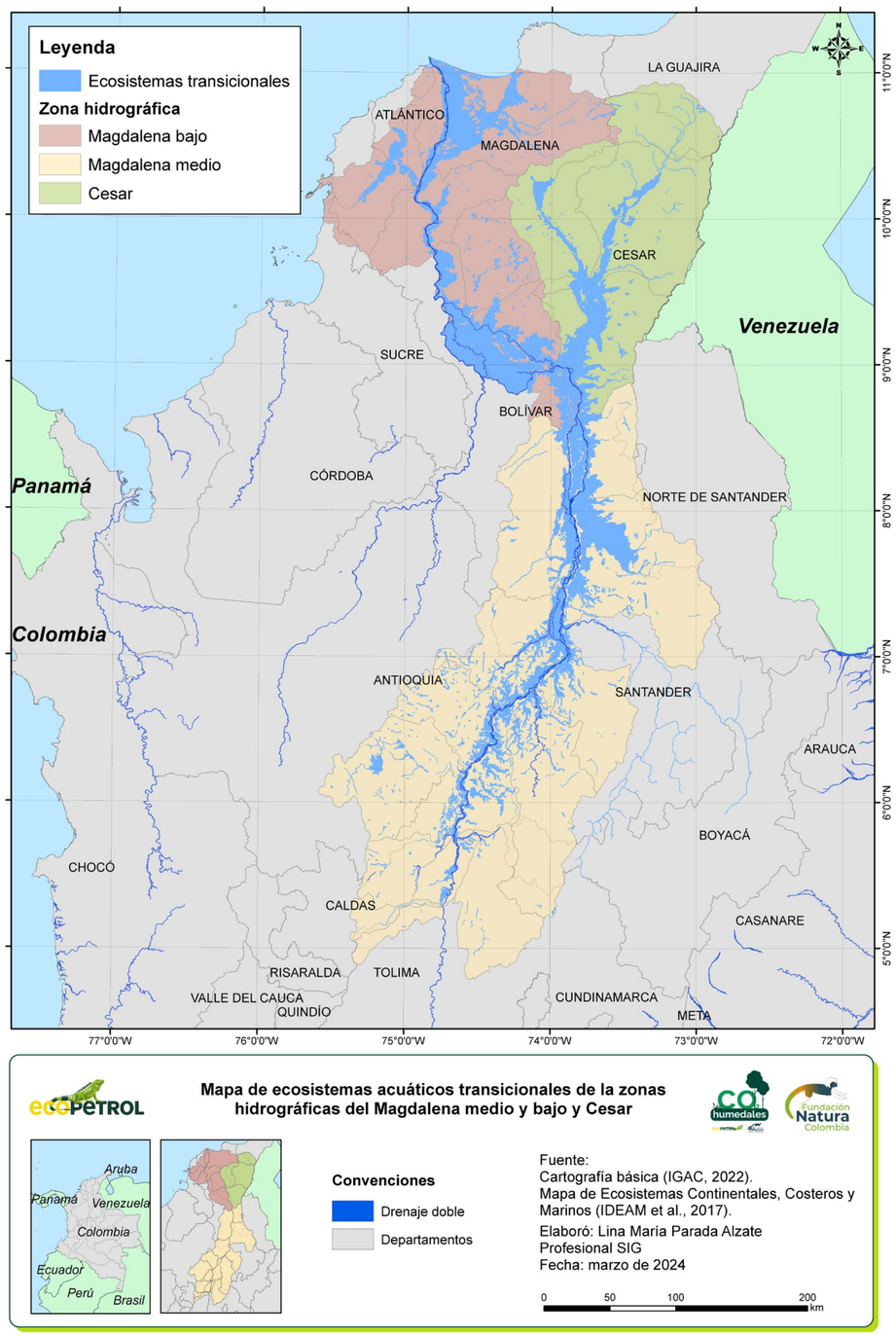


Figura 3. Mapa de ecosistemas de humedales de la macrocuenca Magdalena-Cauca. Fuente: elaboración propia (2024).

3 METODOLOGÍA

Etapa de premuestreo

Identificación de los motores de transformación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo

Cualquier acción natural o hecha por el hombre que genere cambios en los ecosistemas es considerada un motor de transformación (Carpenter et al., 2006). Estos cambios pueden ser directos, cuando hay una fuerte influencia en el funcionamiento del ecosistema (variabilidad climática, transformaciones en el paisaje, inyección de nutrientes al suelo con fines agrícolas, explotación y uso de recursos e invasiones biológicas), o indirectos, cuando su efecto no es claramente visible (crecimiento demográfico, tendencias sociopolíticas o económicas, avances científicos para mejorar la producción de biomasa y comportamiento humano) (Nelson et al., 2006).

El análisis prospectivo es una herramienta que se basa en información secundaria para identificar los motores de transformación mediante la priorización de acciones de gestión, a partir de un esquema sistemático de pasos para su desarrollo (Figura 4). Este método ya se ha implementado en ecosistemas de humedal en Colombia como fuente de identificación de motores de transformación (Senhadji-Navarro et al., 2017), y se basa en una relación de influencia que genera jerarquías para las variables consideradas, de influencia (sobre) y dependencia (recibe) de un elemento en relación con otro. Para identificar las ventanas piloto del Protocolo, es importante primero reconocer los motores que actúan sobre el humedal a muestrear, con el fin de tener argumentos técnicos y socioeconómicos que direccionen los recursos destinados para la implementación del monitoreo y para acercarse a procesos de caracterización y a futuras propuestas de conservación para el ecosistema.

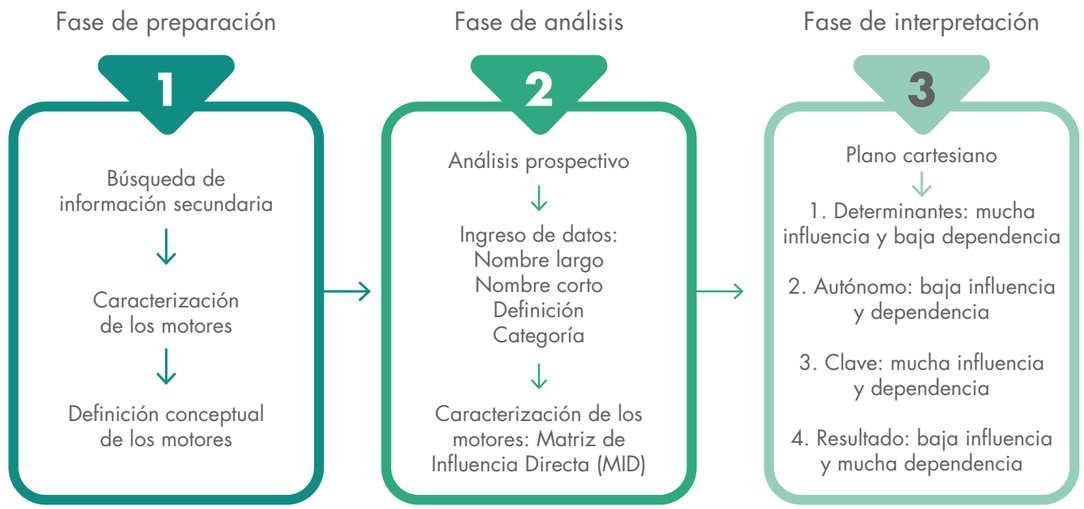


Figura 4. Fases y pasos del análisis prospectivo. Fuente: elaboración propia (2024).

Fase de preparación

Búsqueda de información secundaria

El primer paso propuesto es la identificación a partir de información secundaria de las actividades y/o procesos que generen alguna transformación en el humedal objeto de estudio. En los humedales de la macrocuenca Magdalena-Cauca se han identificado actividades como ganadería, agricultura (que incluye monocultivos de gran extensión), deforestación, descarga de aguas residuales, minería, obras hidráulicas, contaminación y sobrepesca, además de exploración y explotación de hidrocarburos como principales acciones que modifican su condición natural (Sánchez et al., 2015; Garzón y Gutiérrez, 2017; Angarita et al., 2020; Gutiérrez-Moreno y De la Parra-Guerra, 2020; Gutiérrez-Campo y Escobar-Jiménez, 2021; IDEAM, 2021; Fundación Natura, 2021b y Rondón-Martínez, 2022) y, por tanto, son considerados motores de transformación.

Lo anterior describe las acciones más frecuentes dentro de la literatura, lo que no excluye otros motores que, a escala local, pueden ser igual o incluso más determinantes que los mencionados. Para definirlos con más detalle, se puede complementar la información con actividades como entrevistas, talleres, mesas territoriales y cartografía social; todo esto sujeto a la posibilidad de desarrollar tales acciones.

Categorización de los motores identificados

Se recomienda tener en cuenta la categoría de la que proviene cada transformación, ya que esto fortalece el proceso de definición conceptual. Se deben incluir aspectos biológicos (introducción de especies, materia orgánica en descomposición, etc.), aspectos físicos (descarga de aguas residuales, deforestación, degradación del hábitat, erosión, obras civiles, sedimentación, etc.) y actividades socioeconómicas (residuos sólidos, agricultura, ganadería, represamiento, monocultivos extensos, urbanización, minería, turismo, entre otras).

Definición conceptual de los motores identificados

Con base en la naturaleza de cada motor de transformación se define conceptualmente lo encontrado en la búsqueda de información, con base en conceptos de otros autores que se ajustan a las condiciones propias del área de estudio. En vista de la importancia de este paso, se recomienda utilizar palabras clave para cada caso; esto permite establecer un límite para cada motor, de modo que no se solape con otro y, por tanto, adaptar con mayor detalle la interpretación del área de estudio a su estado actual.

Fase de análisis

Análisis prospectivo

Por medio de la rutina "análisis prospectivo" del software de libre acceso MICMAC (Versión 6.1.2 2003/2004 de Lipsor-Epita-Micmac) se ingresan las variables (motores) por medio de la opción "Ingreso de datos", indicando nombre (nombre largo) y abreviatura (nombre corto), descripción conceptual (descripción) y categoría asignada (tema). Hacer esto es fundamental para el análisis posterior del resultado. Para el nombre corto se recomienda usar siglas que describan cada motor, lo que ayuda a visualizar claramente el resultado del análisis (fase de interpretación), ya que la ubicación espacial de cada uno de los motores indica su importancia para el área de estudio.

Clasificación de variables

Se ingresan las variables tanto a nivel de filas como de columnas en la Matriz de Influencia Directa (MID), de modo que se pueda evaluar el grado de influencia y dependencia de cada una (Figura 5). Para la valoración se debe tener en cuenta la siguiente jerarquía, según el caso:

- 0 cuando es nula
- 1 cuando es leve
- 2 cuando es moderada
- 3 cuando la relación es fuerte

Dependencia (De) \ Influencia (Sobre)	Motor	M1	M2	M3	Mn
M1					
M2					
M3					
Mn					

Figura 5. Matriz de influencias directas (MID) para la captura de datos de influencia y dependencia de los motores de transformación. Fuente: elaboración propia (2024).

Fase de interpretación

El resultado del análisis se refleja en un plano cartesiano en el que, a partir de la ubicación espacial de cada motor, se determina un nivel de priorización o valoración. Se consideran autónomos aquellos motores con baja influencia y dependencia, lo que implica un bajo seguimiento; por su parte, los motores con baja dependencia y alta influencia se denominan determinantes, debido a su independencia. Los motores de baja influencia y mucha dependencia se consideran resultantes, ya que son producto de otras acciones y requieren apoyo de otros actores; finalmente, los motores de mucha influencia y mucha dependencia son considerados clave, pues son los que producen la mayor afectación al territorio y concentran las acciones a tratar a corto, mediano y largo plazo (Figura 6).

Esta herramienta es útil y complementa otras metodologías para: (i) identificar el estado del suelo y los cambios en el uso del suelo; (ii) establecer posibles insumos cartográficos que, a su vez, sirvan de base para calcular los datos de actividad (DA), es decir, conocer datos relacionados con información biológica (listados taxonómicos, especies con algún tipo de interés comercial, de uso o aprovechamiento, entre otros); y (iii) plantear y desarrollar acciones en el área de estudio a partir de los resultados, con base en las necesidades identificadas.

Figura 6. Interpretación del resultado del análisis prospectivo MICMAC. Fuente: elaboración propia (2024).

Selección de las ventanas de muestreo

Es el primer paso para identificar la heterogeneidad ecosistémica. Si bien cada ambiente es único, es importante seleccionar un área representativa que permita implementar los esfuerzos de muestreo de forma asertiva en términos costo-eficientes, tanto por la calidad de la información como por el presupuesto necesario para ejecutarlo. Esto genera los lineamientos para que esta propuesta de Protocolo sea implementada, bajo ciertas adecuaciones, en otros escenarios del territorio nacional. El proceso de selección de la ventana de muestreo se divide en varias etapas, como lo muestra la Figura 7.

Figura 7. Etapas del proceso de selección de la ventana de muestreo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Etapa 1. Protocolos nacionales

Se plantea la implementación de la metodología propuesta en el Protocolo de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos de Colombia (Promsea) (IDEAM, 2023). Esta herramienta, de carácter nacional, ofrece los lineamientos aplicados a los ecosistemas acuáticos continentales, marinos, costeros e insulares del país, desde los cuatro componentes que articulan el trabajo en torno al conocimiento de su dinámica: calidad hídrica, comunidades hidrobiológicas, aspectos físicos y aspectos socioeconómicos. El Promsea ofrece bases metodológicas y conceptuales para que el monitoreo permita obtener información base, bajo estándares de calidad, que orienten directrices para la gestión de estos ecosistemas frente a tres fenómenos de transformación priorizados: carga contaminante, fragmentación y cambio climático.

Criterio 1: extensión

Mapa de ecosistemas continentales, marinos y costeros de Colombia (MEC), escala 1:100 000

Con base en el MEC —mapa oficial que presenta la clasificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, identificados desde una metodología concertada entre las instituciones del SINA—, que involucra atributos clave de clima, geopedología, coberturas de la Tierra, unidades bióticas y paisajes marinos, fundamentales para el proceso de delimitación de ecosistemas acuáticos (IDEAM, 2022), se busca identificar los que tengan una mayor representatividad en términos de extensión por área hidrográfica. Para el caso del Magdalena-Cauca, en la Tabla 3 se presentan los datos de extensión de los cuatro tipos de ecosistemas síntesis presentes en la zona.

En el MEC, los ecosistemas de aguas lénticas/estancadas tienen una extensión del 77,42% y, entre ellos, los ecosistemas transicionales (considerados los humedales propiamente dichos) corresponden al 43,66% de los ecosistemas acuáticos del área hidrográfica Magdalena-Cauca; así, por su extensión, son los más importantes para hacer monitoreo. Ahora bien, dentro de estos humedales, para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo se destacan, por extensión de mayor a menor, el Complejo Cenagoso de Zapatosa, el Complejo Cenagoso de Zarate Malibú y Veladero y la Ciénaga de Barbacoas (Tabla 4, Tabla 5).

Tabla 3. Representatividad de ecosistemas síntesis acuáticos para el área hidrográfica del Magdalena-Cauca (IDEAM, 2020).

Área hidrográfica	Ecosistemas síntesis	Área (ha)	Porcentaje
Magdalena - Cauca	Transicional transformado	1 530 082,01	43,66%
	Laguna	619 898,15	17,69%
	Zona pantanosa	563 400,76	16,07%
	Río	333 840,95	9,52%

Tabla 4. Extensión de ecosistemas de humedal por tipo de ambiente según el MEC, para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo (IDEAM, 2020).

Ecosistema de humedal	Léntico	Transicional	Total general (ha)
Complejo Cenagoso de Zapatosa	62 496,58	37 463,71	99 960,29
Complejo Cenagoso de Zarate Malibú y Veladero	19 665,56	12 909,14	32 574,70
Ciénaga de Barbacoas	2051,06	13 448,79	15 499,86
Ciénaga de Chiqueros	66,77	3185,82	3 252,59
Complejo Ciénagas Papayal	606,44		606,44
Humedal San Silvestre	12,46	118,41	130,88
Laguna de San Diego	148,70	83,95	232,65
Total general (ha)	**85 047,60**	**67 209,84**	**15 2257,44**

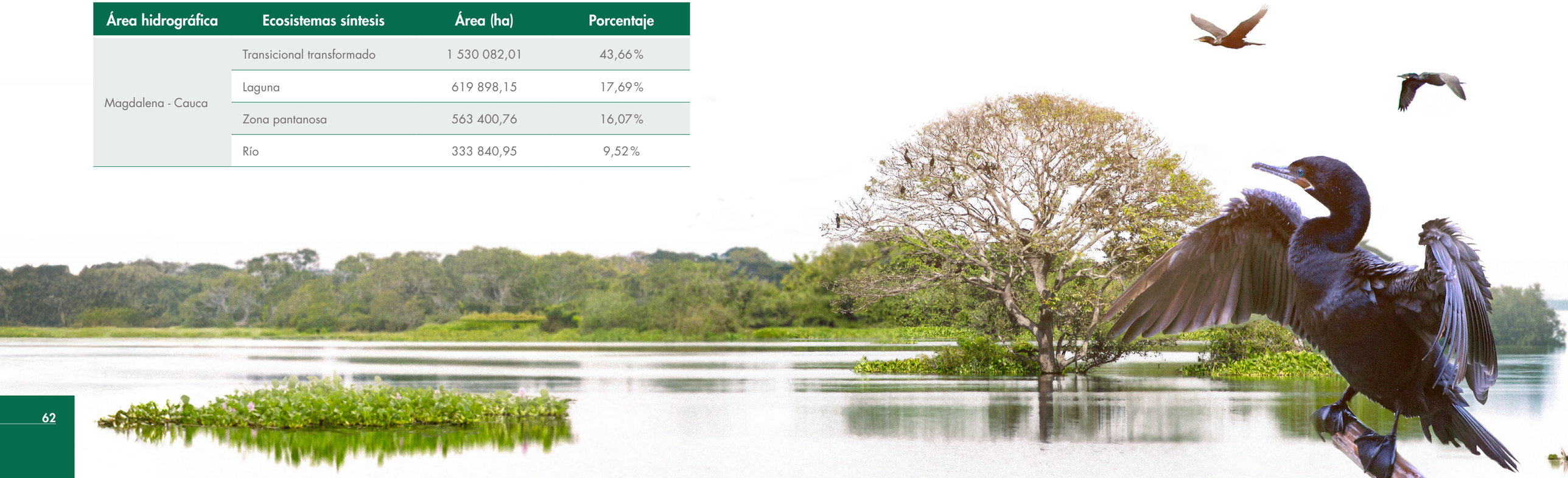


Tabla 5. Detalle por tipo de cobertura para los ecosistemas de humedal de la cuenca del Magdalena Medio y Bajo (MEC, 2017).

Ecosistema de humedal	Arbustal inundable basal (ha)	Bosque galería inundable basal (ha)	Bosque inundable basal (ha)	Herbazal inundable basal (ha)	Laguna aluvial (ha)	Transicional transformado (ha)	Zona pantanosa basal (ha)	Zonas arenosas naturales (ha)	Total general (ha)
Ciénaga de Barbacoas	470,78	–	997,61	401,87	2051,07	8240,63	3337,90	–	15 499,87
Ciénaga de Chiqueros	–	–	484,22		66,78	2380,86	320,74	–	3252,60
Complejo Cenagoso de Zapatosa	2164,91	150,66	417,67	6385,35	62 496,58	15 065,50	13 279,63	–	99 960,30
Complejo Cenagoso de Zarate Malibú y Veladero	129,49	–	–	–	19 665,56	10 095,54	2620,72	63,39	32 574,70
Complejo ciénagas Papayal	–	–	–	–	606,44	–	–	–	606,44
Del Humedal San Silvestre	–	–	–	72,02	12,47	46,40	–	–	130,89
Laguna de San Diego	–	–	–		148,71	83,95	–	–	232,66
Total general (ha)	**2765,18**	**150,66**	**1899,51**	**6859,25**	**85 047,60**	**35 912,88**	**19 558,98**	**63,39**	**15 2257,45**

Criterio 2: ecosistemas estratégicos

Humedales Ramsar

Para el área hidrográfica del Magdalena-Cauca, se han designado hasta el momento seis ecosistemas acuáticos bajo la declaratoria Ramsar (Tabla 6).

La convención Ramsar ha hecho un llamado para que los humedales sean incluidos dentro de las acciones frente al cambio climático, debido a su importancia en la regulación y estabilidad del clima y para dar cumplimiento a los compromisos del Acuerdo de París (Ramsar, 2022). En este sentido, no existen restricciones para que se lleven a cabo proyectos de carbono en humedales declarados por Ramsar, siempre y cuando se tengan claros los derechos de propiedad de la tierra que hace parte del área del proyecto. Este es un aspecto fundamental, dado que los propietarios de estas áreas son quienes tendrán los derechos de propiedad del carbono que se genere durante la implementación del proyecto.

Cuencas priorizadas con fines de ordenación por las autoridades ambientales regionales

Los criterios de priorización se establecen según los objetivos de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) referentes a la oferta, demanda, calidad, riesgo y gobernabilidad asociadas al recurso hídrico (IDEAM, 2022).

Para esto se cuenta con el modelo de priorización que contempla la utilización de información a escala nacional, regional o local (1:100 000, 1:25 000, menor) según el tipo de información con la que cuenten las autoridades ambientales competentes (Minambiente, 2014). Para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo hay en la actualidad 32 programas de ordenación de cuencas (Tabla 7).

Tabla 6. Humedales declarados como sitios Ramsar en Colombia para el área hidrográfica Magdalena-Cauca.

Humedal Ramsar	Acto administrativo	Escala	Área (ha)
Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta	Decreto 3888 de 8 de octubre de 2009	1:100 000	520 846,56
Laguna del Otún	Decreto 250 de 14 de febrero de 2017	1:100 000	115 883,09
Complejo de Humedales Alto Río Cauca asociado a la Laguna de Sonso	Decreto 251 de 14 de febrero de 2017	1:100 000	5532,67
Complejo Cenagoso de Ayapel	Decreto 356 de 22 de febrero de 2018	1:25 000	54 376,78
Complejo Cenagoso de Zapatosa	Decreto 1190 de 12 de julio de 2018	1:25 000	121 725,01
Complejo de Humedales Urbanos del Distrito Capital de Bogotá	Decreto 1468 de 6 de agosto de 2018	1:10 000 1:15 000	666,85

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 7. Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo. ZH: zona hidrográfica, SZH: subzona hidrográfica

NomZH	NomSZH	POMCA	CAR	Departamentos	Área (ha)
Alto Magdalena	Río Bogotá	Río Bogotá, SZH	CAR/SDA/ CORPOGUAVIO	Cundinamarca	593 295,34
Alto Magdalena	Río Lagunilla y otros directos al Magdalena	Río Recio y río Venadillo, NSS	CORTOLIMA	Tolima	101 164,12
Medio Magdalena	Río Guariná	Río Guariná, SZH	CORPOCALDAS/ CORTOLIMA	Caldas/Tolima	84 380,72
Cauca	Río Arma	Río Arma, SZH	CORANTIOQUIA/ CORNARE/ CORPOCALDAS	Antioquia/ Caldas	186 097,11
Medio Magdalena	Río La Miel (Samaná)	Río Samaná Sur, NSS	CORNARE/ CORPOCALDAS	Antioquia/ Caldas	120 987,45
Medio Magdalena	Directos Magdalena Medio entre Ríos La Miel y Nare (mi)	Río Cocorná y directos Magdalena Medio entre Ríos La Miel y Nare (mi), SZH	CORANTIOQUIA/ CORNARE	Antioquia	148 445,72
Medio Magdalena	Río Opón	Río Opón, SZH	CAS	Santander	431 846,71
Sogamoso	Río Sogamoso	Río Sogamoso, SZH	CAS/CDMB	Santander	340 843,57
Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge	Bajo San Jorge-La Mojana	Río Bajo San Jorge, NSS	CORANTIOQUIA/ CSB/CVS/ CARSUCRE/ CORPOMOJANA	Antioquia/ Bolívar/ Córdoba/Sucre	1 529 630,15
Medio Magdalena	Río Nare	Rio Samaná Norte, NSS	CORANTIOQUIA/ CORNARE	Antioquia	201 225,33
Medio Magdalena	Río Carare (Minero)	Río Carare (Minero), SZH	CAR/ CORPOBOYACÁ/ CAS	Boyacá/ Cundinamarca/ Santander	728 262,77
Sogamoso	Río Suárez	Río Medio y Bajo Suárez, NSS	CORPOBOYACÁ/ CAR/CAS	Boyacá/ Cundinamarca/ Santander	613 823,48
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Rio Lebrija Medio, NSS	CSB/ CORPOCESAR/ CORPONOR/ CDMB/ CAS	Bolívar/Cesar / Norte de Santander/ Santander	188 611,37
Bajo Magdalena	Canal del Dique	Canal del Dique, 2SZH	CRA/CARDIQUE/ CARSUCRE	Atlántico/ Bolívar/Sucre	440 486,84
Bajo Magdalena	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (mi)	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (mi), SZH	CARDIQUE/ CORPAMAG	Bolívar/ Magdalena	201 225,07
Catatumbo	Río Algodonal (Alto Catatumbo)	Río Algodonal, SZH	CORPONOR/ CORPOCESAR	Cesar/Norte de Santander	234 020,45
Catatumbo	Río Zulia	Río Zulia, SZH	CORPONOR	Norte de Santander	342 786,61
Bajo Magdalena	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato (md)	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato (md), SZH	CSB/CORPAMAG	Bolívar/ Magdalena	700 668,18
Caribe - Guajira	Río Piedras - Río Manzanares	Río Piedras-Río Manzanares y otros directos Caribe, SZH	CORPAMAG / DADMA	Magdalena	92 963,83
Cesar	Bajo Cesar	Río Bajo Cesar- Ciénaga Zapatosa, NSS	CORPOCESAR / CORPAMAG	Cesar/ Magdalena	468 219,19

NomZH	NomSZH	POMCA	CAR	Departamentos	Área (ha)
Bajo Magdalena	Ciénaga Grande de Santa Marta	Complejo humedales Ciénaga Grande de Santa Marta, NSS	CRA/CORPAMAG	Atlántico/ Magdalena	283 571,50
Caribe - Litoral	Arroyos directos al Caribe	Arroyos directos al Caribe Sur - Ciénaga de La Virgen, NSS	CARDIQUE	Bolívar	59 781,52
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Río Alto Lebrija, NSS	CDMB	Santander	217 596,07
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Río Cáchira Sur, NSS	CDMB	Santander	68 085,12
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Afluentes directos río Lebrija Medio (mi), NSS	CSB/CAS	Bolívar/ Santander	182 780,79
Sogamoso	Río Suárez	Río Alto Suárez, NSS	CAR	Cundinamarca	171 750,45
Nechí	Río Porce	Río Aburrá, NSS	AMVA/ CORANTIOQUIA/ CORNARE	Antioquia	121 766,90
Medio Magdalena	Río Nare	Río Negro, NSS	AMVA/CORNARE	Antioquia	92 474,64
Medio Magdalena	Río Nare	Río Nare, NSS	CORANTIOQUIA/ CORNARE	Antioquia	96 087,20
Medio Magdalena	Río La Miel (Samaná)	Río La Miel, NSS	CORNARE/ CORPOCALDAS	Antioquia/ Caldas	119 049,94
Bajo Magdalena-Cauca -San Jorge	Bajo San Jorge-La Mojana	La Mojana-Río Cauca, NSS	CARDIQUE/ CARSUCRE/CSB	Bolívar/Sucre	189 591,94
Cesar	Alto Cesar	Rio Guatapurí, NSS	CORPOCESAR	Cesar	86 959,38

Criterio 3: ecosistemas en riesgo de transformación

Criticidad según evaluación integrada del agua (Estudio Nacional del Agua 2018)

La priorización se realiza en términos de riesgo de transformación de ecosistemas acuáticos a monitorear, dado que integra el análisis de la Variabilidad de la Oferta Hídrica (VOH) en condiciones naturales, la situación actual de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (VRH) por presiones antrópicas de uso, la afectación a la calidad según el Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) y el Índice de Presión Hídrica sobre los Ecosistemas (IPHE) (IDEAM, 2022).

La evaluación por subzona hidrográfica se hace a partir de cuatro grandes componentes temáticos (ENA, 2018):

- Variabilidad de la oferta hídrica natural.
- Recurso hídrico y presiones por uso y contaminación.
- Erosión hídrica potencial en ladera de sedimentos.
- Transformación de áreas en zonas potencialmente inundables.

Con base en el análisis integrado de esa información, para el país se han clasificado las subzonas según la criticidad del agua desde muy baja hasta muy alta (Tabla 8); el área hidrográfica Magdalena-Cauca es la que presenta mayor grado de criticidad para sus ecosistemas acuáticos.

Análisis municipal de riesgo por cambio climático

En el marco del desarrollo del reporte bienal de actualización del país ante la CMNUCC, BUR, se generan los escenarios de cambio climático y los análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático a nivel departamental y regional, los cuales constituyen una base de información clave para priorizar las unidades de análisis e identificar lugares estratégicos (piloto) para la implementación del Promsea (IDEAM, 2023). Asimismo, para proyectos enfocados, a nivel nacional y regional, en el monitoreo de algunos de los fenómenos de transformación priorizados en este insumo nacional, como carga contaminante, fragmentación y cambio climático. La cuenca del Magdalena Medio y Bajo presenta, según el BUR, municipios con categorías de riesgo frente al cambio climático de 1 a 4; es decir, contiene zonas que van de muy bajo a alto riesgo (Figura 8).

Tabla 8. Criticidad de subzonas por área hidrográfica y por categoría de análisis según el ENA (2018).

Análisis integrado						
Categoría del análisis integrado	Número de subzonas por área hidrográfica					
	Amazonas	Caribe	Magdalena -Cauca	Orinoco	Pacífico	Total
Muy alta		1	14		2	17
Alta	1	16	66	4	5	92
Medio	4	11	23	11	10	59
Baja	13	10	2	18	13	56
Muy baja	39	8		40	5	92
Total general	**57**	**46**	**105**	**73**	**35**	**316**

Etapa 2. Portafolios de conservación de agua dulce para la cuenca Magdalena-Cauca

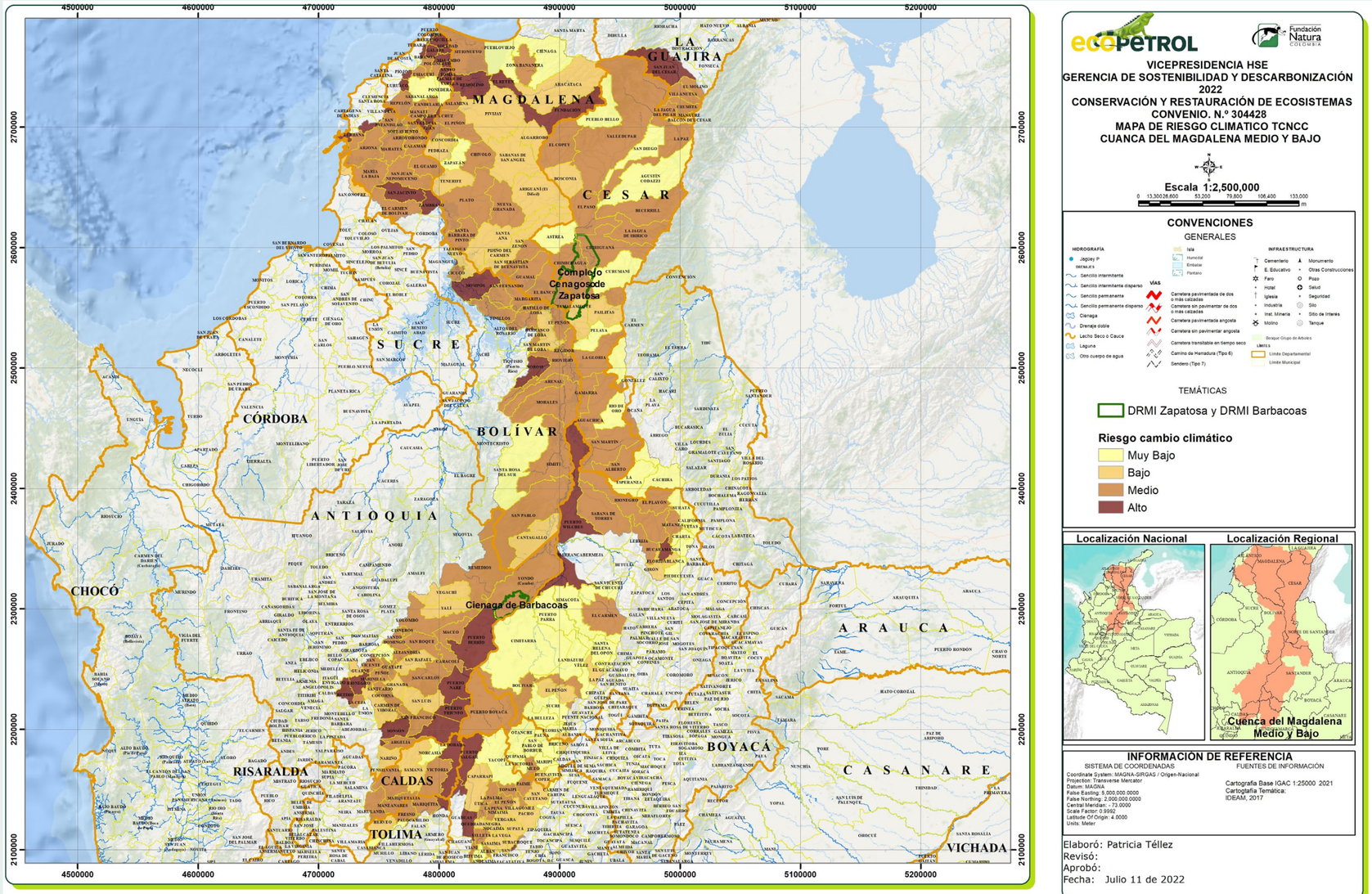


Figura 8. Mapa de riesgo municipal frente al cambio climático para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Para los humedales de la cuenca se propone el uso del portafolio realizado por el Programa Nasca, implementado por The Nature Conservancy (TNC) y Cormagdalena, que propone, desde la conservación, los escenarios importantes para el sostenimiento de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos y que han estado o están en constante proceso de transformación debido a las presiones antrópicas que sobre estos se ejercen. Los métodos utilizados para el diseño del portafolio fueron adaptados de los procedimientos generados por Higgins (2005), Thieme et al. (2007) y Sowa et al. (2007). En ellos se emplean herramientas de SIG y sensoramiento remoto para establecer una red de subcuencas clasificadas como tipos de hábitats acuáticos; para luego, con base en esto, seleccionar y priorizar las más representativas y las de mejor integridad ecológica para la conservación y el manejo de la biodiversidad de los ecosistemas y los procesos ecológicos de agua dulce (TNC y Cormagdalena, 2011). En la Tabla 9 se presenta el detalle de la unidad ecológica de drenaje para el área del Magdalena Medio y Bajo con la clasificación y puntuación de los ecosistemas acuáticos lóticos y lénticos evaluados, y se resaltan los ecosistemas con clasificación alta de conservación según el portafolio.

De acuerdo con los resultados, la mayoría de los sistemas priorizados se encuentran con grado de amenaza alto y muy alto; por consiguiente, se evidencia su riesgo de pérdida, dado su acelerado deterioro, el cual se incrementa si no se adelantan acciones concretas de manejo y mitigación de amenazas a corto plazo. El Portafolio de Agua Dulce fue diseñado para ser utilizado como una herramienta de planificación de sitios estratégicos para la conservación y el manejo de la biodiversidad, y debe entenderse como una primera aproximación que, en lo posible, es necesario precisar con nueva información de campo (TNC y Cormagdalena, 2011).

Identificador del sistema ecológico (SINOR_ID)	Código del sitio prioritario (New_ codz_1)	Nombre del sitio prioritario	Municipio	Departamento	Área del sitio prioritario en el sistema ecológico	Área total de prioridades a corto plazo (Km²)
424	73	Cuencas de las Ciénagas Catalina, Marquetera, Zarate	Plato	Magdalena	579	
5147	35	Cuenca de la Ciénaga Ancón	Talaigua Nuevo	Bolivar	338	
460	28	Cuenca Bajo Río Cesar (Ciénaga de Zapatosa)	Agustín Codazzi	Cesar	1347	
1773	24	Cuenca de la Ciénaga de Barbacoas y Ciénaga Grande	Yondó	Antioquia	267	
621	2	Ciénagas del Bajo Río Cauca	Magangué	Bolivar	1	
621	3	Valle del Cauca entre Córdoba y Pto Antioquia (Antioquia)	Magangué	Bolivar	1554	
621	4	Valle del Cauca entre Cali y La Virginia	Magangué	Bolivar	2929	
621	1	Valle del Bajo Río Cauca (humedales Bajo Nechí, ciénagas del Bajo Cauca)	Magangué	Bolivar	4891	
5099	33	Cuenca Bajo Río San Jorge (complejo de ciénagas de la Mojana)	Magangué	Bolivar	1557	
1733	79	Cuenca de la quebrada Vizcaína (sistema río Opón)	Barrancabermeja	Santander	208	
390	67	Cuenca del arroyo Limón (Humedales margen derecha del río Magdalena)	Tenerife	Magdalena	150	26,34
3802	49	Cuenca del río Palo	Villa Rica	Cauca	927	
105	71	Cuenca de la Ciénaga Grande de Santa Marta	Ciénaga	Magdalena	1116	
2909	74	Nacimiento del río La Vieja	Pereira	Quindío	886	
3047	64	Cuenca del río Tunjuelo	Bogotá D. C.	Cundinamarca	523	
3910	51	Cuenca del río Ovejas	Caloto	Cauca	967	
677	34	Cuenca de la Ciénaga del Pimiento	Magangué	Bolivar	597	
108	69	Cuenca de los caños Clarín y Salado	Sitionuevo	Magdalena	205	
2459	43	Cuenca del río Ubaté	Chiquinquirá	Boyacá	1039	
104	70	Cuenca de las ciénagas de Zaragozal, Pajaral, Buenavista, Mendegua, Alfandoque	Sitionuevo	Magdalena	784	
709	56	Cuenca Arroyo Hondo (Zapatosa)	Chimichagua	Cesar	707	

Identificador del sistema ecológico (SINOR_ID)	Código del sitio prioritario (New_ codz_1)	Nombre del sitio prioritario	Municipio	Departamento	Área del sitio prioritario en el sistema ecológico	Área total de prioridades a corto plazo (Km²)
1553	14	Quebrada La Trinidad: cabeceras del río Nechi	Anorí	Antioquia	182	26,34
5114	38	Cuenca de la Ciénaga de Limones	San Fernando	Bolivar	217	
231	26	Cuenca del Canal del Dique (sistema cenagoso del canal)	Cartagena	Atlántico	1169	
2142	22	Cabecera del río Claro	Puerto Nare	Antioquia	800	
1948	21	Cuenca del río Nare	Puerto Berrío	Antioquia	1639	
2988	75	Nacimiento del río Quindío	Pereira	Quindío	768	

Etapa 3. Proyectos de línea base manejo sostenible y conservación de la biodiversidad acuática en la zona hidrográfica Magdalena-Cauca

Para la macrocuenca se propone usar los resultados del proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive, desarrollado por la Fundación Natura Colombia entre 2017 y 2021. Estos contienen información de línea base para diferentes zonas de la macrocuenca: zonas altas (páramos y bosques altoandinos en el Eje Cafetero), zonas medias (como río Claro), zonas del Bajo Cauca (Ayapel con sus humedales), Magdalena Medio (ciénagas de Barbacoas, Chiqueros y Corrales y el Ocho), y el Bajo Magdalena (bosque seco tropical y los complejos cenagosos, como el de Zapatosa). En el marco del proyecto, se destacan las siguientes acciones, que representan resultados relevantes para la escogencia de las ventanas de monitoreo en la cuenca:

- Creación de nuevas áreas protegidas, como el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Complejo Cenagoso Zapatosa, el DRMI Ciénaga de Barbacoas, el DRMI Ciénaga de Chiqueros, entre otros, para las cuales se diseñaron e implementaron los respectivos planes de manejo.
- Estudio de modelación ecohidrológica en la ciénaga de Zapatosa, proceso que ha permitido levantar una línea base con información biofísica, biótica, social y de funcionamiento de la ciénaga.
- Estudio piloto de monitoreo del estado de salud de la ciénaga de Zapatosa, en el cual se evaluaron 18 indicadores biológicos que se identificaron y diseñaron para este fin. Esta información sirve para determinar los criterios definitivos y/o para la conformación de la línea base requerida para el sitio piloto.

Los ecosistemas de humedal más monitoreados por la Fundación Natura son las ciénagas de Zapatosa y Barbacoas; producto de esto, existe suficiente información de base para establecer los lineamientos de monitoreo y seguimiento necesarios para la selección de la ventana piloto de monitoreo del proyecto.

Diseño estadístico para el monitoreo

Para definir el diseño estadístico que busca estimar el contenido de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo se siguieron los lineamientos del SEN, que generan información robusta para alimentar las estadísticas oficiales.

Tipos de muestreo propuestos para el diseño

Muestreo aleatorio simple

Es un método de selección de n unidades de una población de tamaño N, de modo que cada una de las muestras posibles tenga la misma oportunidad de ser elegida. Para aplicar este método se enumeran las unidades de la población de 1 a N y, posteriormente, se extrae una serie de n números aleatorios entre 1 y N. Lo anterior se puede realizar usando una tabla de números aleatorios. Así, se obtienen las unidades cuya numeración coincide con la serie de números seleccionados, las cuales conforman la muestra aleatoria.

Muestreo estratificado

Se usa principalmente cuando la característica en estudio no presenta distribución aleatoria sobre las unidades muestrales. Los estratos (subconjuntos de unidades muestrales) deben tomarse de manera que los valores de la variable sean más homogéneos dentro de los mismos estratos que entre ellos. Por ejemplo, para una variable dentro de una cobertura se espera que tenga valores más homogéneos (presenta menor varianza) que entre diferentes coberturas.

El método consiste en extraer una muestra aleatoria dentro de cada estrato y luego combinar la información proveniente de los distintos estratos, ponderada por el tamaño de los estratos considerados en el diseño.

Ventana de muestreo

Dentro de los humedales para la cuenca del Magdalena Medio y Bajo se destacan, por extensión de mayor a menor, el Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ), el Complejo Cenagoso de Zarate Malibú y Veladero y la Ciénaga de Barbacoas (Tabla 4). A partir de la variabilidad entre los humedales identificados, el diseño estadístico se centró en la eficiencia (en términos de costo y de tiempo) y precisión, en relación con la estimación de los parámetros. Lo anterior permitió cubrir toda la diversidad de hábitats presentes en los sitios de muestreo (variabilidad espacial), con el fin de capturar la mayor parte de la diversidad biológica.

Con el objetivo de seleccionar las unidades de muestreo que pueden generar información para la estimación de los contenidos de carbono y biodiversidad mediante el monitoreo de variables definidas en cada compartimiento de la propuesta del Protocolo, se realizó un diseño de muestreo aleatorio estratificado.

Para eso, se usaron como factor de estratificación los resultados obtenidos del análisis de información geográfica para la identificación de zonas de muestreo (ZM), a partir de información geográfica de los suelos y de coberturas de la tierra (información de fuentes oficiales disponibles en el momento de la selección), las cuales fueron homologadas a clases propuestas por el IPCC para los futuros reportes. Se propone este diseño, pues se espera que haya una respuesta más homogénea (es decir, menor varianza) para una variable dentro de una cobertura (uso de suelo), que entre diferentes coberturas. Lo mismo aplica para los tipos de suelo.

Propuesta de diseño para la cuantificación del carbono en humedales

Definir los límites del área de interés

Para delimitar el área de interés se propone usar la definición operativa de humedales. Esta corresponde a un área ocupada por cuerpos de agua naturales lénticos interiores (dulceacuícolas) conectados total o parcialmente, con algún afluente, y ubicada entre los 0 y 2800 m s. n. m. con una extensión de área total de inundación mínima de 25 ha, ocupada por vegetación hidrófita y con periodos de inundación anual de mínimo 90 días continuos.

Estratificar el área de interés

Se propone estimar el carbono acumulado en humedales por medio de un diseño de muestreo estratificado, en el cual se usen como factor de estratificación las coberturas identificadas previamente en el área de interés. El primer paso es recopilar la información existente para el área sobre los componentes del ecosistema, enfocada en las unidades que más podrían actuar como sumideros de carbono. Adicional al componente de vegetación, se debe identificar si otras variables, por ejemplo, las unidades cartográficas de suelo, presentan alta variabilidad en el área de interés. De ser así, se propone seleccionar los estratos a partir de información geográfica de coberturas de la tierra, en conjunto con el análisis de la geomorfología, la hidrología, la vegetación acuática y los suelos.

Seleccionar los depósitos a incluir en el diseño estadístico

Dado que el objetivo de esta propuesta de Protocolo es estimar las existencias de carbono en compartimientos seleccionados (biomasa, MOM, suelos y biodiversidad), se utiliza la metodología planteada por la CMNUCC (2010). En ella se estima el número de parcelas de muestreo necesarias con base en la precisión que se defina para el muestreo y la variabilidad de las existencias de carbono. Esta variabilidad se expresa como la desviación estándar de las existencias de carbono en el estrato (CMNUCC, 2010), definido este como la combinación de uso y tipo de suelo. El valor aproximado de la desviación estándar de las existencias de carbono en cada estrato en el momento de la estimación se conoce a partir de los datos existentes aplicables al área del proyecto o de los datos existentes relacionados con un área similar, o se estima sobre la base de una muestra preliminar o de un juicio experto. Para la determinación de las ZM se contemplaron los siguientes pasos:

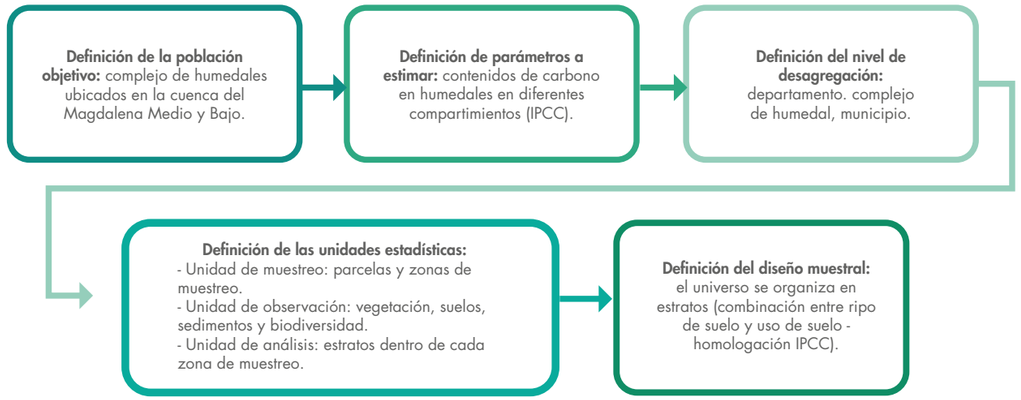


Figura 9. Esquema para determinar las zonas de muestreo en humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Definición del tamaño de parcelas y puntos de muestreo

Para calcular el número de parcelas (n) es necesario conocer los siguientes aspectos: (i) el error deseado en porcentaje (E); (ii) el número de parcelas totales que se podrían establecer en el área de interés (N) (por ejemplo, área de cada estrato o área del proyecto); (iii) la varianza (S^2) o el coeficiente de variación en porcentaje (CV) asociado con la variable de interés (en este caso, la biomasa o carbono almacenado en los diferentes compartimientos); y (iv) el valor t de student para una probabilidad dada (α= 0,05). Cuando se involucran diferentes estratos (H), para el cálculo del tamaño de muestra se debe tener en cuenta la importancia relativa o proporción (Pj) ocupada por cada uno de ellos.

Se debe calcular el número de parcelas de muestreo mínimo requerido para asegurar la representatividad de la variabilidad en la ventana de validación mediante la Ecuación 1 (UNFCCC, 2010):

Ecuación 1. Cálculo del número de parcelas de muestreo.

$$n = \left(\frac{t}{\varepsilon}\right)^2 \times \left(\sum_i W_i \times S_i\right)^2$$

Donde:

n: número de parcelas de muestreo necesarias para la estimación de existencias de carbono dentro de los límites del proyecto; sin dimensiones.

t: valor t de Student bilateral en infinitos grados de libertad para el nivel de confianza requerido; sin dimensiones.

ε: margen de error aceptable en la estimación de las existencias de carbono dentro de los límites del proyecto; t d.m. (o t d.m. ha^{-1}) unidades utilizadas para S_i. Estimado con datos del promedio de reserva de carbono en humedales × 0,1 (10 % precisión deseada).

W_i: peso relativo del área del estrato i (es decir, el área del estrato i dividida por el área del proyecto); sin dimensiones.

S_i: desviación estándar estimada del stock de carbono en el estrato i; t d.m. (o t d.m. ha^{-1}).

i: 1, 2, 3, … estratos de estimación de existencias de carbono dentro de los límites del proyecto.

Generación del inventario cartográfico para el muestreo

El diseño metodológico propuesto para realizar inventarios cartográficos de humedales comprende cinco fases: (i) definición de la escala de trabajo; (ii) búsqueda de la información geográfica; (iii) descarga de información en diferentes formatos; (iv) geoprocesamiento de los datos adquiridos para la ventana de interés; y (v) organización de la información geográfica en una geodatabase (GDB) en un repositorio en la nube destinado para tal fin, con especial interés en la ventana piloto de validación de la propuesta de Protocolo.

Definición de la escala

Debido a que la mayoría de los insumos cartográficos disponibles para el país se generan a escala nacional, para el caso de esta propuesta de Protocolo se propone tener en cuenta aquellos mapas elaborados tanto a escala nacional como a escala regional y local.

Siempre es necesario establecer la relación entre la escala cartográfica y los insumos disponibles para tener claridad sobre el nivel de detalle que se quiere obtener con las representaciones cartográficas. En este caso, ellas corresponden a aquellas capas geográficas que representan datos de diferentes variables para el análisis espacial de la matriz agua y biodiversidad de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Tabla 10. Categorías de escalas y su respectivo nivel de detalle cartográfico (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2018).

Categoría	Detalle cartográfico
Escala pequeña	Mayor a 1:100 000
Escala mediana	1:5000 hasta 1:100 000
Escala grande	Menor a 1:5000

Búsqueda de información geográfica

La búsqueda se realiza filtrando los datos de acuerdo con criterios de temática, entidad territorial, escala, palabras clave, entre otros. Dichos criterios dependen de cada plataforma consultada, dado que estas son creadas sobre diferentes tipos de catálogos. A continuación, se presentan las temáticas principales de la información disponible para descargar, relacionada con humedales en el territorio nacional.

Por otro lado, en caso de que existan capas geográficas que no hayan sido oficializadas, sino generadas al interior de una institución, se debe hacer la solicitud oficial de la información para complementar el conjunto de datos geográficos con que se quiera contar en el repositorio.

Tabla 11. Listado de entidades y plataformas web en las que se realiza la búsqueda de información geográfica relacionada con humedales en Colombia.

Entidad	Plataforma	Temáticas
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC): http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas	• Agua • Biodiversidad • Cambio climático • Suelo
Instituto Geográfico Agustín Codazzi	Colombia en mapas: https://www.colombiaenmapas.gov.co/#	• Cartografía básica • Agrología • Ambiente y desarrollo sostenible
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	Información geográfica de datos abiertos del IDEAM - Capas GEO: http://www.ideam.gov.co/capas-geo	• Monitoreo y seguimiento de suelos y tierras • Monitoreo y seguimiento de los ecosistemas • Monitoreo, evaluación y modelamiento del recurso hídrico • Seguimiento y caracterización del clima • Unidades de análisis y referencia
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt	GeoNetwork I2D: http://geonetwork.humboldt.org.co/	• Aguas interiores • Cobertura de la tierra con mapas básicos e imágenes • Información geocientífica • Medio ambiente

Fuente: elaboración propia (2024).

Descarga de información geográfica

Para el caso de una ventana piloto de implementación de ecosistemas de humedal, se recomienda descargar las capas geográficas en formato *shapefile* y geodatabase para datos vectoriales, y archivos TIFF para datos ráster. Estos datos, a nivel de inventario cartográfico, se pueden organizar en ocho temáticas principales:

- **Biodiversidad:** datos geográficos de los registros de especies distribuidas en la ventana piloto.
- **Cartografía base:** entidades geográficas que representan las superficies de agua de la ventana piloto, así como modelos digitales de elevación.
- **Clima:** datos de variables climatológicas, principalmente temperatura y precipitación.
- **Coberturas de la tierra:** información geográfica que describe, caracteriza, clasifica y compara las características principales de cada tipo de cobertura de la tierra.
- **Ecosistemas:** cartografía que representa la distribución y diferenciación de las unidades de ecosistemas de humedal.
- **Gases de Efecto Invernadero:** datos geográficos de absorciones y emisiones de GEI.
- **Hidrología:** representación cartográfica de variables hidrológicas.
- **Suelos:** información cartográfica de unidades de suelos y de procesos de degradación de los suelos.

Al finalizar el proceso de descarga de las capas geográficas, se hace el geoprocesamiento de los datos con el objetivo de contar con la información que corresponda solo al área de interés o ventana piloto priorizada.

Consideraciones para generar el inventario cartográfico

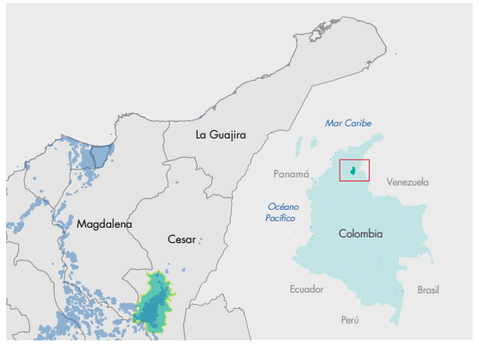
En cuanto a los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad, existen muchos vacíos de información a nivel nacional y regional. Si bien se han identificado diferentes estrategias de monitoreo en las áreas hidrográficas del país que están siendo lideradas por entidades del Estado y/o académicas, a la fecha no hay una política de monitoreo de los ecosistemas de Colombia que ofrezca lineamientos claros ni que proponga una hoja de ruta para la generación de inventarios cartográficos como apoyo a las estimaciones de carbono.

Por lo anterior, se identifica la necesidad de contar con más información y a escalas mayores. Para lograrlo, se debe continuar con el trabajo interinstitucional que recopile más datos e insumos cartográficos generados por institutos y organizaciones ambientales tales como el MADS, el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), Parques Nacionales Naturales, el IAvH, el IDEAM, el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), entre otras, así como las CAR.

Sin embargo, los datos geográficos con cubrimiento nacional tienen un bajo nivel de actualización, debido principalmente a la falta de recursos de los institutos de investigación que generan la cartografía de Colombia y por la carencia de equipos de *hardware* con capacidad para ejecutar procesos a partir de datos que ocupan gran espacio de almacenamiento. Este aspecto es clave para el análisis de variables de humedales, pues en caso de no contar con información periódica, la propuesta metodológica desde el componente SIG debe ser ajustada de acuerdo con la temporalidad de los insumos cartográficos.

Por otro lado, respecto a la información geográfica, los recursos a los que se accede mediante plataformas web presentan problemas por tratarse de geovisores o servidores en los que no está organizada la información de forma que el usuario pueda encontrar fácilmente las opciones para las consultas.

Finalmente, se evidencia que las entidades productoras de información geográfica realizan sus procesos de forma aislada, lo cual genera análisis sesgados en la mayoría de los casos, sin que exista interoperabilidad de los datos. Por el momento, la plataforma que recopila la mayor cantidad de información es la de Colombia en Mapas del IGAC.



Delimitación e investigación de zonas de muestreo

Este proceso se realiza a partir de datos geográficos de los suelos (IGAC, 2014) y de coberturas de la tierra (IDEAM, 2021), dado que el objetivo de la delimitación de las ZM es identificar, cuantificar y visualizar aquellas áreas con características edáficas y de usos similares (IGAC y IAvH, 2018).

Tomando en cuenta las necesidades particulares de la propuesta de Protocolo para cuantificar contenidos de carbono, en este caso las dos capas geográficas se homologaron para contar con las unidades espaciales necesarias antes de la generación de la capa de ZM.

Homologación de las unidades cartográficas de suelos de la capa de geopedología a escala 1:100 000 (IGAC, 2014)

A partir de las Unidades Cartográficas de Suelos (UCS) se identificaron aquellas de relevancia para el proceso y se homologaron de acuerdo con la clasificación definida en IPCC (2006) (Tabla 12).

Tabla 12. Ejemplo de homologación de la información geográfica de suelos a clases IPCC.

Código IPCC	Clasificación IPCC	USC (Mapa IGAC, 2014)
HAC	Arcillas de alta actividad	Typic Haplusterts
LAC	Arcillas de baja actividad	Typic Plinthustults
AR	Arenales	Typic Haplustepts
HM	Humedales	Typic Endoaquerts
OM	Otros suelos minerales	Oxic Dystrudepts

Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez se obtuvo la capa de suelos homologada (ejercicio que debe ser realizado por un profesional experto en suelos), los polígonos representados según las clases IPCC fueron objeto de un geoprocesamiento conjunto con la capa de coberturas.

Homologación de las clases de coberturas de capa de coberturas de la tierra a escala 1:100 000 (IDEAM, 2021)

La capa geográfica de coberturas de la tierra del período 2018 a escala 1:100 000 cuenta con los niveles 3, 4, 5 y 6 de la leyenda CLC (Corine Land Cover) para Colombia (IDEAM, 2010); sin embargo, dependiendo de la extracción de los datos para determinadas áreas del país, la disponibilidad de los polígonos clasificados para estos niveles puede variar. En este sentido, se debe tener en cuenta que la clasificación mencionada no corresponde a la definida por el IPCC (2006), por lo cual es necesario llevar a cabo una homologación para agrupar las clases de coberturas (Tabla 13), excluyendo las coberturas de bosques que son analizadas y reportadas por el SMByC del IDEAM, con el fin de evitar doble cuantificación. Sin embargo, se contempla la categoría "tierras forestales" (F) para incluir los bosques inundables (BI) aledaños a los humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Delimitación e identificación de Zonas Homogéneas de Muestreo (ZHM)

Una vez están disponibles las capas homologadas de suelos y coberturas de acuerdo con lo descrito anteriormente, se procede a la unión de las capas resultantes:

- Capa de suelos homologada según las clases del IPCC.
- Capa de coberturas de la tierra homologada según las clases del IPCC.

Para este proceso se recomienda hacer uso de la herramienta "Unión" mediante la cual se crea una nueva capa geográfica a partir de la superposición de dos capas de entrada. La capa de salida contiene los polígonos y atributos combinados de ambas coberturas, que en este caso son los correspondientes a los atributos de suelos de la capa de geopedología (IGAC, 2014) y a los atributos de coberturas de la capa de coberturas de la tierra, periodo 2018 (IDEAM, 2021). Una vez se tenga la capa con la unión de los suelos y las coberturas, se procede a codificar y clasificar las combinaciones resultantes; es así como se tiene que la primera parte de esta clasificación corresponde al atributo de suelos y la segunda al atributo de uso. Finalmente, se realiza el cálculo de áreas en unidad de hectáreas (ha) para darle la información al equipo de trabajo.

Tabla 13. Ejemplo de homologación de la información de cobertura y usos de la tierra a clases definidas por el IPCC.

Código Cobertura IPCC	Categorías de uso de la tierra para el sector AFOLU adaptadas a humedales	Nivel 3 CLC (Corine Land Cover)
S	Asentamientos	1.1.1. Tejido urbano continuo
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo
		1.3.1. Zonas de extracción minera
C	Tierras de cultivo	2.4.1. Mosaico de cultivos
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
Hz	Herbazales	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
		3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
OVL	Otra vegetación leñosa	3.2.2.2. Arbustal abierto
		3.2.3.1. Vegetación secundaria alta
		3.2.3.2. Vegetación secundaria baja
O	Otras tierras	3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
W	Humedales	4.1.1. Zonas pantanosas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
G	Pastizales	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
F	Tierras forestales	3.1.2.1.2 Bosque abierto alto inundable
		3.1.4. Bosque de galería y ripario
		3.1.5. Plantación forestal

Selección de zonas de muestreo

Zonas de muestreo para suelos y vegetación

De acuerdo con las necesidades del proyecto, se definió como el universo de trabajo la totalidad de las ZM (se excluyeron aquellas cuyo suelo o cobertura estuvieran asociadas a zonas urbanas, asentamientos o infraestructuras) y, posteriormente, se seleccionaron todos los polígonos con el área más grande que representara la unidad (Tabla 14). Es importante resaltar que las unidades elegidas corresponden a suelos y coberturas terrestres. Cabe aclarar que las categorías Hz y OVL se definieron desde el protocolo de alta montaña; además, algunas coberturas no se tomaron en cuenta para la generación de las ZM por no hacer parte del objetivo principal del proyecto —la estimación de carbono y de datos de actividad de humedales naturales continentales—, por lo cual se les ha asignado la clase 'no aplica' (NA). No obstante, en las salidas cartográficas estas coberturas se deben mantener tanto en la simbología como en la leyenda, para conocer su distribución en los humedales piloto seleccionados.

Zonas de muestreo para biodiversidad

El compartimiento de biodiversidad para los humedales se relacionó especialmente con fauna vertebrada e hidrobiota.

La priorización de la ZM se llevó a cabo a partir de la selección de las zonas asociadas a suelos y/o coberturas acuáticas (para la hidrobiota), y de otras zonas para coberturas de transición. A partir de dichas zonas, se ubicaron algunas de interés para el experto temático y, con base en esto, se perfiló una ZM a manera de área de interés, donde se establecieron los sectores de muestreo.

Para la caracterización de los grupos biológicos de aves, anfibios, reptiles y mamíferos, el muestreo se realizó considerando como factor la cobertura de la tierra homologada bajo la metodología IPCC y, mediante la herramienta SIG, se identificaron los polígonos en el área de estudio (tipos vegetación de tipo leñosa (OVL), áreas forestales (F), pastizales (G), áreas de cultivo (C), herbazales (Hz) y humedales o áreas del espejo de agua y playones (W)). Para cada cobertura se seleccionaron de forma aleatoria 3 polígonos y en cada polígono se realizaron transectos de observación.

Teniendo en cuenta la diversidad de hábitats según el mapa de coberturas de la tierra (IDEAM, 2021), la representatividad del análisis, la viabilidad operativa para el monitoreo posterior y la articulación con los demás compartimientos y componentes del proyecto, es importante considerar los aspectos presentados en la Figura 10 para caracterizar la biodiversidad en las ZM.

Tabla 14. Ejemplo de homologación de la información de cobertura y usos de la tierra a clases definidas por el IPCC.

Código suelo IPCC	Suelos IPCC	Uso del suelo IPCC	Código uso del suelo IPCC	Zona de muestreo
HAC	Arcillas de alta actividad	Cultivos	C	HAC-C
		Forestal	F	HAC-F
		Pastos	G	HAC-G
		Herbazales	Hz	HAC-Hz
		Otra vegetación leñosa	OVL	HAC-OVL
		Humedal	W	HAC-W
LAC	Arcillas de baja actividad	Pastos	G	LAC-G
AR	Arenales	Cultivos	C	AR-C
		Forestal	F	AR-F
		Pastos	G	AR-G
		Herbazales	Hz	AR-Hz
		Otra vegetación leñosa	OVL	AR-OVL
		Humedal	W	AR-W
HM	Humedales	Cultivos	C	HM-C
		Forestal	F	HM-F
		Pastos	G	HM-G
		Otra vegetación leñosa	OVL	HM-OVL
		Humedal	W	HM-W
OM	Otros suelos Minerales	Cultivos	C	OM-C
		Forestal	F	OM-F
		Pastos	G	OM-G
		Herbazales	Hz	OM-Hz
		Otra vegetación leñosa	OVL	OM-OVL
		Humedal	W	OM-W

Fuente: elaboración propia (2024).

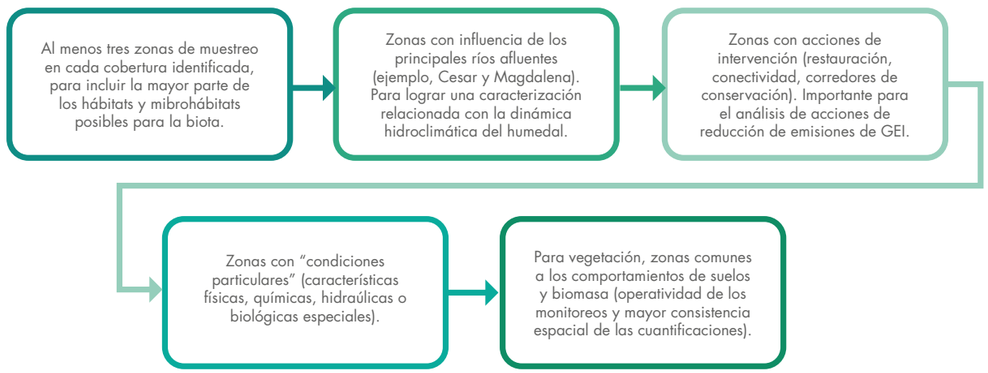


Figura 10. Esquema de selección de las ZM del compartimiento de biodiversidad. Fuente: elaboración propia (2024).

Identificación de los periodos hidrometeorológicos para definir la estacionalidad del monitoreo

La metodología propuesta consta de diferentes procesos (Figura 11), a partir de los cuales se establece la descripción de los métodos para dar cumplimiento a cada uno.

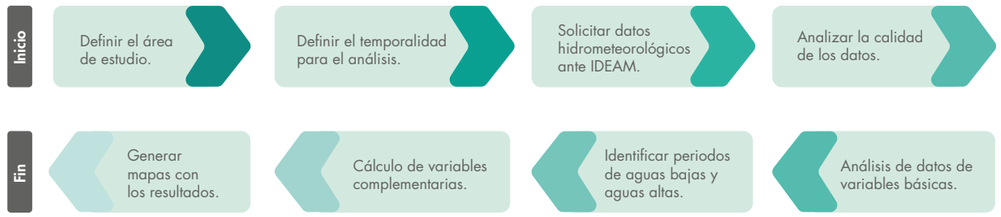


Figura 11. Procesos metodológicos para la identificación de períodos hidrometeorológicos de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Definición de la temporalidad para el análisis de datos

Se deben utilizar datos diarios de estaciones meteorológicas localizadas dentro y alrededor de la ventana de implementación, con un radio aproximado de 50 km, medidos a partir del límite externo del área de interés.

En el *Reglamento Técnico* de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2021), se establecen las normales, definidas como "las medias periódicas calculadas para un período uniforme y relativamente largo que comprenda por lo menos tres períodos consecutivos de 10 años" (p. 3); en caso de contar con datos más recientes, se ajusta el intervalo de tiempo de análisis.

En cuanto a las variables derivadas y las variables relacionadas con el suelo y uso del suelo, se requiere de insumos secundarios, como imágenes de satélite y cartografía temática (mapa de suelos y cobertura vegetal), y datos correspondientes a las propiedades físicas de estos.

Solicitud de datos hidrometeorológicos

En Colombia, la solicitud de datos hidrometeorológicos se hace ante el IDEAM, por ser la entidad nacional cuya misión contempla la toma y el análisis de datos de variables hidrometeorológicas. De acuerdo con lo descrito en el portal del IDEAM (http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion), hay tres modalidades para solicitar información (IDEAM, 2023):

- Ingresar a la plataforma del sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología (DHIME) (IDEAM, 2023) con el vínculo http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/.
- Crear usuario y contraseña en el portal de PQRS del IDEAM (http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/pqrs) y radicar la solicitud de datos hidrometeorológicos diligenciando el formulario que se encuentra en el enlace. Una vez el IDEAM tiene la respuesta a la solicitud, se envían los datos al correo electrónico diligenciado.
- Para conocer la distribución de las estaciones hay que descargar el shapefile del catálogo nacional de estaciones (CNE) y realizar la extracción de datos del área de interés. Otra opción es enviar un correo electrónico a ciudadano@ideam.gov.co, en el que se indiquen las estaciones de la ventana piloto, las variables y la temporalidad.

Se recomienda solicitar datos que cuenten con un análisis previo de aseguramiento, que incluye control de calidad, homogeneización y complementación de faltantes en las series de tiempo. Con esto se evita utilizar otros métodos no oficiales que puedan generar sesgo en las tendencias climáticas.

Procesamiento de datos de variables meteorológicas básicas

- Selección de estaciones de acuerdo con su localización: inicialmente se eligen las estaciones convencionales con datos diarios de cada una de las variables, y que estén reportadas en el catálogo nacional de estaciones del IDEAM, el cual se descarga de la plataforma DHIME (IDEAM, 2023).
- Selección de series de datos diarios de acuerdo con su longitud en años: se recomiendan, en lo posible, solo las series completas; es decir, con longitud de 30 años o al menos con un rango de tiempo mayor o igual a 20 años.

Luego, se calculan las medias mensuales multianuales y se generan mapas de superficies en formato ráster. A continuación, se describen los detalles para algunas variables.

Cálculo de medias mensuales multianuales

Para calcular la precipitación media mensual multianual se debe estimar inicialmente la precipitación mensual acumulada para cada año. En el caso de variables como temperatura media mensual multianual, humedad relativa media mensual multianual, brillo solar, radiación solar y velocidad del viento media mensual multianual, se calculan inicialmente los valores medios mensuales para cada variable y cada año, respectivamente.

En cualquier caso, se sugiere tener en cuenta como criterio principal que, al menos para cada mes, se cuente con datos de mínimo 20 días. Si no hay series aseguradas completas, se calcula la media de la precipitación mensual multianual con el valor de temperatura mensual para cada año de la serie temporal.

Generación de mapas de superficies en formato ráster

La generación de los mapas de superficie consiste en espacializar los datos mensuales multianuales; este proceso consta de tres pasos:

- Generar un archivo digital de puntos (shapefile) con los valores mensuales multianuales estimados y que estén asociados a cada estación, mediante el uso de herramientas de SIG. Para ello se debe contar con un archivo que contenga una matriz con la lista de estaciones identificadas con su código y los valores mensuales multianuales en formato de texto u otro compatible, por ejemplo, formato delimitado por comas (.csv).
- A partir de la capa generada en el paso anterior, se realiza la interpolación de los valores mensuales multianuales para cada variable, cada mes y cada valor anual. La selección del método de interpolación depende de la naturaleza de los datos y se deja a criterio del analista, teniendo en cuenta su conocimiento de la región y cuidando que la superficie resultante represente con la menor incertidumbre las condiciones propias de la zona.
- La superficie de la interpolación se exporta a ráster, mediante la selección del tamaño del pixel requerido. La superficie debe estar en coordenadas planas y se debe seleccionar la extensión del área de estudio para disminuir tiempo en el procesamiento.

Procesamiento de datos de variables meteorológicas derivadas

Estimación de la variable meteorológica de presión de vapor

Para la evaluación hidrometeorológica de una región, comúnmente se usan dos variables relacionadas con la presión de vapor: la presión media de vapor de saturación y la presión real de vapor. Esta última no es posible medirla de manera directa; por lo tanto, generalmente se deriva de la humedad relativa o de la temperatura del punto de rocío (FAO, 2006).

Presión media de vapor de saturación (e_s)

La presión de saturación de vapor se calcula en función de la temperatura del aire (FAO, 2006), pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa así:

Ecuación 2. Cálculo de la presión de saturación de vapor.

$$e^0(T) = 0{,}6108 * exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right]$$

Donde:
$e^0(t)$: presión de vapor de saturación (kPa) a la temperatura del aire (T)
T: temperatura del aire (°C)
Exp [...]: base de logaritmo natural (2,7183), elevado a la potencia […]

La presión media de saturación de vapor (Ecuación 3) para un día, una semana, una década o un mes, se calcula como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese periodo (FAO, 2006).

Ecuación 3. Cálculo de la presión media de saturación de vapor.

$$e_s = \frac{e^0\,(Tmax) - e^o(Tmin)}{2}$$

Donde:
$e^0(Tmax)$: presión de vapor de saturación (kPa) a la temperatura máxima del aire (Tmax)
$e^0(Tmin)$: presión de vapor de saturación (kPa) a la temperatura mínima del aire (Tmax)

Presión real de vapor (e_a)

Relaciona la presión real de vapor en función de la humedad relativa media y la temperatura media del aire (Ecuación 4).

Ecuación 4. Cálculo de la presión real.

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} * e^0(T_{media})$$

Donde:
e_a: presión real de vapor (kPa)
HR_{media}: 1 humedad relativa del aire (%)
e^0 (T_{media}): presión de vapor de saturación a la temperatura media del aire (kPa)

Estimación de la variable meteorológica de radiación solar (Rs)

Cuando no se cuenta con mediciones directas de radiación solar (Rs), esta se calcula a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom (Ecuación 5) que la relaciona con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación, conocida como brillo solar (FAO, 2006).

Ecuación 5. Cálculo de la radiación solar. Fórmula modificada de Ángstrom-Prescott.

$$R_s = \left(a_s + b_s\,\frac{n}{N}\right) R_a$$

Donde:
R_s: radiación solar o de onda corta en (MJ m^{-2} dia^{-1})
n: duración real de la insolación (brillo solar) diaria, en horas
N: duración máxima posible de la insolación (brillo solar) diaria, en horas
$\frac{n}{N}$: duración relativa de la insolación (brillo solar) (-)
R_a: radiación extraterrestre (MJ m^{-2} dia^{-1})
a_s: constante de regresión, que expresa la fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días nublados (n = 0)
$a_s + b_s$: fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n = N)

En casos en que no se disponga de datos reales de radiación solar, y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de $a_s = 0{,}25$ y $b_s = 0{,}50$.

Ecuación 6. Cálculo de la radiación extraterrestre (FAO, 2006).

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} Gsc * d_r[Ws * sen\,(\varphi) sen(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\,sen(Ws)]$$

Donde:
Gsc: constante solar igual a 0,0820 MJ m^{-2} min^{-1}
ϕ: latitud (rad) de la localización de la estación
δ: declinación solar (rad, Ecuación 7)
Ws: ángulo solar del zenit (rad, Ecuación 8)
dr: distancia inversa relativa de la tierra al sol (Ecuación 9)

Ecuación 7. Cálculo de la declinación solar.

$$\delta = 0{,}409 * \text{sen}\left[\frac{2\pi}{365}\,J - 1{,}39\right]$$

Donde:
J: día juliano del año (enero 1= 1 y diciembre 31 = 365)

Ecuación 8. Cálculo del ángulo solar del zenit.

$$Ws = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$

Ecuación 9. Cálculo de la distancia inversa entre el sol y la tierra.

$$dr = 1 + 0{,}033 \cos\left[\frac{2\pi}{365} J\right]$$

Donde:
J: día juliano del año (enero 1= 1 y diciembre 31 =365)

En algunos análisis hidrometeorológicos es importante contar con información de la radiación neta, la cual es el resultado de la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la de onda larga (R_{nl}) (Ecuación 10).

Ecuación 10. Cálculo de la radiación neta.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

La radiación neta de onda corta resulta del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada (Ecuación 11).

Ecuación 11. Cálculo de la radiación neta de onda corta.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s$$

Donde:
R_{ns}: radiación neta de onda corta (MJ m^{-2} dia^{-1})
α: albedo o coeficiente de reflexión de la vegetación
R_s: radiación solar entrante (MJ m^{-2} dia^{-1})

Por otro lado, la radiación neta de onda larga está relacionada con la temperatura absoluta de la superficie (Ecuación 12).

Ecuación 12. Cálculo de la radiación de onda larga.

$$R_{nl} = \sigma\left[\frac{T_{max}{}^4 - T_{min}{}^4}{2}\right](0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a})\left(1{,}35\frac{R_s}{Rso} - 0{,}35\right)$$

Donde:
R_{nl}: radiación neta de onda larga (MJ m^{-2} dia^{-1})
σ: constante de Stefan-Boltzmann (4,903 * 10^{-9} MJ K^{-4} m2 dia^{-1})
T_{max}: temperatura máxima diaria en grados Kelvin (°K) (°K= °C+273,16)
T_{min}: temperatura mínima diaria en grados Kelvin (°K) (°K= °C+273,16)
e_a: presión de vapor real (kPa)
$\frac{R_s}{Rso}$: radiación relativa de onda corta (valores ≤1)
R_s: radiación solar medida o calculada (Ecuación 5), (MJ m^{-2} dia^{-1})
Rso: radiación en un día despejado (MJ m^{-2} dia^{-1}; Ecuación 13).

Ecuación 13. Cálculo de la radiación de un día despejado.

$$R_{so} = (0{,}75 + 2 * 10^{-5} * z)R_a$$

Donde:
Rso: radiación en un día despejado (MJ m^{-2} dia^{-1})
z: elevación de la estación sobre el nivel del mar (m)
R_a: radiación extraterrestre (MJ m^{-2} dia^{-1})

Pasos para la generación de mapas de superficies de radiación solar media mensual multianual

- Generar series diarias de las variables de radiación solar (Rs), radiación extraterrestre (Ra) y radiación para un día despejado (Rso), con la Ecuación 5, la Ecuación 6 y la Ecuación 13, respectivamente.
- Realizar los cálculos, a partir de las series diarias de las respectivas variables de radiación, para obtener los valores medios mensuales para cada año y, luego, el valor medio multianual.
- Elaborar mapas de superficie de radiación solar media mensual en formato ráster mediante el uso de las herramientas de álgebra de mapas, asociando los valores respectivos a la localización.
- Generar mapas de superficie en formato ráster de las variables de radiación solar neta de onda corta (Rns). De acuerdo con la Ecuación 11, se requieren datos del albedo de la vegetación, calculados a partir de imágenes de satélite Sentinel-2 (Ecuación 14) (Kyalo, 2017), utilizadas por (Sharma y Tare, 2018). Con base en ellas, se obtiene un mapa ráster del albedo (Ecuación 14). Se recomienda utilizar imágenes mensuales, en lo posible de una serie de años, o del año más reciente; o elaborar mosaicos correspondientes a los cuatro trimestres del año.

Ecuación 14. Cálculo del albedo de la vegetación, a partir de imágenes de satélite Sentinel-2 de 10 m de resolución espacial.

$$\alpha = 0{,}03 * b2 - 0{,}11 * b4 + 0{,}337 * b8 + 0{,}065 * b11 + 0{,}054 * b12 - 0{,}0018$$

Donde:
α: albedo de la vegetación
b2: banda 2 o banda azul (Blue)de imágenes Sentinel-2
b4: banda 4 o banda roja (Red) de imágenes Sentinel-2
b8: banda 8 o banda del infrarrojo cercano (NIR) de imágenes Sentinel-2
b11: banda 11 o banda del infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1) de imágenes Sentinel-2 (esta banda con una resolución de 20 m)
b12: banda 12 o banda del infrarrojo de onda corta 2 (SWIR2) de imágenes Sentinel-2 (esta banda con una resolución de 20 m)

- Hacer mapas de superficie en formato raster de las variables de radiación neta solar de onda larga (Rnl) (Ecuación 12) y radiación solar neta (Rn) (Ecuación 10).

Cálculo de variables complementarias

Las variables hidrológicas se calculan a partir de información secundaria presentada en capas geográficas nacionales o a escala local. De la misma manera, se calculan los índices espectrales, como el NDVI. Esto sirve para conocer el estado de la salud de la vegetación e incluir los cálculos en la modelación de dinámica hídrica a nivel de escorrentía superficial. Para ello, se usan imágenes de satélite Sentinel-2 o PlanetScope en la plataforma Google Earth Engine.

Capacidad de almacenamiento de agua del suelo

- Calcular el porcentaje de arena, arcillas y materia orgánica:

Se toman como insumos los estudios de suelos por departamento del IGAC. Estas variables se calculan en el laboratorio de suelos mediante el análisis de características físicas, químicas y mineralógicas. Los resultados se interpretan según los aspectos mineralógicos de las fracciones arenosa, arcillosa y limosa (IGAC, 2014):

- Para la fracción arenosa se evalúa la abundancia de especies.
- Para las fracciones de arcilla y limo se estima la frecuencia de las especies.

En cuanto a la materia orgánica, el análisis se hace según la condición de humedad en que se encuentra el suelo en el momento de la descripción del perfil. Con respecto a las concentraciones o formaciones especiales en los suelos, se reporta el color dominante (IGAC, 2014).

Una vez se cuenta con los datos, se diligencian los valores en una matriz que se corresponde con las unidades cartográficas del suelo (UCS) representadas en la capa de geopedología, extraída del Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (MEC y IDEAM, 2017).

- Calcular el valor de disponibilidad de agua en el suelo:

Esta estimación se realiza en el programa Soil Water Characteristics, que incluye SPAW Hydrology, una herramienta de descarga gratuita (Departamento de Agricultura [USDA], 2023) utilizada para simular la tensión del agua del suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua en función de la textura del suelo.

El promedio de disponibilidad de agua se calcula con el método estadístico de curva Runoff, que proporciona valores a partir del porcentaje de arena, arcilla y materia orgánica. Dichos valores se digitan en los ejes X (arcilla), Y (arena) y en el campo de materia orgánica (Figura 12).

Así mismo, SPAW calcula el potencial matricial y la conductividad hidráulica en el suelo y genera la gráfica junto con el porcentaje de humedad.

- Para tener los valores de la disponibilidad de agua en la capa geográfica de correlación de suelos, en la tabla de atributos se crea un campo adicional donde se digitan los valores y se asigna al mapa una escala de colores para interpretar los valores más bajos y más altos.

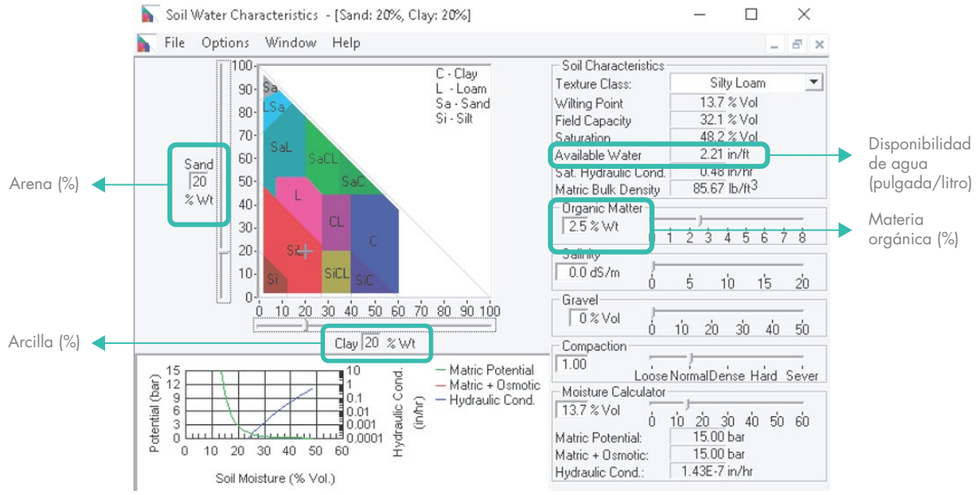


Figura 12. Modelo SPAW para calcular la disponibilidad de agua en el suelo. Fuente: USDA, (2023).

Modelo de balance hídrico, oferta de agua

Existen muchos modelos hidrológicos que pueden aplicarse para evaluar la dinámica del balance hídrico en el área de estudio. Para esta propuesta de Protocolo se evaluó la escorrentía a escala de microcuenca por pixel. Con este fin, se estimó la oferta de agua potencial trimestral y anual, mediante el modelo hidrológico InVEST WATER YIELD (Stanford University, 2023), que estima las contribuciones relativas de agua de las diferentes partes de un paisaje y brinda información sobre cambios en los patrones de uso de la tierra que afectan la producción del agua superficial, expresada como escorrentía superficial.

De esta manera, se modela la producción promedio para el periodo seleccionado (trimestral o anual) del agua de un paisaje y la contribución relativa de cada pixel a dicha oferta de agua. Los cálculos a escala de pixel representan la heterogeneidad de los factores impulsores clave en la producción de agua, como el tipo de suelo, la precipitación, el tipo de vegetación, etc. Sin embargo, la teoría que se utiliza como base de este conjunto de modelos se desarrolló en las escalas de subcuenca a cuenca; así, las salidas de cada pixel se suman y/o promedian a escala de subcuenca (Stanford University, 2023).

El fundamento teórico del modelo de producción de agua se basa en la curva de Budyko y la precipitación promedio para el periodo de análisis. La oferta de agua para cada pixel en el paisaje x se expresa en la Ecuación 15.

Ecuación 15. Cálculo del modelo de oferta de agua.

$$Y\ (x) = 1 - \frac{\mathrm{AET(x)}}{\mathrm{P(x)}} * \mathrm{P(x)}$$

Donde:
Y(x): producción (oferta) de agua para cada pixel (mm)
AET(x): evapotranspiración actual anual para cada pixel (mm)
P(x): precipitación anual en cada pixel (mm)

La relación $\frac{\mathrm{AET(x)}}{\mathrm{P(x)}}$ se expresa como se muestra en la Ecuación 16.

Ecuación 16. Cálculo para la relación entre la evapotranpiración y la precipitación.

$$\frac{\mathrm{AET(x)}}{\mathrm{P(x)}} = 1 + \frac{\mathrm{PET\ (x)}}{\mathrm{P(x)}} - \left[1 + \left(\frac{\mathrm{PET\ (x)}}{\mathrm{P(x)}}\right)^{w}\right]^{\frac{1}{w}}$$

Donde:
PET (x): es la evapotranspiración potencial (Ecuación 17)

Ecuación 17. Cálculo de la evapotranspiración potencial.

$$\mathrm{PET\ (x)} = K_c * ET_o(x)$$

Donde:
$\mathrm{ET_o}$ (x): evapotranspiración de referencia del pixel x, entendida como la evapotranspiración característica del pasto o la alfalfa, tomados estos como una vegetación de referencia, bajo condiciones climáticas locales (FAO, 2006).

La ETo (x): se calcula de acuerdo con la expresión mostrada en la Ecuación 18.

Ecuación 18. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo). Ecuación de FAO Penman-Monteith.

$$ET_0 = \frac{0{,}408 * \Delta\ (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\ (1 + 0{,}34 * u_2)}$$

Donde:
$\mathrm{R_n}$: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m^{-2} dia^{-1}), calculada como se mostró en la Ecuación 10
G: flujo de calor del suelo (MJ m^{-2} dia^{-1})
T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u_2: velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
e_s: presión de vapor de saturación (KPa)
e_a: presión real de vapor (KPa)
Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (KPa $°C^{-1}$)
γ: constante psicométrica ((KPa $°C^{-1}$)

Cada una de las variables (Ecuación 18) se genera como mapas de superficie en formato ráster; luego, se calcula la ecuación a escala espacial utilizando la herramienta de álgebra de mapas del *software* SIG para cada uno de los meses. La evapotranspiración de referencia anual se estima sumando las 12 evapotranspiraciones mensuales.

$\mathrm{K_c}$: coeficiente de evapotranspiración de la planta (vegetación) asociado con cada cobertura (lx) en el pixel x, determinado por las características vegetativas de la cobertura (Stanford University, 2023; Wang y Lakatos, 2020). Kc, por lo tanto, ajusta los valores de ETo al tipo de cultivo o vegetación en cada pixel del mapa de cobertura. El coeficiente Kc se calcula para diferentes tipos de vegetación a partir de relaciones empíricas, utilizando el NDVI derivado de imágenes ópticas (Ecuación 19).

Ecuación 19. Cálculo de NDVI a partir de imágenes de satélite multiespectrales.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

De esta forma, se utiliza el valor del NDVI para calcular el Kc según la cobertura (por ejemplo, Ecuación 20, Ecuación 21, Ecuación 22 y Ecuación 23).

Ecuación 20. Cálculo del Kc para herbazales (Reyes-González et al., 2016).

$$Kc\ = 1{,}5507 * NDVI\ - 0{,}0229$$

Ecuación 21. Cálculo del Kc para bosques, vegetación secundaria y arbustales (Poblete-Echeverria et al., 2013).

$$Kc\ = 1{,}1875 * NDVI + 0{,}05$$

Ecuación 22. Cálculo del Kc para cultivos (Calera et al., 2016).

$$Kc\ = 1{,}25 * NDVI\ + 0{,}1$$

Ecuación 23. Cálculo del Kc para pastos introducidos (Reyes-González et al., 2016).

$$Kc\ = 1{,}1981 * NDVI\ - 0{,}1002$$

Donde:
ω: es un parámetro no físico que caracteriza las propiedades naturales de las características del suelo y del clima que se detallan más adelante.
w(x): es un parámetro empírico que se expresa como una función lineal de (AWC * N) / P, donde N es el número de eventos de lluvia por año, y AWC es el contenido de agua disponible de la planta volumétrica, determinado por la expresión propuesta por (Donohue et al., 2012) para el modelo INVEST (Ecuación 24).

Ecuación 24. Cálculo del parámetro empírico w(x).

$$w(x) = Z * \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1{,}25$$

Donde:
AWC(x): es el contenido volumétrico (mm) de agua disponible para las plantas. La textura del suelo y la profundidad efectiva del enraizamiento definen AWC (x), que establece la cantidad de agua que se retiene y se libera en el suelo para ser utilizada por una planta. Se estima como el producto de la capacidad de agua disponible para las plantas (PAM) y el mínimo de la profundidad de la capa de restricción de la raíz y la profundidad de las raíces de la vegetación (Ecuación 25).
Z: es una constante empírica, a veces denominada "factor de estacionalidad", que captura el patrón de precipitación local y las características hidrogeológicas adicionales. Se correlaciona positivamente con N, el número de eventos de lluvia por año. El término 1,25 es el valor mínimo de ω (x), que se puede ver como un valor para suelo desnudo (cuando la profundidad de la raíz es 0), como lo explican Donohue et al. (2012).

Ecuación 25. Cálculo del contenido de agua volumétrico AWC(x).

$$AWC(x) = Min\ (\mathrm{Rest.\ layer.\ depth, Root.\ depth}\ ) * \mathrm{PAM}$$

Donde:
AWC: es la capacidad de agua disponible para la planta, es decir, la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento.

La profundidad de la capa de restricción de la raíz es la profundidad del suelo a la que se inhibe la penetración de la raíz debido a sus características físicas o químicas.

La profundidad del enraizamiento de la vegetación se entiende a menudo como la profundidad a la que se produce el 95 % de la biomasa de la raíz de un tipo de vegetación. Para otros tipos de coberturas y usos del suelo como aguas abiertas, humedales y zonas urbanas, la evapotranspiración real se calcula directamente a partir de la evapotranspiración de referencia ET_o (x) y tiene un límite superior definido por la precipitación (Ecuación 26).

Ecuación 26. Cálculo de la evapotranspiración de referencia para humedales, aguas abiertas y zonas urbanas.

$$AET(x) = Min(Kc(\ell x) * ETo(x), P(x))$$

Donde:
$ET_o(x)$: es la evapotranspiración de referencia, y $Kc(\ell x)$ es el factor de evaporación para cada cobertura.

Finalmente, el modelo genera un ráster con valores de escorrentía superficial por pixel y un mapa en formato *shapefile* con los valores de oferta de agua agregados por cuencas y subcuencas. Aunque el modelo fue desarrollado para ser aplicado en una escala temporal anual, las ecuaciones funcionan para cualquier temporalidad, dado que es un balance de masas para un área determinada (pixel) que depende de un valor de entrada y de unos valores de salida, y que no depende de una serie del comportamiento de las variables en el tiempo.

Análisis de cambios de extensión del humedal

Se realiza usando herramientas SIG para los años seleccionados, de acuerdo con la temporalidad definida. En esta propuesta de Protocolo, la temporalidad seleccionada para el análisis de cambio de extensión corresponde a cada dos años, con temporada seca (aguas bajas) y de lluvia (aguas altas), establecidas a partir de las variables hidrometeorológicas. Este proceso es sumamente importante y, para el caso de los ecosistemas acuáticos, su identificación y análisis deben ser detallados por la alta variabilidad que presentan en sus límites y rondas, debido a los cambios (expansión y contracción) presentes en cada época del año, los cuales están determinados por las temporadas de lluvia y sequía.

En este documento se presenta una propuesta metodológica para el preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento de imágenes de radar Sentinel-1 de acceso gratuito, para analizar los cambios de extensión de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. Con este propósito se analizan las áreas de inundación, definidas de acuerdo con el alcance del agua sobre el suelo y debajo de la vegetación hacia los límites exteriores del humedal.

Estos procesos son causados de forma natural, por ejemplo, por eventos de precipitación extrema; o por fenómenos antrópicos, cuando se inundan predios para fines particulares (principalmente para actividades de agricultura como cultivos de arroz). Por lo anterior, los mapas de inundación se generan para reducir y monitorear la extensión de las inundaciones en ecosistemas de humedal, así como para apoyar el manejo de desastres.

Etapa 1. Preprocesamiento

Uno de los aspectos más importantes a definir es la escala cartográfica en la cual se quieren presentar los resultados obtenidos a partir de las imágenes satelitales seleccionadas para tal fin (Tabla 15).

Tabla 15. Imágenes de satélite adecuadas para las diferentes escalas cartográficas.

Escala	Rango de escala	Tipo de levantamiento e insumos
Nacional	1:100 000 o mayor	Representación de grandes extensiones (por ejemplo, países) con fines de reconocimiento. Imágenes ópticas: Landsat (5, 7, 8 y 9), MODIS, Terra, entre otras. Imágenes de radar: TerraSAR-X.
Regional	1:10 000 a 1:100 000	Levantamientos semidetallados. Imágenes ópticas: Sentinel-2, RapidEye, Spot 6/7, PlanetScope. Imágenes de radar: Sentinel-1, Alos Palsar, TerraSAR-X, entre otras.
Local	Menor a 1:10 000	Levantamiento a nivel de detalle. Imágenes ópticas: QuickBird, Pléiades, WorldView, entre otras. Imágenes de radar: TerraSAR-X, entre otras.

Fuente: elaboración propia (2024).

La periodicidad de las imágenes para el análisis será cada dos años. Esto se complementa con los regímenes hidrológicos monomodales o bimodales característicos de Colombia en los que se presenta una temporada de lluvias y una seca, y dos temporadas de lluvias y dos secas respectivamente. Así, una vez definidas las escalas espacial y temporal y los regímenes hidrológicos (temporada de lluvias y temporada seca), se procede a la búsqueda, selección y descarga de las imágenes en las plataformas web de acceso gratuito; en algunas de estas es posible generar los mosaicos y descargarlos con el fin de disminuir el tiempo de preprocesamiento (Figura 13).

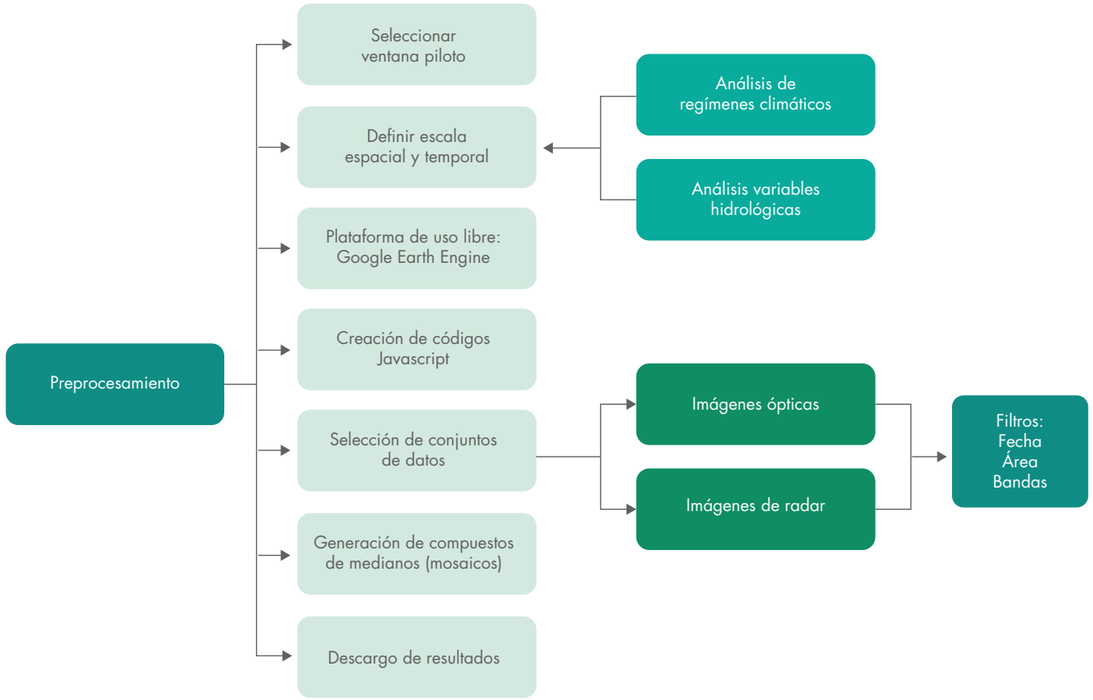


Figura 13. Etapa de preprocesamiento digital de imágenes satelitales para el análisis de extensión de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Para implementar esta metodología se propone el uso de imágenes de radar Sentinel-1, debido a que son insumos adecuados para identificar zonas inundadas o con presencia de recurso hídrico (Ozesmi y Bauer, 2002).

Una vez definido el conjunto de datos a usar, se crea un código para la descarga de los compuestos temporales de medianas de las imágenes Sentinel-1 (Tabla 16).

Tabla 16. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes de radar Sentinel-1.

Criterio	Código
Cargar colección Sentinel-1	var sentinel1 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
Filtrar para el área de interés	.filterBounds(table)
Filtrar por rango de fechas	.filterDate ('2016-09-01', '2016-11-30');
Filtrar por propiedades de metadatos	var VvIw = sentinel1
Filtrar imágenes con polarización dual VV, VH	.filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV')) .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
Filtrar imágenes colectadas en modo Interferometric Wide Swath (IW)	.filter(ee.Filter.eq(,instrumentMode', ,IW'));
Separar imágenes de órbita ascendente y descendente en diferentes colecciones	var vvVhIwAsc = vvVhIw.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'ASCENDING')); var vvVhIwDesc = vvVhIw.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'));
Generar mosaicos de medianas	// Mediana VH ascendente var vhIwAscMean = vvVhIwAsc.select('VH').mean(); // Mediana VH descendente var vhIwDescMean = vvVhIwDesc.select('VH').mean(); // Mediana VV para combinar colecciones de imágenes ascendentes y descendentes var vvIwAscDescMean = vvVhIwAsc. merge(vvVhIwDesc).select('VV').mean(); // Mediana VH para combinar colecciones de imágenes ascendentes y descendentes var vhIwAscDescMean = vvVhIwAsc. merge(vvVhIwDesc).select('VH').mean();
Desplegar medianas temporales sobre el mapa base	Map.addLayer(vvIwAscDescMean.clip(table), {min: -12, max: -4}, 'vvIwAscDescMean'); Map.addLayer(vhIwAscDescMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwAscDescMean'); Map.addLayer(vhIwAscMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwAscMean'); Map.addLayer(vhIwDescMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwDescMean');
Centrar para visualizar sobre área de interés: Complejo Cenagoso de Zapatosa	Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);
Exportar mosaico Sentinel-1 a Google Drive	Export.image.toDrive({ image: nombre mosaico de interés, description:'S1_mos_T3_2016', fileFormat:'GeoTIFF', scale:10, region: table, maxPixels:1e9 });

Fuente: elaboración propia (2024).

Este código incluye líneas en las que se definen criterios técnicos previos al procesamiento, ya que las imágenes de radar de las diferentes constelaciones disponibles en el mercado (pagas o gratuitas) presentan varias opciones de toma de datos. Es decir, los modos de captura de las imágenes cambian, así como ciertas características; por ejemplo, la polarización, la dirección de la toma según la órbita (ascendente o descendente) y las fechas en que son lanzados los satélites (Bourgeau-Chavez et al., 2021).

Por lo anterior, en el momento de realizar la búsqueda de los mosaicos de imágenes disponibles para el área de interés, se sugiere plantear en el código todas las opciones tanto de polarización como de generación de medianas de las combinaciones de órbita ascendente y descendente.

Etapa 2: procesamiento

Incluye la ejecución de procesos a partir de las imágenes seleccionadas, o la generación de compuestos de medianas para la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest de aprendizaje automático en la plataforma de Google Earth Engine (GEE) (Figura 14). Una de sus ventajas es que obtiene un mejor rendimiento de generalización, debido a que compensa los errores de las predicciones de los distintos árboles de decisión; es decir, a medida que se ejecuta el algoritmo se adapta para clasificar de forma más precisa, con lo cual aumentan los valores de precisión de la clasificación.

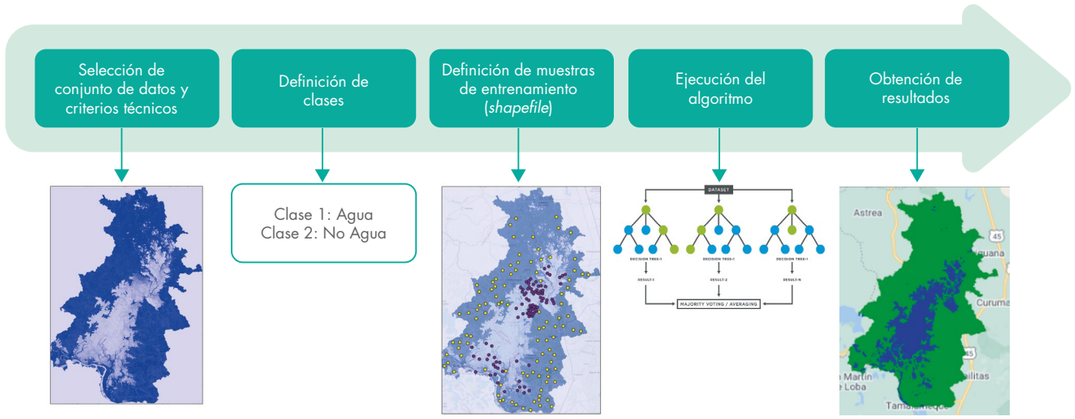


Figura 14. Fases de la ejecución de Random Forest en Google Earth Engine. Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez se selecciona el conjunto de datos de imágenes ópticas o de radar, se definen las clases para la separabilidad de pixeles. Para el análisis de cambios de extensión de humedal el objetivo es separar los pixeles correspondientes a presencia de agua de los pixeles de las demás coberturas terrestres. Las clases propuestas son:

- Presencia de agua - clase 'Agua'.
- No presencia de agua - clase 'No agua'.

Luego, a partir del compuesto de medianas, se crean archivos en formato *shapefile* para la creación de entidades de tipo punto o poligonal con las muestras de entrenamiento. Estas pueden ser tomadas en campo o creadas en *software* SIG de forma manual. Se sugiere que cada *shapefile* creado para cada clase contenga mínimo 100 puntos o áreas, lo que busca que el algoritmo tenga mayor exactitud en el momento de clasificar. Ya con las muestras de entrenamiento, se ejecuta el algoritmo Random Forest (ejemplo en la Figura 15).

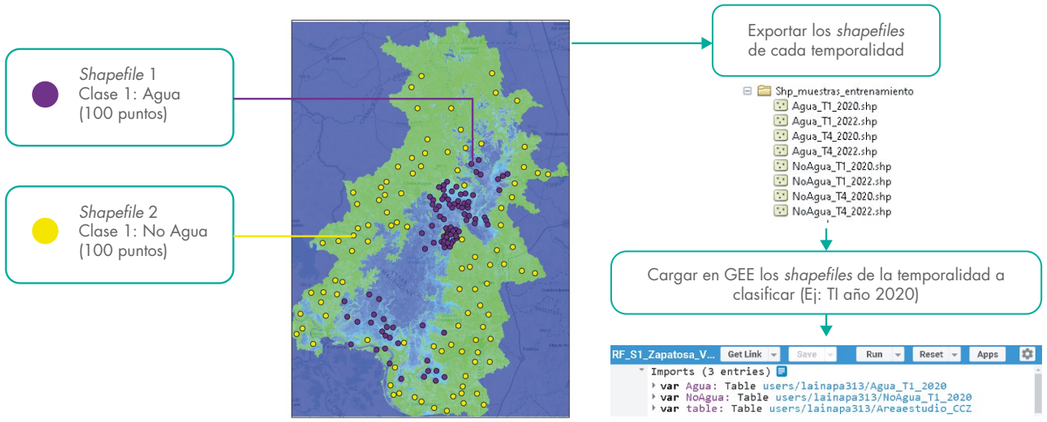


Figura 15. Ejemplo de la preparación de las muestras de entrenamiento previo a la ejecución del algoritmo Random Forest en GEE. Fuente: elaboración propia (2024).

Para ejecutar el proceso en GEE, en la ventana de editor de código se insertan primero las líneas de código creadas para la generación de mosaicos (Tabla 17); seguidamente, se crea el código para la clasificación, en el que se indican las clases, el tamaño de cada muestra, el algoritmo de clasificación y el mosaico que se quiere clasificar.

Tabla 17. Código desarrollado en Google Earth Engine para la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest.

Criterio	Código
Nombre de clases definidas (agua, no agua)	var muestras = Agua.merge(NoAgua);
Muestras de clases definidas (agua, no agua)	var entrenamiento = IwAscDescMean. sampleRegions(muestras,['Clase'],100); print(entrenamiento.size())
Selección de bandas del sensor seleccionado	var bandas = ['VV']
Algoritmo de clasificación	var clasificacion = ee.Classifier.smileRandomForest(50). train(entrenamiento,'Clase',bandas);
Resultado de la clasificación	var image = IwAscDescMean.classify(clasificacion);

Matriz de confusión y precisión del entrenamiento	var confusionMatrix = clasificacion.confusionMatrix();
	print('Confusion matrix: ', confusionMatrix);
	print('Training Overall Accuracy: ',
	confusionMatrix.accuracy());

Cálculo del índice Kappa	var kappa = confusionMatrix.kappa(); print('Training Kappa', kappa);
Visualizar el resultado de la clasificación sobre el mapa base	Map.addLayer(image.clip(table), {min:1,max:2,palette:['blue','green']},'clasificado');
Exporter a Google Drive	Export.image.toDrive({ image:image, scale:10, description:'RF_CCZ_T1_2016', fileFormat:'GeoTIFF', region: table, maxPixels:1e11 });

Fuente: elaboración propia (2024).

Finalmente, se descarga el resultado de la clasificación para cada temporalidad establecida y se verifica en el *software* SIG que la clasificación se haya hecho según lo establecido en el código.

Etapa 3. Posprocesamiento

Se procede a la evaluación de la precisión de la clasificación supervisada y al establecimiento del límite máximo del humedal para cada temporada (seca y de lluvia).

Análisis de precisión de la clasificación

A partir de los resultados obtenidos mediante GEE, se visualiza la matriz de confusión y los índices de exactitud directamente en la pestaña "Consola" de la misma plataforma. Esto es posible debido a la inclusión de las líneas de código que generan los informes correspondientes.

```
var confusionMatrix = clasificacion.
confusionMatrix();
print('Confusion matrix: ',
confusionMatrix);
print('Training Overall Accuracy: ', con-
fusionMatrix.accuracy());
var kappa = confusionMatrix.kappa();
print('Training Kappa', kappa);
```

En la matriz de confusión se establece una comparación entre los valores de la clase de referencia con los valores de la clase asignados por el intérprete en una matriz de filas y columnas (a x a), donde a es el número de clases. Las filas corresponden a las clases reales y las columnas son las previstas por el modelo; de esta manera, el objetivo principal de la matriz es mostrar los casos en los que una clase ha sido confundida con otra en el momento de la clasificación.

La diagonal principal representa los valores de la suma de todas las predicciones acertadas bajo la clase indicada, que en este caso son las clasificaciones correctas.

Por otra parte, la exactitud del usuario muestra falsos positivos, en los que la clasificación de los pixeles es errada y los valores han sido clasificados dentro de una clase diferente a la real; por ejemplo, cuando la clasificación dice que la clase es de tipo "No agua" pero en realidad no lo es. También están los falsos negativos, como cuando se clasifican los pixeles en la clase de "Agua" pero corresponde a "No agua".

Así mismo, los resultados de GEE arrojan otros valores de la evaluación de la exactitud, importantes para interpretar la precisión de la clasificación:

- Precisión general del entrenamiento, que indica el porcentaje de coberturas que se han clasificado con facilidad y cuya asignación de clases se hizo a partir de los puntos de muestreo. El porcentaje restante corresponde a aquellas coberturas sobre las cuales es más difícil realizar la interpretación. Por ejemplo, si se tiene un resultado de 0,92 quiere decir que el 92 % de las coberturas se clasificaron a partir de las muestras de entrenamiento y el 8 % restante tuvo dificultad para ser asignada a una clase particular. Estos valores de precisión permiten definir si es necesario establecer un mayor número de clases, de forma que la separación de pixeles sea acorde con las coberturas reales, o bien editar las áreas de entrenamiento para ejecutar de nuevo el proceso.
- El índice Kappa mide la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación y la posibilidad de lograr una clasificación correcta con un clasificador aleatorio (Kumar et al., 2020); esto es calculado a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 27. Índice Kappa.

$$K = \frac{(exactitud\ observada - probabilidad\ de\ acierto)}{(1 - probabilidad\ de\ acierto)}$$

Establecimiento del límite máximo del humedal

Se realiza mediante la ejecución de procesos de análisis espacial, creados en *software* SIG de escritorio, para la generación de salidas cartográficas donde se representen los resultados de los cambios de extensión del humedal en formato vectorial. A continuación, se describen dichos procesos:

- Suma algebraica de los ráster clasificados para cada periodo (seco y de lluvias) para las temporalidades seleccionadas, utilizando herramientas de análisis espacial en *software* SIG. En ArcGIS se usa la herramienta "Map algebra". En la Figura 16 se presenta un ejemplo de la suma en dos periodos (2016 y 2018).

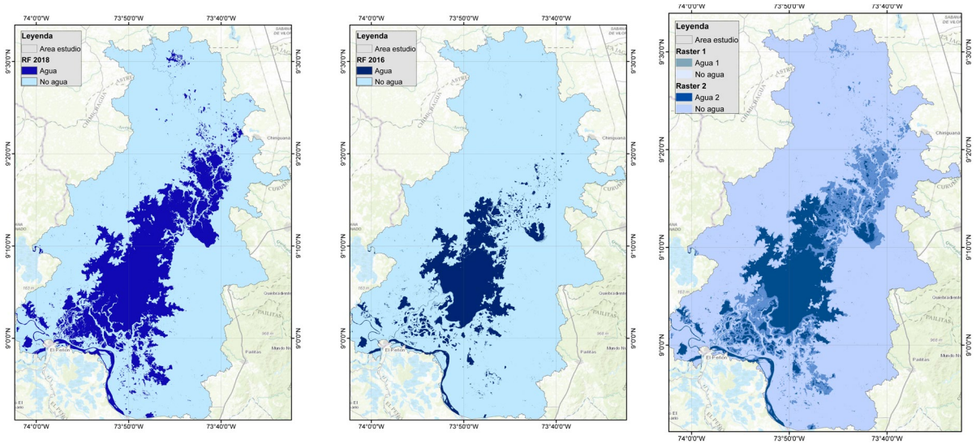
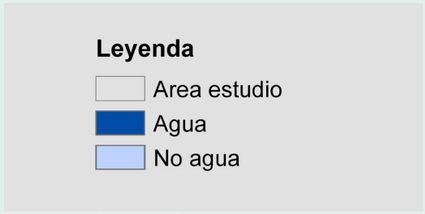


Figura 16. Suma algebraica de los ráster clasificados para el periodo seco de las temporalidades de 2016 y 2018. Fuente: elaboración propia (2024).



- Reclasificación del ráster resultado de la suma, en dos clases: agua y no agua, mediante herramientas de análisis espacial en *software* de SIG. En ArcGIS se usa la herramienta "Reclassify" (Figura 17).

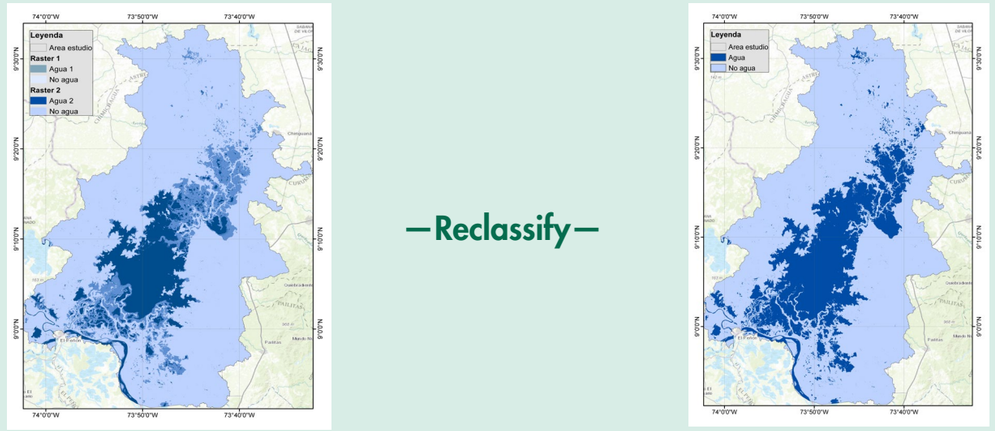


Figura 17. Reclasificación del ráster resultado de la suma por temporalidades. Ejemplo del periodo seco (diciembre a febrero) de los años 2016 y 2018.
Fuente: elaboración propia (2024).

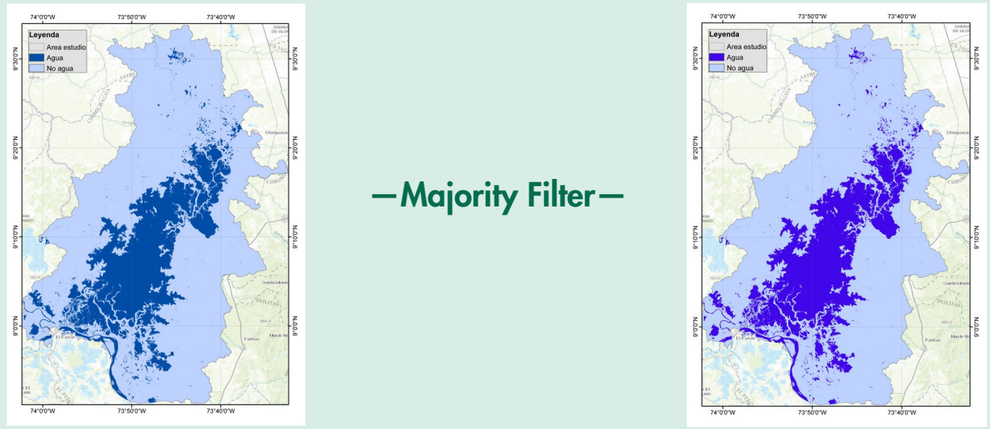
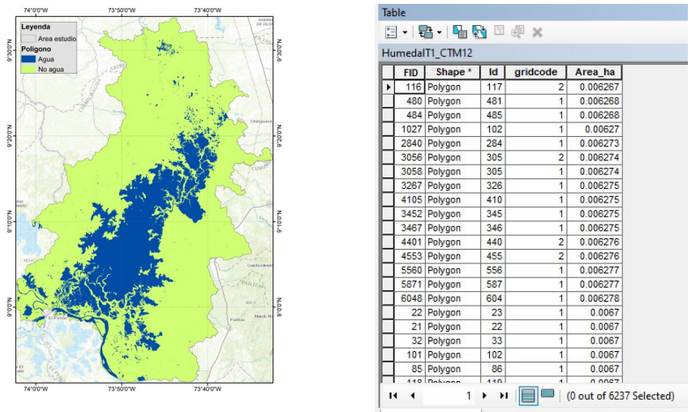


Figura 18. Filtrado del ráster resultado de la reclasificación.
Fuente: elaboración propia (2024).

- Filtro del ráster resultado de la reclasificación para eliminar pixeles dispersos. Se recomienda realizar un filtrado mayoritario mediante herramientas de análisis espacial en *software* SIG, que para el caso de ArcGIS está disponible la herramienta de generalización "Majority Filter" (Figura 18).

- Proceso de vectorización, mediante la conversión del ráster resultado del proceso de filtrado a polígono, usando herramientas de conversión en el *software* de SIG. En ArcGIS se utiliza la herramienta de conversión "Raster to Polygon" para la vectorización (Figura 19).



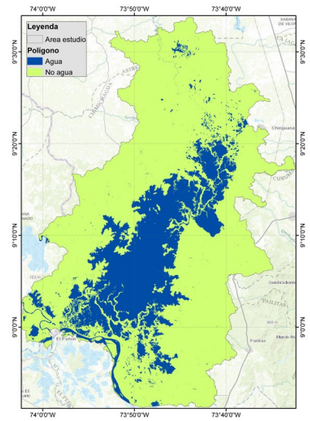
Polígono *(shapefile)*

Tabla de atributos de la capa resultante

Figura 19. Conversión de ráster a polígono y su tabla de atributos con el cálculo del área. Fuente: elaboración propia (2024).

- Cálculo del área en unidad de hectáreas (ha) de cada uno de los polígonos del *shapefile* resultado de la conversión de ráster a polígono (Figura 19).

- Eliminación de los polígonos menores a 25 ha, mediante la herramienta de generalización del *software* SIG. En ArcGIS se utiliza la herramienta de manejo de datos, "Eliminate" (Figura 20).



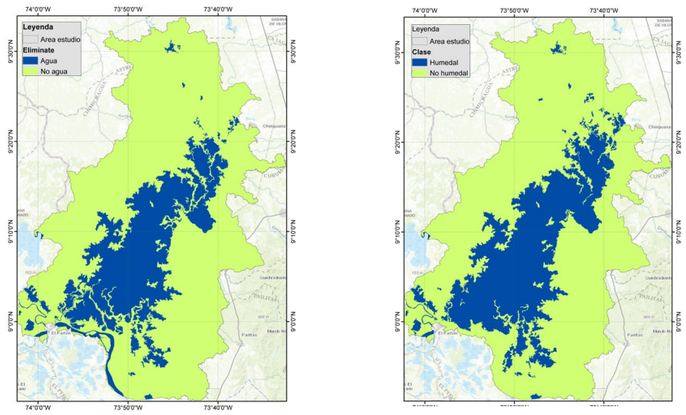
Shapefile con todas las áreas

Shapefile sin las áreas <25ha

Tabla de atributos área <25 ha

Figura 20. Proceso de eliminación de polígonos con áreas menores a 25 ha. Fuente: elaboración propia (2024).

- Diferenciación entre los polígonos que representan el humedal y los que representan quebradas, caños o ríos, elementos que, aunque son cuerpos de agua, no corresponden a humedales de acuerdo con la definición operativa de esta propuesta de Protocolo; así, se clasifican los polígonos del *shapefile* anterior en humedal y no humedal. En la Figura 21 se presenta, a modo de ejemplo, el polígono final que define la extensión del humedal para el periodo seco.



Polígono con todas las áreas >25 ha

Polígono clasificado en humedal y no humedal

Figura 21. Proceso de diferenciación y clasificación de humedal y no humedal. Fuente: elaboración propia (2024).

Macrófitas Complejo Cenagoso Zapatosa. Fotografía: Lina María Parada.

Representatividad del muestreo

Luego del proceso de homologación de la información geográfica y de establecer los límites del humedal bajo los lineamientos propuestos en la definición operativa, se analiza la representatividad de los ecosistemas en el diseño de muestreo definido. Para la asignación de las unidades muestrales dentro de un proceso de implementación (ventana piloto) se propone evaluar dicha representatividad de dos maneras: asignación porcentual y asignación óptima.

En el caso de la asignación porcentual, las unidades muestrales se establecen de acuerdo con la representatividad de los estratos en el área, a partir de las combinaciones entre tipo de suelo y uso de suelo. En el caso de la asignación de forma óptima, se deben ver representadas todas las combinaciones generadas en la ventana piloto de implementación, producto del proceso de homologación al IPCC.

Como parte del proceso estadístico y con el objetivo de remover los posibles sesgos sistemáticos, las unidades muestrales deben ser seleccionadas de forma imparcial, mediante un proceso aleatorio. Para lograrlo, se implementa un procedimiento sencillo, como la generación de números aleatorios.

Con los resultados obtenidos de la identificación de los polígonos por cada estrato, se procede a seleccionar de forma aleatoria un polígono correspondiente a cada combinación entre tipo de suelo y uso de suelo.

Para generar los números aleatorios se propone el uso del software Microsoft Excel, asignándole a cada polígono un valor aleatorio por medio de la función (=ALEATORIO()). Luego, se ordena el valor asignado de mayor a menor y se selecciona el primer polígono que corresponde al que tiene el mayor valor aleatorio. Al utilizar el mismo criterio para la selección de los polígonos, se asegura que la selección sea un proceso imparcial. Posterior a la aleatorización se seleccionan los dos primeros polígonos para cada estrato, con el objetivo de evaluar el acceso en campo según la estacionalidad hidroclimatológica propia del humedal a monitorear, tanto en temporada seca (aguas bajas) como en temporada de lluvia (aguas altas).

Definición compartimientos de muestreo

De acuerdo con el IPCC (2003; 2006), existen cinco compartimientos, reservorios o depósitos de carbono que pueden ser medidos. Los cuatro principales son:

biomasa aérea, detritos o madera muerta, biomasa subterránea o sistema radical (raíces gruesas y finas) y suelos (Yepes et al., 2011) (Tabla 18).

Tabla 18. Compartimientos de carbono. Modificado del IPCC (2003) y BioCarbon Fund (2008). Adaptado para la ejecución del proyecto.

Compartimiento		Descripción
Biomasa viva	Biomasa aérea	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje.
		Cuando el sotobosque es un componente relativamente pequeño del depósito de carbono de biomasa sobre el suelo, se puede excluir de las metodologías y datos asociados utilizados en algunos niveles, siempre y cuando los niveles se utilicen de manera coherente en todas las series cronológicas de inventarios.
	Biomasa subterránea (raíces)	Toda la biomasa viva de raíces. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo.
	Biomasa acuática*	Biomasa presente en la zona litoral de los ecosistemas acuáticos y diferenciada según su forma de vida. Se recomienda tener presente la morfoespecie dominante para el cálculo de la biomasa.
Materia orgánica muerta	Detritos o madera muerta	Comprende la madera no viva sobre el suelo, ya sea en pie o caída. La madera muerta incluye la que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10 m de diámetro o más.
	Hojarasca	Comprende toda la masa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en varios estados de descomposición. Además, las capas de detritos, fúmica y húmica. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite del diámetro sugeridos para la biomasa baja del suelo) se incluyen en el mantillo cuando no se pueden distinguir empíricamente de él. Se puede establecer previamente un diámetro mínimo para diferenciar de los detritos, por ejemplo, <10 cm.
Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto.
		Raíces finas vivas con diámetro menor a 2 mm.
Biodiversidad**	Comunidades hidrobiológicas y flora y fauna de zonas de inundación	Comprende el carbono disponible en el ecosistema acuático, presente en los organismos que lo habitan o usan como fuente de obtención energética o de hábitat frecuente o transicional, según el momento hidrológico.

Fuente: elaboración propia (2024).

* Para los ecosistemas acuáticos es de suma importancia la inclusión de la biomasa acuática por su aporte a los contenidos de carbono y su relevancia en términos de biodiversidad propia y asociada.

** Se incluye el compartimiento de biodiversidad dada su importancia en la dinámica del carbono en los ecosistemas acuáticos.

Directrices IPCC

Compartimientos de monitoreo:
Biomasa, MOM, suelos y bioversidad

La decisión sobre cuáles compartimientos adicionales se deben incluir en un proyecto depende de los recursos financieros disponibles, la magnitud del cambio potencial en los contenidos de carbono que pueda ocurrir por efecto de la deforestación/degradación, o bien, por principio de conservación, de acuerdo con las recomendaciones del IPCC o de la metodología que se seleccione (MDL, VCS, CDBA, etc.). Algunas veces puede ocurrir que el costo de realizar el muestreo en determinados compartimientos, con el grado de precisión exigido o establecido, sea mayor que el retorno que se recibirá por el proyecto, por lo cual no se justifica su medición y monitoreo (Rügnitz et al., 2009, tomado de Yepes et al., 2011).

A continuación, se describen los compartimientos que se incluyen en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*, junto con la propuesta metodológica para el levantamiento de información en campo dentro de las ventanas piloto de validación.

Etapa de muestreo

Biomasa y materia orgánica muerta

A continuación, se presentan las variables establecidas para la medición en campo de reservas de carbono provenientes de la vegetación acuática y la vegetación inundable. Esto se hace de acuerdo con los estándares internacionales establecidos por el IPCC para definir los depósitos a considerar, y con las categorías de uso de tierras homologadas de la capa de coberturas de la tierra del período 2018, es decir, la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2021).

Tabla 19. Definición de depósitos de carbono asociados a la biomasa. Modificado de Yepes et al. (2011); Cisneros-de la Cruz et al. (2021).

Depósito de carbono		Definición
Biomasa viva	Biomasa aérea	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo (o sobre la superficie de agua o zona de encharcamiento), con inclusión de tallos, ramas, corteza, semillas y follaje.
	Biomasa subterránea o radicular	Toda la biomasa viva de raíces: incluye raíces finas <2 mm, que sirven para la absorción de agua y nutrientes, y raíces gruesas >2 mm, que funcionan como estructuras de transporte y sostén.
Biomasa muerta (MO)	Detritos o madera muerta	Madera no viva sobre el suelo, ya sea en pie o caída, y raíces muertas.
	Hojarasca o mantillo	Biomasa muerta en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (hojas, ramas y cáscaras de frutos). Comprende las capas de detritos, fúmica y húmica.

Definición de los depósitos de carbono

Se define la biomasa aérea arbórea (BARA) proveniente de coberturas tipo bosque (vale la pena aclarar que para humedales se contemplan únicamente los bosques de áreas inundadas) y no arbórea (BNAA) proveniente de coberturas definidas como no bosque, de acuerdo con Proclima (2021).

Del mismo modo, la biomasa subterránea se diferencia en biomasa arbórea subterránea (BARS) y biomasa no arbórea subterránea (BNAS). Esta diferenciación se tuvo en cuenta para diseñar la propuesta del Protocolo y definir las variables a muestrear (Tabla 19 y Figura 22).

Tipo de **cobertura**

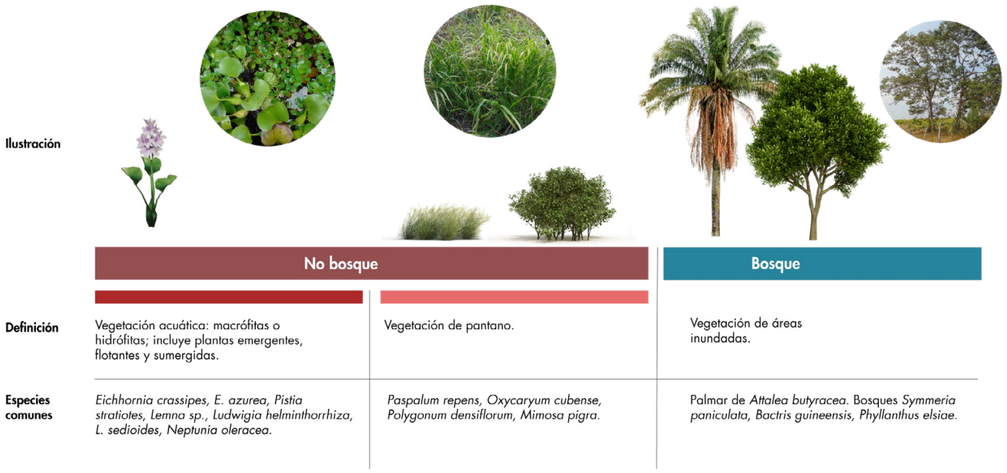


Figura 22. Componente de vegetación para la captura de carbono en humedales. Fuente: elaboración propia (2024).

Cobertura tipo bosque

Vegetación de tipo leñosa, definida por unidades de vegetación dominadas por plantas con altura >5 m (caracterizadas por tener tallo o eje principal), que incluyen elementos como árboles y palmas (Proclima, 2021). En los humedales del Magdalena Medio y Bajo se distribuye principalmente sobre las áreas inundadas o llanuras de inundación de manera continua, formando coberturas boscosas o dispersas. Se excluyen las consideradas por el SMByC.

Cobertura tipo no bosque

Cobertura compuestas por diferentes tipos de vegetación: (i) vegetación acuática (macrófitas asociadas a humedales de agua dulce); (ii) vegetación a nivel del suelo (dominada por plantas herbáceas con altura menor a 30 cm); (iii) vegetación herbácea (dominada por plantas con altura entre 0,3 y 1,5 m); y (iv) vegetación de tipo arbustiva (plantas con altura entre 1,5 y 5 m) (Proclima, 2021). Para la presente propuesta de Protocolo se tienen en cuenta principalmente las acuáticas flotantes y enraizadas emergentes que se encuentran sobre el espejo de agua y la vegetación de pantano, lo cual puede incluir elementos herbáceos y arbustivos.

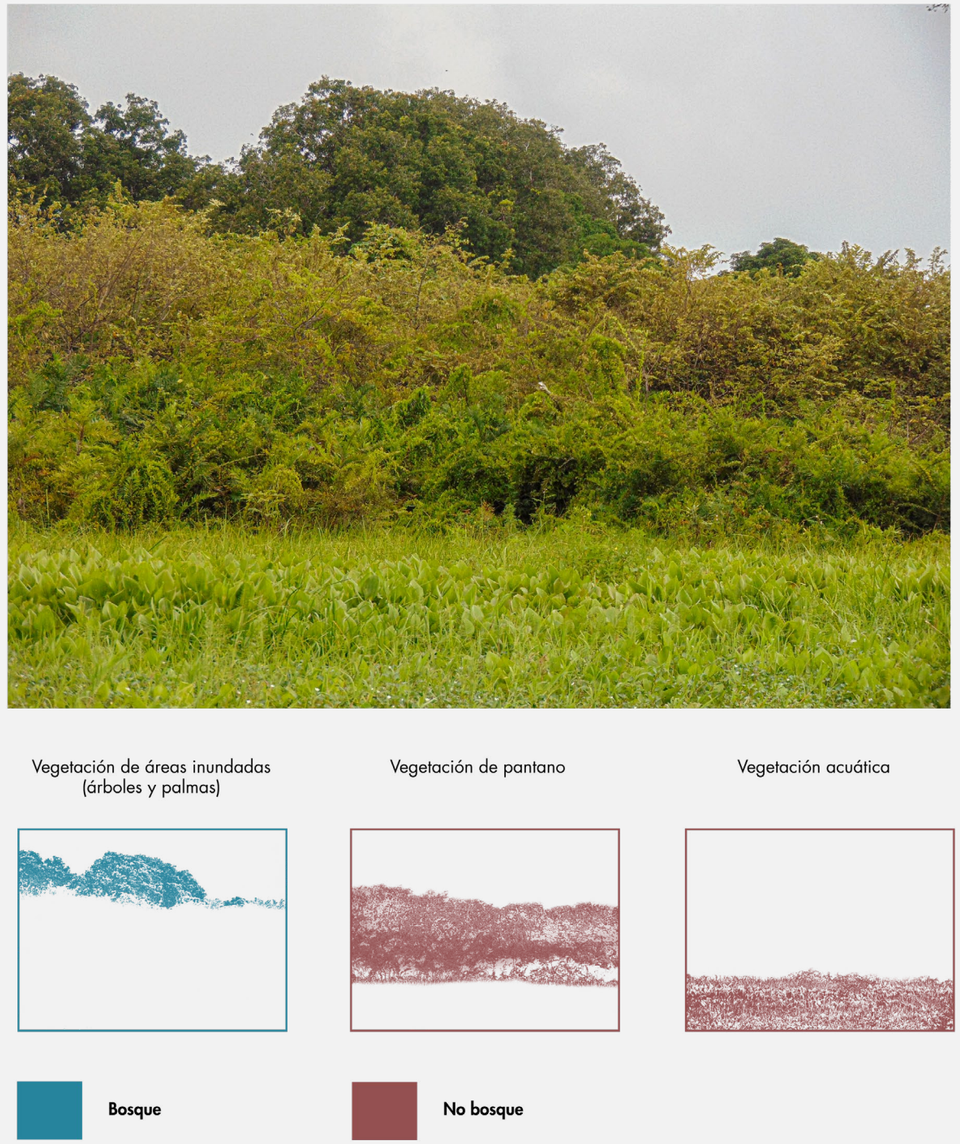


Figura 23. Zonificación de la vegetación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Definición de las variables de monitoreo según el reservorio o depósito de carbono

Cobertura tipo bosque

Biomasa aérea arbórea (BARA): para calcularla se recomienda emplear el método indirecto que consiste en utilizar ecuaciones alométricas o factores de expansión. Para eso, se emplean las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura y densidad de madera. Posteriormente, estas se incluyen en la ecuación seleccionada (Yepes et al., 2011; Kauffman et al., 2013; Kauffman et al., 2016; Cisneros-De la Cruz et al., 2021). De acuerdo con Acosta et al. (2002), el uso de ecuaciones alométricas permite una estimación confiable de la biomasa, porque contempla las diferencias dadas en función del crecimiento.

Biomasa arbórea subterránea o radicular (BARS): se estima mediante el método indirecto, que hace uso de ecuaciones alométricas. Existe un grupo de ecuaciones que se pueden emplear, como la ecuación pantropical de Cairns et al. (1997), recomendada por el IPCC (2003; 2006) para bosques tropicales (Yepes, et al., 2011), y las ecuaciones desarrolladas por Kauffman et al. (2016) para bosques de pantano tropicales, que tienen como variable predictiva el diámetro o la biomasa aérea calculada para cada individuo registrado en las parcelas de muestreo.

Cobertura tipo no bosque

Biomasa no arbórea aérea (BNAA): para estimar la vegetación arbustiva se emplea el método indirecto (ecuaciones alométricas); en cambio, para la vegetación de tipo herbáceo se usa el método directo, el cual consiste en cosechar a ras del suelo (o sobre la superficie del agua en el caso de las macrófitas) todo el material que se encuentre dentro de la subparcela o cuadrante definido para tal fin.

Biomasa no arbórea subterránea (BNAS): comprende la vegetación arbustiva, cuya estimación se hace mediante el método indirecto. Para la presente propuesta de Protocolo se propone realizar la estimación en la vegetación acuática exclusivamente; con este propósito, se separa el sistema radicular de las macrófitas de la muestra cosechada para el ítem anterior (su medición no es obligatoria).

Materia Orgánica Muerta

Contempla la biomasa muerta (hojarasca o mantillo) en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (Yepes et al., 2011). Para su medición, se emplea también el método directo, considerando el material que se encuentre sobre el suelo.

Tabla 20. Definición de variables para la determinación de biomasa en cobertura tipo bosque, no bosque y MOM.

Depósito de carbono	Variable	Tipo de variable	Revisión ecuaciones alométricas (factor de expansión)
Biomasa aérea arbórea (BARA)	DAP	Independiente	Modelo para bosques secos tropicales (Chave et al., 2014). Modelo para bosques tropicales de Colombia (Álvarez et al., 2012). Modelos alométricos especie (género) – específicos.
	Altura Densidad de madera	Dependiente	
Biomasa arbórea subterránea o radicular (BARS)	Altura, DAP o BA (biomasa aérea)	Variables predictivas	Ecuación pantropical (Cairns et al., 1997). Bosques tropicales (Yepes et al., 2011). Bosques de pantano tropicales (Kauffman et al., 2016).
Biomasa no arbórea aérea (BNAA)	Peso fresco Peso seco Contenido de C (%)	N/A	N/A
MOM (Hojarasca)	Peso fresco Peso seco Contenido de C (%)		

Fuente: elaboración propia (2024).

Tipo, tamaño, número y diseño de parcelas de muestreo

La parcela es la unidad de muestreo propuesta para cada uno de los estratos, y permite realizar el reporte de las mediciones de los depósitos de carbono por hectárea (Kauffman et al., 2016). Para los humedales del Magdalena Medio y Bajo se recomienda establecer parcelas "semipermanentes", denominadas así debido a que el muestreo debe realizarse por lo menos dos veces al año, teniendo en cuenta la estacionalidad según los regímenes de lluvias y el pulso de inundación de los ríos; por tanto, se necesita que perduren durante esta frecuencia de medición. Otra ventaja de la parcela semipermanente es que su montaje se realiza una vez al año; además, son más precisas desde el punto de vista estadístico para determinar los cambios en las existencias de carbono en los periodos definidos, ya que se mide la misma parcela en los dos momentos (Howard et al., 2018).

De acuerdo con Kauffman et al. (2016), se deben definir parcelas rectangulares de 50 m x 10 m, para un área total de 500 $m^{2.}$ En humedales tropicales el movimiento del personal en campo se dificulta debido a la presencia de agua estancada y zonas pantanosas. Dada esta circunstancia, y cuando existe evidencia de explotación selectiva,

que es el caso de la mayoría de los humedales del Magdalena Medio y Bajo, se suelen utilizar este tipo de parcelas rectangulares para estimar el contenido de carbono, ya que su establecimiento es más eficiente: sus límites son más fáciles de reconocer al estar marcados por líneas rectas con ángulos de 90°; son sencillas de replantear con el empleo de cintas métricas y brújulas; y su localización posterior se facilita al contar con cinco puntos de referencia (cuatro esquinas y el centro). Por lo anterior, las parcelas rectangulares son las recomendadas para el muestreo en tierras medias y bajas de Colombia (Rangel-Ch y Velázquez, 1997).

Es importante mencionar que la parcela debe establecerse de manera perpendicular a la orilla: desde esta hacia la zona de pantano (zona de transición) y de ribera (llanura aluvial). Así, realmente se incluye la zonificación de la vegetación descrita anteriormente. Además, la parcela se debe delimitar durante la temporada seca (aguas bajas) para fijar los límites de forma adecuada. De no ser posible disponerla desde el inicio de la orilla, en el límite entre esta y la superficie del agua, se recomienda desplazarla unos metros hacia el interior (alejándose un poco de la superficie de agua), hasta encontrar una zona donde se puedan fijar las estacas para demarcarla, y monitorear la vegetación acuática ubicada en ese límite. A continuación, se exponen sugerencias para establecer las parcelas:

- Se recomienda que las parcelas tengan un diseño anidado que, según Kauffman et al. (2016), permite considerar las variaciones de composición y estructura a través del tiempo. Este diseño consiste en una parcela grande y, dentro de esta, subparcelas más pequeñas, de acuerdo con los parámetros de estudio de la vegetación establecidos por Rangel-Ch y Lozano (1986).
- En la parcela grande se realiza el muestreo de los elementos arbóreos (y estrato arbustivo, según sea el caso), en sentido de las manecillas del reloj.
- Al interior de la parcela se definen dos subparcelas de 25 m^2 para los elementos arbustivos; se aconseja que estas se localicen en el extremo norte de la parcela. También se puede considerar montar cuatro subparcelas para asegurar el muestreo de este tipo de vegetación, ubicando dos en el extremo norte y las dos siguientes contiguas a estas. En caso de que no se encuentren elementos arbustivos de acuerdo con el diseño propuesto, se recomienda realizar el levantamiento de información de este estrato en el área total de la parcela.
- Para el muestreo del estrato herbáceo, se sugiere establecer dos subparcelas de 4 m^2, dispuestas dos o tres metros inmediatamente después de la lámina de agua, en la zona de transición (pantano), en el extremo sur de la parcela.
- Finalmente, se definen dos subparcelas de 1 m^2 para el muestreo de la vegetación acuática que se encuentre sobre el espejo de agua; estas se pueden disponer también en el extremo sur de la parcela.

El diseño elegido debe ser el mismo para todas las zonas de muestreo y durante las dos temporalidades de medición, con el fin de hacer las comparaciones necesarias y asegurar el ajuste en términos estadísticos. Para esto, se recomienda realizar en campo validaciones previas de los sitios de muestreo. Adicionalmente, es necesario definir puntos de referencia y llevar un buen registro fotográfico, que permitan ubicar la parcela durante la segunda medición o en las mediciones posteriores a esta (Figura 24).

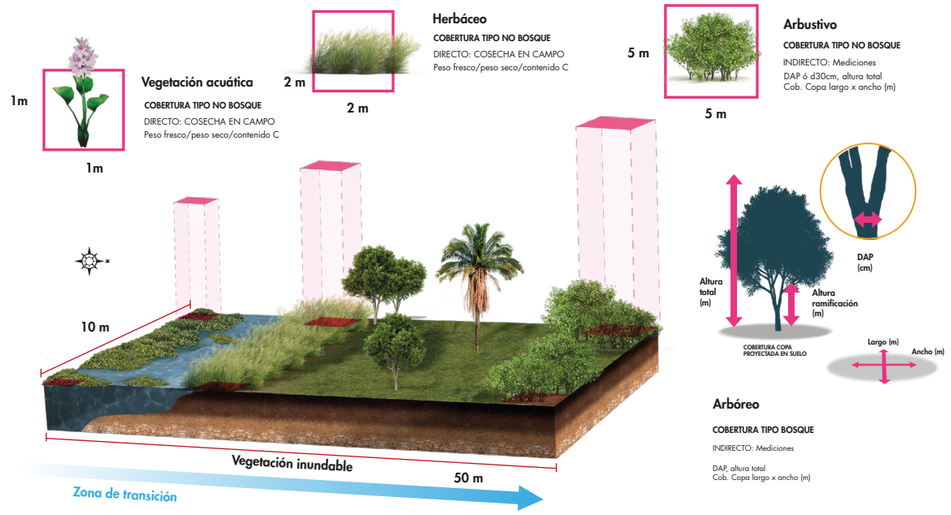


Figura 24. Diseño de la parcela para la estimación de los depósitos de carbono asociados a la vegetación en humedales continentales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

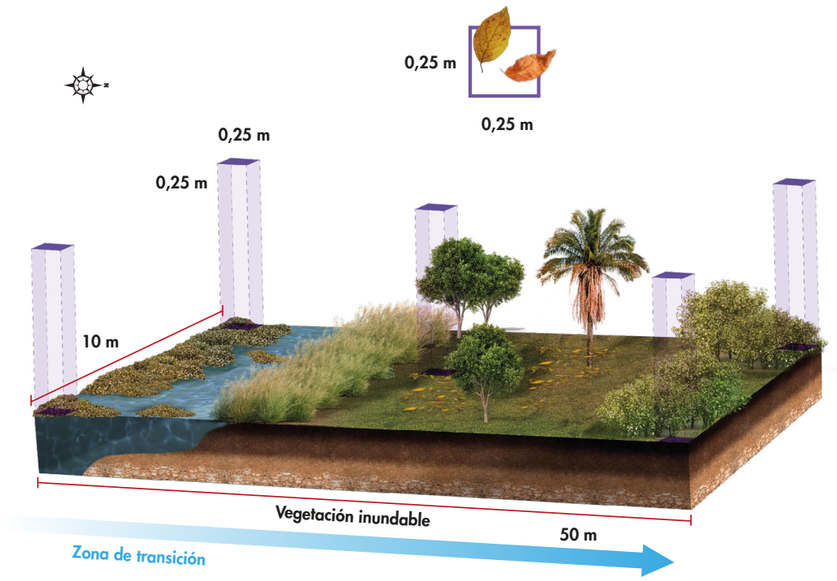


Figura 25. Subparcelas para MOM (hojarasca) en la parcela principal. Fuente: elaboración propia (2024).

Para el muestreo de la MOM se propone establecer dentro de la parcela cinco cuadrantes de 25 cm x 25 cm, ubicados en los cuatro extremos y en el centro (Figura 25).

Frecuencia de las mediciones

Se recomienda realizar las mediciones de los depósitos de carbono seleccionados por lo menos dos veces en el año, teniendo en cuenta la temporada seca y la de lluvias; se realiza el muestreo de la vegetación de tipo bosque y tipo no bosque (arbustivo y herbáceo) durante la temporada seca, cuando es más fácil el movimiento en campo. Por su parte, el muestreo de la cobertura no bosque, asociada principalmente con la vegetación acuática, se realiza durante la temporada de lluvias, cuando se encuentra en su máxima expresión. Adicionalmente, el muestreo de MOM debe hacerse en lo posible en las dos temporadas de muestreo (seca y de lluvias), teniendo en cuenta la dinámica estacional de producción y acumulación de MO en el ecosistema. Esto permite realizar una estimación más certera del almacenamiento de carbono.

La dinámica de acumulación de carbono en el ecosistema, de acuerdo con Hernández (2010) y Kayranli et al. (2010), resulta de la productividad primaria y la acumulación de sustancias húmicas en el suelo. En ecosistemas terrestres, parte de la materia orgánica que cae al suelo se descompone rápidamente, al estar sujeta a condiciones aeróbicas; pero en los humedales esa descomposición es más lenta, debido a las condiciones anaerobias que se dan cuando el suelo está cubierto de agua.

Durante la temporada de lluvias, las zonas de humedal y de transición se encuentran cubiertas de agua y son colonizadas por vegetación acuática; gran parte de ese material vegetal muere y se acumula en el suelo durante la temporada seca. De esta forma, cuando el nivel del agua vuelve a subir, ese material queda bajo la lámina de agua en condiciones anaeróbicas, lo que reduce su tasa de descomposición y puede producir la acumulación de carbono en el suelo; por esta razón, se dice que el potencial de almacenamiento de carbono en humedales es alto. La Figura 26 presenta de manera esquemática esta dinámica; sin embargo, hay que resaltar otros factores que también la afectan, como la temperatura, el pH, el

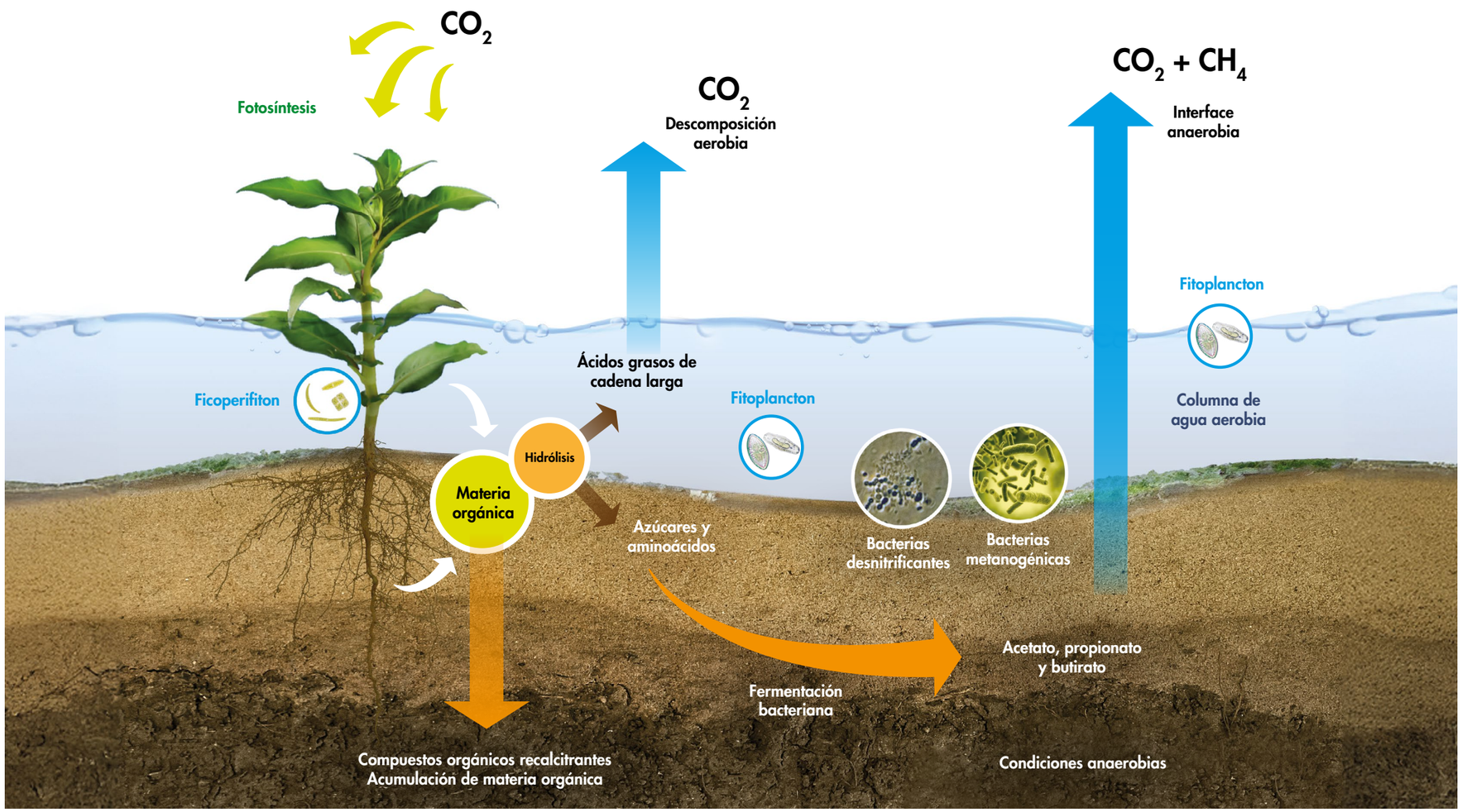


Figura 26. Principales transformaciones de carbono en los humedales.
Fuente: elaboración propia (2024), modificado de Hernandez (2010).

tipo de sustrato, el nivel freático y los pulsos de inundación que promueven la entrada y salida de carbono del ecosistema. Esta situación refuerza la necesidad de realizar el muestreo con la frecuencia propuesta, con el fin de cuantificar el carbono almacenado en la materia orgánica y compararlo con el depositado en el suelo. El muestreo se puede repetir cada dos o tres años, dependiendo de las dinámicas de uso, para identificar las variaciones en los depósitos de carbono que puedan ocurrir por cambios de uso de suelo.

Asimismo, esta frecuencia de muestreo es recomendable para ecosistemas donde se realicen acciones de restauración, pues esto sirve para comprender mejor sus procesos y dinámicas ecológicas y su relación con la captura y almacenamiento de carbono (Kauffman et al., 2013; Kauffman et al., 2016).

Mediciones y toma de muestras

Cobertura tipo no bosque: vegetación acuática

Biomasa aérea

Para estimar el contenido de carbono en este componente, se recomienda trabajar con las especies dominantes en el ecosistema (Palomino y Cabrera, 2008; Medrano et al., 2012; Aldave y Aponte, 2019). En el caso particular de los humedales continentales del Magdalena Medio y Bajo, una de las macrófitas de mayor representación es el buchón de agua *Eichhornia crassipes*, especie de rápido crecimiento y de gran porte que, de no considerarse, por ser una especie flotante libre, podría llevar a una subestimación del potencial de captura de carbono de estos humedales. En ese sentido, otras macrófitas que deben incluirse son las enraizadas con hojas flotantes (EF) y las enraizadas emergentes (EE), como *Ludwigia helminthorrhiza* o *Neptunia oleracea*; las enraizadas en zonas húmedas (EH), como Mimosa pigra; y algunas especies del género *Polygonum*. Para la estimación se utiliza el método directo, también denominado cosecha:

- Se definen dos subparcelas de 1 m^2, para lo que se recomienda utilizar un cuadrante elaborado en tubos de PVC.
- En cada subparcela se cosecha la macrófita más abundante (cobertura entre 50% y 70% en el cuadrante).
- Se lava el material para separar la necromasa y otros elementos que puedan estar adheridos a las macrófitas.
- Se separan también las raíces, las cuales se procesan por separado.
- El material cosechado debe ser pesado en campo para determinar el peso fresco y esta información debe registrarse en un formato dispuesto para ese fin.
- Se recolecta una muestra de peso fresco de 300 g para calcular el peso seco en laboratorio.
- Las muestras recolectadas se almacenan en bolsas plásticas debidamente rotuladas con los datos del sitio de muestreo y la subparcela.
- Finalmente, se registran las demás especies que se encuentren dentro de cada cuadrante y se estima la cobertura de cada especie en términos de porcentaje (Figura 27).

Figura 27. Muestreo de biomasa de la vegetación acuática.
Fuente: elaboración propia (2024).

Biomasa subterránea o radicular

De la muestra cosechada en el paso anterior se seleccionan las raíces, se lavan para separar la necromasa y otro material que pueda estar adherido a ellas, se determina el peso fresco y se separa una submuestra de 300 g, la cual se debe guardar en una bolsa plástica debidamente marcada, para luego calcular el peso seco en laboratorio.

Cobertura tipo no bosque: vegetación de pantano, herbáceas

Biomasa aérea

Se definen dos subparcelas de 4 m^2 y en cada una de ellas las herbáceas se cortan a ras del suelo y se cosechan, separando otros elementos que puedan estar adheridos al material. Dicho material debe ser pesado en campo para determinar el peso fresco; ahí se separa una muestra de 300 g para estimar el peso seco en laboratorio. Esta muestra se almacena y rotula siguiendo las indicaciones de los componentes descritos (Figura 28).

Figura 28. Muestreo de biomasa de herbáceas. Fuente: elaboración propia (2024).

Cobertura tipo no bosque: vegetación de ribera arbustiva

Biomasa aérea y radicular

La determinación de estas biomasas se realiza de forma indirecta con el uso de ecuaciones alométricas. Dentro de las subparcelas de 5 m x 5 m o dentro de la parcela principal, según sea el caso, se deben registrar las especies con DAP <2,5 cm y con alturas entre 1,5 y 5 m. Para cada una de ellas se estima el DAP o el diámetro a 30 cm (d30), la altura total y la cobertura de la copa (ancho por largo en metros).

Cobertura tipo bosque: árboles y palmas

Biomasa aérea y radicular

Esta estimación se realiza empleando ecuaciones alométricas o factores de expansión. Dentro de la parcela de 500 m^2 se deben registrar todas las especies con DAP >2,5 cm y altura mayor a 5 m; para cada una se deben evaluar los siguientes aspectos: (i) el DAP (con una cinta métrica); (ii) la altura total; (iii) la altura de ramificación (puede ser por estimación visual o con la ayuda de una vara graduada); y (iv) la cobertura de copa (ancho x largo) en metros (m), calculando el área proyectada sobre el suelo de la copa de cada individuo (Figura 29).

Todos los ejemplares se marcan, con el fin de realizar las remediciones en los dos o tres años posteriores. Para la marcación se recomienda utilizar placas de aluminio, en las que se debe incluir el número de identificación del individuo dentro de la parcela y se puede indicar el nombre común de la especie.

Figura 29. Muestreo de biomasa de cobertura tipo bosque. Fuente: elaboración propia (2024).

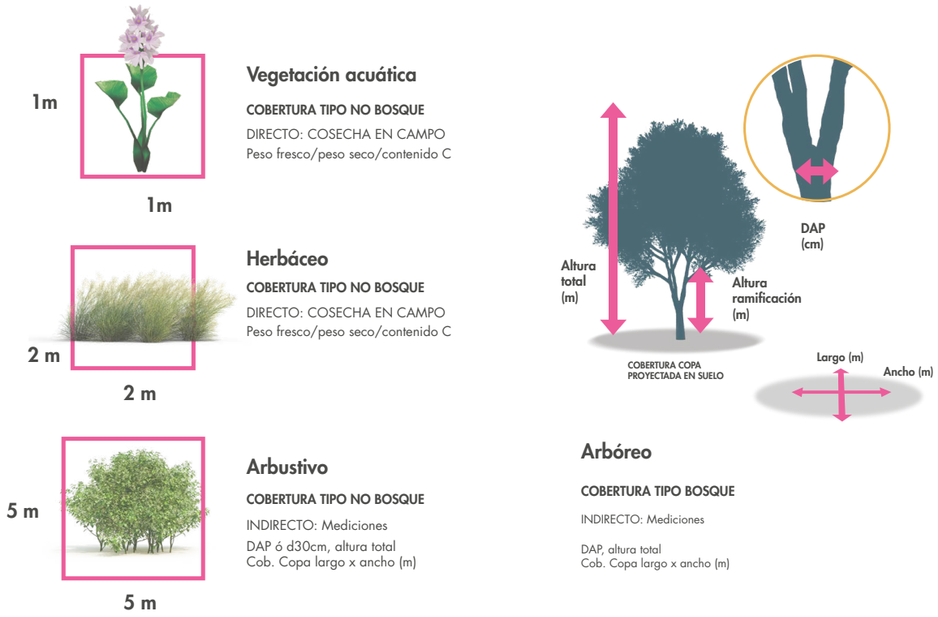


Figura 30. Metodología para el levantamiento en campo de información para la estimación de biomasa arbórea y no arbórea. Fuente: elaboración propia (2024).

Materia Orgánica Muerta (MOM): hojarasca o mantillo

Se establecen cinco cuadrantes de 25 x 25 cm dentro de la parcela, ubicados en los cuatro extremos y en el centro. Se debe combinar todo el material colectado, determinar el peso fresco y separar una muestra (250-300 g) para las posteriores determinaciones en laboratorio (peso seco) (Figura 31).

Figura 31. Muestreo de materia orgánica muerta (MOM).
Fuente: elaboración propia (2024).

Identificación del material botánico

Es una actividad muy importante que permite la correcta estimación de la biomasa y el contenido de carbono; en este caso es necesario generar un inventario de las especies registradas en cada sitio de muestreo para las estimaciones posteriores. Para su desarrollo se recomienda contar con el apoyo de un local conocedor de la flora de la zona, además del profesional experto en botánica, quien realiza la identificación (Figura 32). Asimismo, se sugiere utilizar claves taxonómicas como las de Gentry (1993) y Mahecha-Vega (1997), y otras que el profesional considere adecuadas.

Centello *Vochysia lehmannii*

Figura 32. Identificación del material botánico. Fuente: elaboración propia (2024).

Suelos y sedimentos

El suelo constituye uno de los principales sumideros de carbono, donde este se almacena en formas orgánicas, es decir, el Carbono Orgánico del Suelo (COS), y en formas inorgánicas, asociadas al contenido de carbono en el material parental del suelo y al contenido en la atmósfera de suelo en forma de CO_2. Además, el suelo es un recurso muy vulnerable frente al cambio climático; asimismo, los impactos generados por la intervención y el uso inadecuado de este pueden degradarlo y, con ello, convertir la reserva de carbono en gases de efecto invernadero (GEI).

Para estimar los contenidos de carbono en el suelo, Colombia acogió la metodología proporcionada por el IPCC en sus directrices para Inventarios Nacionales de Carbono y GEI, que conforman el volumen 4 (AFOLU), centrado en zonas de humedales (suelos orgánicos, suelos costeros y suelos minerales de humedales continentales). Por tanto, el país debe reportar estimaciones para la biomasa por encima del suelo, la biomasa subterránea, la madera muerta y restos vegetales, y los productos de madera recolectados (IPCC, 2006).

Clasificación de los suelos para procesos de homologación

Este proceso consiste en ubicar los suelos en categorías definidas dentro de un sistema taxonómico que agrupa características y propiedades homogéneas determinadas por rangos de variación. En Colombia, el IGAC, entidad encargada de realizar los estudios de suelos del país, ha adoptado el Sistema de Taxonomía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA Soil taxonomy), el cual es un sistema de clasificación jerárquico, que toma en cuenta la descripción del perfil de suelo, con sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Por su parte, el IPCC establece un sistema de clasificación orientado al monitoreo de suelos para estimaciones de carbono y GEI (IPCC, 2006).

El primer paso para realizar el proceso de homologación es establecer la relación entre estos dos sistemas de clasificación, con el fin de unificar criterios para que la información a recoger permita realizar las estimaciones de contenidos de carbono en el suelo presente en los ecosistemas de humedal.

Sistema taxonómico norteamericano USDA

Este sistema es jerárquico y clasifica los suelos en seis categorías según su génesis: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Estas categorías permiten adecuar el sistema de clasificación a diferentes tipos de estudio. En Colombia, los estudios generales de suelos (escalas 1:100 000) llegan hasta la categoría de "Subgrupo", mientras que los estudios semidetallados (escalas 1:25 000), a la categoría de "Familia" y los detallados, a nivel de "Serie". Cualquiera que sea el caso, el nombre taxonómico de cada suelo que compone las Unidades Cartográficas de Suelos (UCS) es tomado de los correspondientes estudios de suelos elaborados por el IGAC. A nivel de Orden, los suelos se definen de la manera como se expone en la Tabla 21.

Tabla 21. Clave simplificada de los órdenes de suelos del sistema de clasificación del USDA (SSS, 2010).

Categoría a nivel de orden	Definición general
Gelisoles	Suelos que tienen permafrost o materiales gélicos.
Histosoles	Suelos que no tienen propiedades ándicas en más del 60% en los primeros 60 cm del suelo y están formados por materiales orgánicos.
Espodosoles	Otros suelos que tienen Ap (horizonte superficial) con 85% o más de materiales espódicos, o un horizonte espódico y no tienen propiedades ándicas en 60% o más en los primeros 60 cm de suelo mineral.
Andisoles	Otros suelos con propiedades ándicas en 60% o más en los primeros 60 cm de suelo mineral.
Oxisoles	Otros suelos que tienen horizonte óxico en los 150 cm superiores del suelo mineral, o 40% o más de arcilla en la tierra fina en los primeros 18 cm de suelo mineral y un horizonte kándico en los primeros 100 cm de suelo mineral.
Vertisoles	Otros suelos que tienen un horizonte de 25 cm o más de espesor que tiene slickensides y con 30% o más de arcilla hasta 50 cm de profundidad o más, y grietas que se abren y cierran periódicamente.
Aridisoles	Otros suelos que tienen régimen de humedad arídico y epipedón ócrico o antrópico y alguno de los siguientes horizontes en los primeros 100 cm del suelo: argílico, cálcico, cámbico, gypsico, nátrico, petrocálcico, petrogypsico o sálico, o tienen un horizonte sálico y saturación con agua en alguna capa en los primeros 100 cm del suelo durante un mes o más al año y sin horizonte sulfúrico.
Ultisoles	Otros suelos que tienen un argílico o un kándico con saturación de bases menor a 35% en los primeros 200 cm de suelo o un fragipán.

Categoría a nivel de orden	Definición general
Mollisoles	Otros suelos que tienen un epipedón mólico o un horizonte superficial que cumple los requerimientos del mólico, excepto el espesor.
Alfisoles	Otros suelos que tienen argílico, kándico o nátrico o tiene un fragipán con películas de arcilla.
Inceptisoles	Otros suelos que tienen un cámbico; o condiciones ácuicas en los primeros 50 cm de suelo, o tienen cálcico, petrocálcico, gypsico, petrogypsico, plácico o duripán en los primeros 100 cm de suelo mineral; o tienen fragipán u óxico en los primeros 200 cm de suelo mineral; o presentan un horizonte sulfúrico en los primeros 150 cm de suelo mineral; o con epipedones mólico, plágeno o úmbrico.
Entisoles	Otros suelos.

Sistema de clasificación de suelos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

El IPCC establece un sistema de clasificación orientado al monitoreo de suelos para estimaciones de GEI (IPCC, 2006), que comprende siete tipos de suelos: Humedales, Arenales, Orgánicos, Volcánicos, Espódicos, de Arcillas de Baja Actividad (LAC, por sus siglas en inglés) y de Arcillas de Alta Actividad.

Tabla 22. Clasificación de suelos orientada al monitoreo de suelos para estimaciones de GEI (IPCC, 2006)

Tipo de suelos	Definición general
Arenales	Son suelos con contenidos de arenas mayor a 70% de la fracción mineral de los suelos y contenidos de arcillas menores a 8%. Se incluyen desde vegas y sobrevegas arenosas en zonas inundables de cuerpos de agua lóticos hasta zonas costeras, en manglares. Por su alto contenido de arenas, presentan características como baja capacidad de retención de humedad, altísima infiltración y lixiviación.
Humedales	Son suelos que están saturados la mayor parte del año, con régimen de humedad ácuico.
Orgánicos	Corresponden a suelos de materiales orgánicos, asociados a zonas inundadas con bajo grado de descomposición de los materiales.
Volcánicos	Corresponden a los suelos clasificados como andisoles en la taxonomía USDA. Se presentan principalmente en zonas de alta montaña y en climas fríos. Por su predominancia de arcillas alófanas, forman complejos órgano-minerales y presentan características físicas y químicas específicas y diferentes de los demás suelos minerales, que repercuten no solo en términos de contenidos de carbono, sino también de sustancias contaminantes, y de resistencia o sensibilidad a procesos de degradación ante cambios de coberturas o manejos inadecuados.
Espódicos	Son suelos con arcillas de baja actividad, materiales espódicos y pH ácido.
Suelos con arcillas de baja actividad (LAC)	Son suelos muy evolucionados, con predominios de sesquióxidos de hierro y aluminio y arcillas 1:1, característica que les confiere propiedades como baja fertilidad y, después de los suelos arenales, baja capacidad de fijación de carbono. Por tener muy pocas cargas de intercambio catiónico presentan bajas fijaciones de cationes y alta lixiviación; además, alta acidez y aluminio, por lo cual las coberturas o plantas propias de estos suelos son necesariamente especies tolerantes a estas condiciones.
Suelos con arcillas de alta actividad (HAC)	Son suelos con predominancia de arcillas tipo 2:1, con características químicas y físicas favorables en términos de fertilidad, ya que permiten una mayor posibilidad de intercambio iónico. Esta condición genera más disponibilidad de nutrientes y les otorga fertilidad a los suelos. Tienen un pH cercano a la neutralidad, son ricos en bases y poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico, con moderados a altos contenidos de carbono orgánico. Generalmente están ubicados en valles aluviales recientes.

Propuesta de homologación de suelos para estimación de contenidos de carbono

El proceso de homologación de suelos consiste en validar las propiedades y características de los suelos en cada uno de los sistemas de clasificación, identificando las equivalencias correspondientes.

Con este proceso, se busca unificar criterios y definir las categorías de suelos para el monitoreo de contenidos de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo del país. Debido a que el sistema de tipos de suelo del IPCC es muy general para las condiciones de países tropicales como Colombia, se plantea clasificar los suelos de acuerdo con la siguiente propuesta de homologación:

- Se inicia con la definición de los suelos de acuerdo con el material de origen; en este caso, las equivalencias directas para los humedales del Magdalena Medio y Bajo son las que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 23. Detalle para la definición del suelo según su material de origen.

Material de origen (parental)	Orden de suelos (USDA)	Tipo de suelos (IPCC)
Orgánico	Histosoles	Suelos orgánicos
Volcánico	Andisoles	Suelos volcánicos

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 24. Orden de los suelos para procesos de homologación.

Orden de suelos (USDA)	Propiedad específica	Tipo de suelos (IPCC)
Entisoles Inceptisoles	Textura gruesa (>70% arena)	Suelos arenales
	Textura finas, muy finas o moderadamente finas (<70% arena)	Otros suelos Minerales
	Régimen de humedad ácuico	Suelos de humedales

Fuente: elaboración propia (2024).

- Para los órdenes de suelo Entisoles e Inceptisoles (USDA), la homologación se realiza teniendo en cuenta lo que expone la Tabla 24.
- Posteriormente, se establece el tipo de arcillas que presentan los suelos. En este contexto se identifican dos tipos: (i) arcillas de alta actividad (2:1), que definen suelos con arcillas de alta actividad HAC (por sus siglas en inglés) y generan alta nutrición y fertilidad; (ii) arcillas de baja actividad (1:1), para suelos con arcillas de baja actividad LAC (por sus siglas en inglés) y que se encuentran en suelos muy evolucionados, de pH ácidos y baja fertilidad.

Tabla 25. Tipos de arcillas para procesos de homologación de suelos.

Tipo de arcilla	Orden de suelos (USDA)	Tipo de suelos (IPCC)
Arcillas de alta actividad	Molisoles Vertisoles Alfisoles Aridisoles	HAC
Arcillas de baja actividad	Ultisoles Oxisoles	LAC

Fuente: elaboración propia (2024).

- Entre los suelos con arcillas de baja actividad, hay un tipo particular que además presenta sustancias amorfas iluviales (producto de lavado intenso) compuestas de materia orgánica y aluminio (Al), con o sin hierro (Fe), denominado material espódico. En este caso, la equivalencia es Espodosoles (USDA) con suelos Espódicos (IPCC).

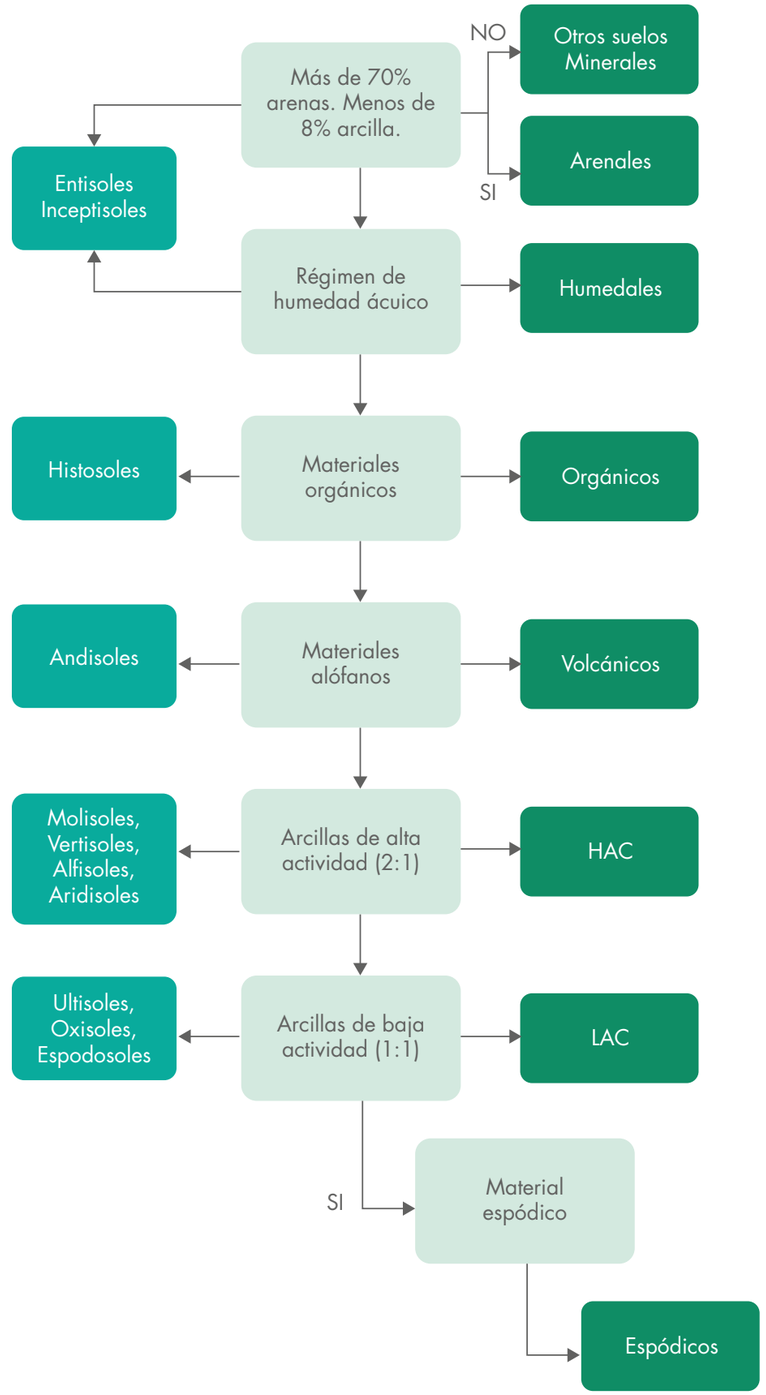


Figura 33. Propuesta de homologación de suelos USDA-IPCC. Fuente: elaboración propia (2024).

- De acuerdo con la taxonomía americana (USDA), el orden de suelos Gelisoles corresponde a aquellos que tienen materiales gélicos, es decir, están congelados hasta su máxima profundidad en algún momento del año. Estos suelos solo se pueden desarrollar en zonas templadas donde la época de invierno permite la condición del material; en zonas tropicales no se da a este tipo de suelo ya que, en alta montaña, por ejemplo, solo se presenta congelamiento en los primeros centímetros del suelo.

A continuación, se resume la homologación realizada para la propuesta de Protocolo con base en los requerimientos para definir los suelos según el IPCC; esta, por ser más general, puede agrupar varias de las clasificaciones de suelos definidas por USDA a nivel de orden, que es la jerarquía más general de este sistema (Figura 33).

Tabla 26. Propuesta de homologación de suelos para el Protocolo de estimación de contenidos de carbono.

Orden de suelos (USDA)	SIGLA USDA	Propiedad determinante	Tipo de suelos (IPCC)	Código IPCC
Histosoles	IST	Orgánico	Suelos orgánicos	O
Entisoles Inceptisoles	ENT EPT	Textura gruesa (>70% arena)	Suelos arenales	AR
		Textura finas, muy finas o moderadamente finas (<70% arena)	Otros suelos minerales	OM
		Régimen de humedad ácuico	Suelos de humedales	H
Molisoles	OLL	Arcillas de alta actividad	Arcillas de alta actividad	HAC
Vertisoles	ERT			
Alfisoles	ALF			
Aridisoles	ID			
Ultisoles	ULT	Arcillas de baja actividad	Arcillas de baja actividad	LAC
Oxisoles	OX			
Espodosoles	OD	Arcillas de baja actividad con material espódico	Espódicos	OD
Gelisoles	EL	Suelos congelados hasta su máxima profundidad en algún momento del año	En condiciones tropicales no es posible su desarrollo	

Fuente: elaboración propia (2024).

Variables de monitoreo de suelos y sedimentos para estimación de contenidos de carbono en humedales

Densidad aparente (Den_Apa) del suelo

Se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo. Por tanto, esta medida depende de la organización que presente la fracción sólida del suelo y está afectada principalmente por su textura, estructura, contenido de materia orgánica, humedad (en especial en suelos con materiales expansivos) y grado de compactación. La densidad aparente del suelo esta inversamente relacionada con su porosidad.

Carbono orgánico del suelo (COS)

Se estima en un laboratorio especializado mediante métodos como combustión seca o en húmedo, que determinan el porcentaje de carbono orgánico del suelo. El método de combustión seca (Walkley-Black) es el más usado para esta determinación. Para el cálculo de COS en términos de toneladas por hectáreas se tiene en cuenta el espesor de los horizontes, la densidad aparente y un factor de corrección por fragmentos de roca (FAO, 2020). Debido a que este indicador es determinante para las estimaciones de GEI, y con el fin de estar en sinergia con la información establecida para el sector AFOLU, se propone incluir los ajustes que este grupo viene considerando, como el factor de corrección por contenido de raíces y materia seca y la toma de muestras por horizonte.

Materia orgánica del suelo (MOS)

El contenido de la MOS se determina por métodos indirectos asociados con la conversión de COS. Soil Survey Laboratory (SSL, 1996) recomienda utilizar un factor de corrección igual a 1,724, se asume que la materia orgánica tiene 58% de carbono orgánico. El MOS se calcula entonces mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 28. Cálculo de la materia orgánica del suelo.

$$MOS\ (\%) = COS\ (\%)\ x\ 1{,}724$$

Donde:
MOS: materia orgánica del suelo expresada en porcentaje
COS: contenido de carbono orgánico del suelo expresado en porcentaje, determinado por el método de Walkley-Black

Textura

Es una propiedad fuertemente dependiente del material parental del suelo, que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas (sedimentos) de diámetro menor a 2 mm, llamadas tierra fina. Estos sedimentos se agrupan en tres clases, según el tamaño: arena (A), limo (L) y arcilla (Ar). Si bien la textura es una propiedad de los suelos, para la propuesta de Protocolo se propone identificar la textura de los sedimentos ribereños y de aguas bajas, a fin de establecer si han desarrollado algún proceso de transformación de materia orgánica.

Tabla 27. Variables a monitorear para estimar los contenidos de carbono en suelos y sedimentos

Propiedad del suelo	Método	Compartimento	Profundidad (cm)
Densidad aparente (DA)	Cilindro	Suelos	0-25 25-50
Carbono orgánico del suelo (COS)	Walkley-Black		
Materia orgánica del suelo (MOS)	Ecuación de conversión	Sedimentos	Fondo del cuerpo de agua o superficie de afloramientos
Textura Arena (A) Limo (L) Arcilla (Ar)	Hidrómetro de Bouyoucos		

Fuente: elaboración propia (2024).

En cuanto a la profundidad definida para cada una de estas variables, y dado que se trata de estimar el contenido de carbono almacenado en suelos, se propone realizar dos mediciones de COS y densidad aparente: la primera a una profundidad de 0 a 25 cm y la segunda entre 25 y 50 cm. En el primer caso, dada la exposición a la superficie y el aporte de materiales orgánicos provenientes de la zona, la mayor actividad orgánica se presenta en los centímetros del suelo más superficiales; así, el contenido de carbono orgánico a esta profundidad se asocia con materiales frescos con bajo grado de descomposición que no se han incorporado a la estructura evolutiva del suelo. En la segunda medición, realizada entre 20 y 50 cm, hay un mayor grado de descomposición y formación de sustancias húmicas, que constituyen el sumidero de carbono de los suelos.

Para zonas de sedimentos se mide el COS y la textura, teniendo en cuenta que estos materiales no constituyen desarrollo de suelos. La estimación de la densidad aparente no aplica, ya que se considera que no hay acumulación de carbono orgánico. En cambio, en el caso de sedimentos a borde de agua, si proceden de suelos inundados, la descomposición de la materia orgánica se activa por la presencia de agua y, en este caso, la medición de COS constituye un parámetro de comparación e interpretación de la posible cantidad de emisiones bajo estas condiciones.

Mediciones y toma de muestras

Selección de los puntos de muestreo para validación en campo

Una vez se tiene la información básica de la zona de estudio, se realiza la homologación de la clasificación de suelos, integrando la homologación de suelos USDA-IPCC con las unidades de vegetación, cobertura y uso del suelo. A partir de la información generada por los componentes estadísticos, SIG, suelos y biomasa, se deben identificar los polígonos seleccionados mediante la aleatorización para hacer el muestreo. Con los polígonos definidos, se programa la salida de campo para verificar la viabilidad del muestreo (facilidad de acceso a los sitios, tanto en la temporada seca, aguas bajas, como en la de lluvia, aguas altas), validar los usos del suelo y establecer algunas consideraciones para tener en cuenta en el momento de la toma de muestras (organización de grupos de trabajo para la fase de muestreo).

Muestreo de suelos y sedimentos

Los sitios de muestreo de suelos se definen dentro de las parcelas establecidas para el muestreo de biomasa aérea (Figura 24) mediante el sistema de cajuela. Para los sedimentos, se toma una muestra a borde de agua, también asociada con las parcelas de muestreo para vegetación acuática. En ambos casos se deben realizar al menos tres repeticiones en cada sitio (IGAC, 2017).

Cajuela: *Excavación de forma cúbica que se realiza en el suelo para identificar las características morfológicas de los primeros horizontes en sus tres dimensiones, largo, alto y ancho (50 x 50 x 50 cm), la cual se asemeja a una caja pequeña.*

En cada sitio se deben extraer las muestras de suelo de acuerdo con las profundidades establecidas (0-25 y 20-50 cm). Para evaluar el COS y la textura se requiere tomar al menos 1 kg de muestra que se empaca en una bolsa hermética debidamente etiquetada con código de suelo (homologación), número de repetición y profundidad. Las muestras de sedimentos bajo cobertura de agua se toman usando una draga Eckman.

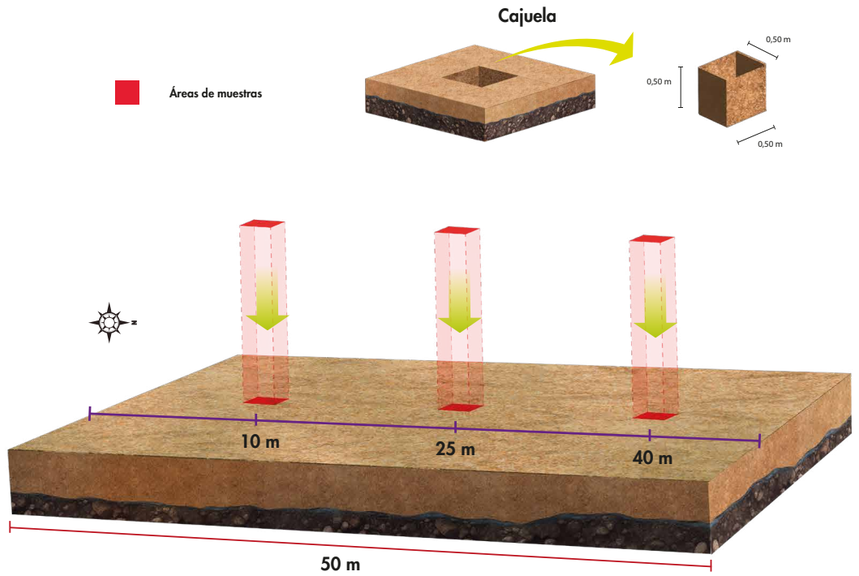


Figura 34. Detalle de la parcela y ubicación de los sitios de muestreo, a: suelos y b: sedimentos. Fuente: elaboración propia (2024).

Densidad aparente del suelo

Para determinar la densidad aparente, las muestras de suelo se toman utilizando cilindros de volumen conocido, específicos para este tipo de procedimiento. Estas muestras se toman para cada profundidad seleccionada, se depositan en bolsa independiente y etiquetada, y se incluyen con la muestra de suelo para COS y textura (Figura 35).

Figura 35. Técnica para tomar muestras de densidad aparente del suelo. Fuente: elaboración propia (2024).

Las muestras obtenidas deben ser enviadas al laboratorio para su respectivo análisis. Solo si se requiere alguna observación adicional se usa el sistema de barrenado, que es para suelos que están a mayor profundidad.

La densidad aparente indica la masa del suelo en relación con el volumen ocupado, que incluye el espacio poroso presente en este. Por tanto, dicha estimación es determinante para establecer el contenido de carbono en el suelo, ya que permite establecer su volumen.

Ecuación 29. Cálculo para estimar la densidad aparente del suelo.

$$DA = MS / VS$$

Donde:
DA: densidad aparente (g/cc)
MS: masa del suelo (g)
VS: volumen total del suelo (cc)

Cuando hay suelos con alguna limitación en profundidad, que impidan la toma de muestras para la determinación de la densidad aparente, se recomienda aplicar el modelo definido por el IGAC y el IAvH (2018), en el que, con base en la caracterización de un total de 929 perfiles de suelos, se realiza la correlación de la textura analizada por el método de Bouyoucos y se establece la siguiente ecuación para obtener la densidad aparente de los suelos:

Ecuación 30. Cálculo para estimar la densidad aparente del suelo, recomendada cuando hay limitaciones para la toma de muestras.

$$Den_Apa = 1.331 + 0.001\ A - 0.070\ COS$$

Donde:
Den_Apa: densidad aparente del suelo en g/cc
A: contenido de arena en el suelo en porcentaje (%)
COS: contenido de carbono orgánico del suelo en porcentaje (%)

Mono aullador (Alouatta seniculus) del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fotografía: Nathalie Morales.

Biodiversidad

Los ambientes dulceacuícolas vinculan la vegetación, los suelos, la atmósfera y los océanos a través del ciclo biogeoquímico del carbono, por lo que, pese a que solo representan una pequeña parte de la superficie terrestre, estos sistemas juegan un importante papel en el flujo global de este elemento. Las estimaciones indican que los sistemas de agua dulce transportan, transforman o almacenan aproximadamente 2,7 Pg de carbono al año (1 Pg = 109 toneladas métricas), lo que representa un ~60% de la producción primaria neta de los ecosistemas terrestres (Cole et al., 2007; Lohse et al., 2009; García, 2019). La producción primaria acuática (realizada principalmente por organismos autótrofos, como las algas y la vegetación acuática) aporta otra buena parte del carbono que sostiene a las tramas tróficas acuáticas (fuentes autóctonas) (Wetzel y Likens, 2000; García, 2019). En este contexto, es incuestionable que cualquier cambio en el equilibrio entre la absorción de CO_2 a través de la fotosíntesis (realizada por los organismos autótrofos), y su liberación mediante la respiración (principalmente de los organismos heterótrofos), afecta sus concentraciones, que se transforman, almacenan o emiten. Por tal razón, el reto de predecir las respuestas de los ecosistemas al cambio climático se basa en la comprensión de los múltiples procesos que se desarrollan a través de los niveles tróficos y en cómo estos interactúan con varios elementos ambientales. Además, estos aspectos ayudan a entender los mecanismos que subyacen a la complejidad de los ecosistemas en diferentes escalas de tiempo (Anderson-Teixeira et al., 2012).

Variables biológicas propuestas para el monitoreo

Dado que la diversidad de las funciones ecológicas de los conjuntos de especies que contienen los humedales determina la funcionalidad de estos sistemas ecológicos como un todo (Andrade, 2014), para identificar, caracterizar y establecer sus procesos biológicos, ecológicos y sociales, es necesario contemplar tanto la biota acuática como semiacuática (o anfibia), cuya dinámica se integra con la de las variaciones ambientales, físicas y químicas de estos ecosistemas. Por esta razón, para el análisis de la biodiversidad se proponen los siguientes grupos:

- **Plancton:** se plantea considerar grupos como fitoplancton (incluye algas procarióticas y eucarióticas), zooplancton y bacterioplancton. Sin embargo, en el piloto de validación de esta propuesta de Protocolo no se consideró el bacterioplancton, razón por la cual no se presenta una propuesta metodológica para este grupo.
- **Ficoperifiton:** incluye algas procarióticas y eucarióticas.
- **Macroinvertebrados acuáticos:** asociados a macrófitas y a bentónicos.
- **Peces.**

- **Macrófitas:** incluye plantas estrictamente acuáticas y semiacuáticas.
- **Fauna terrestre:** cuya dinámica se asocie con los humedales; por ejemplo, anfibios, reptiles, aves y mamíferos.
- **Vegetación arbórea inundable:** se sugiere enfocarse principalmente en el estrato arbóreo (DAP >2,5 cm y una altura mayor a 5 m).

Además, en concordancia con las recomendaciones de Proclima (2021) y teniendo en cuenta que las directrices del IPCC para los inventarios de GEI consideran tres niveles metodológicos (siendo el Nivel 1 el más básico e indispensable y el Nivel 3 el de mayor detalle y exhaustividad), en esta propuesta las variables a analizar para el levantamiento de la línea base de la biodiversidad y las posteriores observaciones en los humedales en los que se realice el monitoreo de carbono y GEI y/o se efectúen acciones tendientes a la reducción de emisiones de GEI se categorizan de la misma manera.

Variables Nivel 1

Se analiza la composición y estructura de los grupos biológicos considerados, excepto para el bacterioplancton. Este análisis incluye:

- Listados taxonómicos: en lo posible, a nivel de especie para las macrófitas, los vertebrados y la vegetación arbórea inundable; y a nivel de género para los macroinvertebrados, el zooplancton y las algas planctónicas y perifíticas.
- Abundancia y abundancia relativa por taxón: densidad, abundancia o cobertura.
- Riqueza taxonómica e índices de riqueza, diversidad, dominancia y equitatividad para cada grupo biológico.
- Principales aspectos ecológicos de las especies o grupos.
- Estructura vertical y horizontal de la vegetación inundable; los datos para generar esta información provienen de las parcelas definidas para el muestreo de biomasa.

Adicionalmente, para las macrófitas, vertebrados (por ejemplo, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos) y la vegetación arbórea inundable, se propone analizar los aspectos biogeográficos de cada especie (nativa, endémica, introducida, invasora, naturalizada, etc.) y su categoría de conservación (vulnerable, amenazada, en peligro, etc.) y, particularmente para los peces, la biomasa y la talla. Así mismo, para la vegetación arbórea inundable se deben registrar las especies propias de bordes de cuerpos de agua (por ejemplo, manglares de agua dulce y especies como *Coccoloba densifrons, Bactris guineensis, Triplaris americana, Ruprechtia ramiflora, Astronium graveolens* y *Phyllanthus elsiae*, entre otras). Para eso, hay que consultar los listados de especies nativas registradas en el área del humedal a considerar.

Variables Nivel 2

- Para las macrófitas, los grupos de vertebrados y la vegetación arbórea inundable se propone establecer los aspectos comerciales, el valor de uso y/o la importancia cultural de las especies en el área del humedal.
- De igual manera, cuando aplique, describir los hábitos migratorios de las especies encontradas.
- Para el bacterioplancton, se plantea calcular la biomasa.
- También se recomienda incluir los análisis de producción o productividad primaria.

Variables Nivel 3

- Se considera el cálculo de la biomasa algal (fitoplancton y ficoperifiton), del zooplancton y los macroinvertebrados (asociados a macrófitas y bentónicos).
- Para la vegetación arbórea inundable se propone establecer la estructura vertical (altura de dosel y cobertura: cálculo del área proyectada sobre el suelo en m^2 expresada en porcentaje) y horizontal (área basal y clases diamétricas). Los datos para generar esta información provienen de las parcelas definidas para el muestreo de biomasa.

La Tabla 28 resume las variables generales y por grupo biológico propuestas para cada nivel planteado.

Tabla 28. Variables biológicas propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo.

Grupo biológico	Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Fitoplancton, ficoperifiton, zooplancton y macroinvertebrados	Composición y estructura	X		
	Principales aspectos de la ecología de las especies (taxones o grupos)	X		
	Biomasa			x
Peces, macrófitas, fauna terrestre (anfibios, reptiles, aves, mamíferos) y vegetación arbórea inundable	Composición y estructura	X		
	Principales aspectos de la ecología de las especies	X		
	Aspectos biogeográficos	X		
	Categoría de conservación	X		
	Aspectos comerciales, valor de uso y/o importancia cultural		x	
	Hábitos migratorios (cuando aplique)		x	
Peces	Biomasa y talla	X		
Vegetación arbórea inundable	Listado de especies arbóreas propias de zonas de inundación (por ejemplo, mangles de agua dulce y otras especies de bordes de cuerpos de agua)	X		
	Estructura vertical y horizontal			x
Bacterioplancton	Biomasa		x	
	Producción primaria		x	

Fuente: elaboración propia (2024).

Variables complementarias propuestas para el muestreo

Con el objeto de lograr una caracterización adecuada de los humedales y de las dinámicas ambientales que influencian la ecología de la biota acuática, también se propone el análisis complementario de algunas variables hidrológicas, físicas, químicas, geomorfológicas y de gestión (Tabla 29). Además, se plantean algunos métodos para el levantamiento de dichas variables, sin que ello constituya una forma restrictiva para su muestreo y/o análisis.

Tabla 29. Variables complementarias propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo.

Tipo de variable	Variable	Método	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
SIG	Área total de la superficie de agua	Sensores remotos, fotografía aérea y batimetría, entre otros	x		
	Cobertura de la tierra/ Usos del suelo		X		
Hidrológica	Morfometría	Batimetría			X
	Volumen total				X
	Profundidad total	Medición *in situ*		X	
	Tasa del flujo del agua				X
Física	Transparencia Secchi	En la columna de agua mediante disco Secchi		X	
	Temperatura del agua	Perfil hasta el fondo: cada 50 cm hasta el límite de la zona fótica y cada metro hasta 50 cm antes del fondo		X	
	Conductividad eléctrica			X	
	Turbiedad	3 zonas: fótica/intermedia /50 cm antes del fondo		X	
	Temperatura ambiente	Dato en línea/medición directa			X
Química	Oxígeno disuelto y/o porcentaje de saturación	Perfil hasta el fondo: cada 50 cm hasta el límite de la zona fótica y cada metro hasta 50 cm antes del fondo		X	
	pH			X	
	Potencial Redox				X
Química	Carbono orgánico total	Al menos subsuperficial. Se recomienda en 3 zonas: fótica/ intermedia/50 cm antes del fondo, según la profundidad del cuerpo de agua		X	
	Demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO)			X	
	Fósforo total y/o Ortofosfatos			X	
	Nitrógeno total, Nitritos y/o Nitratos			X	
De gestión	Actividades de mantenimiento y gestión	Reporte por corporaciones, empresas o instituciones encargadas			X

Fuente: elaboración propia (2024).

Propuesta metodológica para muestreo de las variables

Tanto el diseño de muestreo como las metodologías propuestas se basan en prácticas estandarizadas internacionalmente, soportadas científicamente y de amplio uso en el territorio nacional para estudios de biodiversidad. Para todos los grupos biológicos y/o las variables a analizar, se recomienda que las metodologías sean ejecutadas por profesionales competentes e idóneos en cada caso.

Diseño de muestreo

Para estimar la producción primaria, se miden las variables hidrológicas, físicas y químicas (profundidad total, transparencia Secchi, temperatura del agua y ambiente, conductividad eléctrica, turbiedad, oxígeno disuelto y/o porcentaje de saturación de oxígeno y pH); se recolectan muestras para los análisis de fitoplancton, ficoperifiton, zooplancton, macroinvertebrados y los análisis físicos y químicos en laboratorio; y se realiza el muestreo de las macrófitas. Se plantea hacer muestreos diurnos en todas las zonas de muestreo acuático.

Los muestreos de peces, anfibios, reptiles y mamíferos se recomienda hacerlos tanto en jornada diurna como nocturna. En tanto, las jornadas de campo para el muestreo de aves se distribuyen en horarios de alta y media actividad de las especies; esto es, en la mañana (aproximadamente entre las 5:30 y las 10 horas) y en la tarde (de las 15 a las 18 horas, aproximadamente). De cada procedimiento se debe realizar un registro fotográfico detallado.

Para la vegetación arbórea inundable se debe utilizar la información de campo recolectada en las parcelas para estimar la biomasa y los contenidos de carbono.

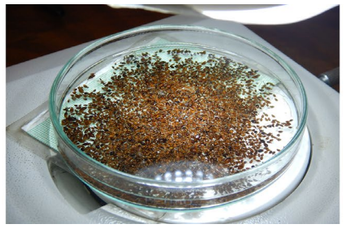
Monitoreo de las variables biológicas planteadas

Los métodos que se proponen a continuación (Tabla 30 y Figura 36) corresponden a los contemplados en el piloto de validación de esta propuesta de Protocolo; estos constituyen alternativas ampliamente validadas que se ajustan a los objetivos aquí propuestos, pero pueden ser modificados según las características de los ecosistemas y el presupuesto de los proyectos, entre otros aspectos. Cabe anotar que los métodos se especifican en función de los niveles presentados para el levantamiento de las variables.

Tabla 30. Métodos propuestos para el levantamiento en campo de las variables consideradas para cada grupo.

Síntesis de los métodos de campo propuestos para el compartimiento de Biodiversidad
Fitoplancton y zooplancton
Muestreo integrado de tres submuestras obtenidas a diferentes profundidades, utilizando botella muestreadora. Se proponen muestras de la zona fótica (por ejemplo, subsuperficie, parte media y límite inferior) para el fitoplancton y de esta misma zona o de toda la columna de agua para el zooplancton.
Ficoperifiton
Muestreo en, al menos, 10 sustratos sumergidos o de la interfase agua-aire (preferiblemente fijos en el área de muestreo), mediante remoción con cepillo; se usan cuadrantes de área establecida (aproximadamente 10 cm^2).
Macroinvertebrados asociados a macrófitas
Muestreo en área litoral con presencia de macrófitas acuáticas, en un cuadrante de 1 m^2 de dichas plantas (preferiblemente sobre las dominantes o de mayor cobertura). Recolección mediante remoción con red triangular y estrujamiento manual.
Macroinvertebrados bentónicos
Se realiza el muestreo en tres puntos, en un transecto entre el área litoral y el área limnética. La recolección se efectúa mediante draga tipo Eckman.
Debido a la necesidad de recolectar muestras para análisis de laboratorio de los grupos de hidrobiota aquí considerados, durante el muestreo se debe tener en cuenta la debida rotulación de los recipientes o empaques necesarios para su embalaje y transporte, así como la fijación y/o preservación de las muestras, utilizando soluciones o reactivos apropiados para cada grupo (por ejemplo, lugol o formalina para los grupos de algas, formalina o solución transeau para el zooplancton, y alcohol al 70% y 90% para los macroinvertebrados asociados y bentónicos, respectivamente).
Peces
Se propone realizar las faenas de pesca mediante artes pasivas (trasmallos: 2 horas al amanecer y 2 en la tarde; nasas y anzuelos: 14 horas que comprendan momentos de luz y oscuridad) y activas (chiles y atarrayas: 30 lances cada uno en un radio aproximado de 300 m). Además, se debe calcular la longitud estándar (LE) y el peso total, y tomar el registro fotográfico de un individuo por especie, que luego se libera* (los peces deben mantenerse en recipientes dotados de sistemas de aireación). *En caso de no lograr la determinación taxonómica en campo, se aplica un protocolo de sacrificio y fijación para su posterior revisión en laboratorio, siguiendo las recomendaciones de Maldonado-Ocampo et al. (2005).
Macrófitas acuáticas
Identificación taxonómica y estimación del porcentaje de cobertura de las especies de macrófitas, mediante observación directa, en un transecto perpendicular a la orilla, conformado por 10 cuadrantes de 1 m^2 (desde la zona limnética hasta la orilla). Modificado de Ramos et al., (2004).
Aves
Detección visual y auditiva mediante recorridos en transectos de longitud variable (dependiendo del tamaño de la cobertura y las condiciones de accesibilidad), utilizando binoculares y grabadora. Registro fotográfico de las especies. Los registros se realizan en las horas de mayor actividad de las aves.
Anfibios y reptiles
Transectos de búsqueda libre intensiva por encuentro visual durante siete (7) horas al día (Lovich et al., 2012; McDiarmid et al., 2012; Heyer et al., 2014): muestreos diurnos de 15:00 a 18:30, centrados principalmente en la exploración visual de los microhábitats disponibles; y muestreos nocturnos de 18:30 a 22:00, consistentes en la exploración visual del suelo y sobre la vegetación y en registros auditivos. Los transectos se pueden complementar con trampas no letales para tortugas semiacuáticas.
Mamíferos
Entre las metodologías planteadas se incluyen fototrampeo, trampeo en redes de niebla y recorridos libres de observación directa y de indicios (huellas, rastros, heces, pelos y rasguños). Además, de manera complementaria, grabadoras para paisaje sonoro. Se recomienda el uso de técnicas no invasivas; es decir, aquellas que reducen el contacto con los animales y permiten obtener información detallada sobre comportamientos, hábitos y periodos de actividad, entre otros aspectos.
Vegetación arbórea inundable
Para el análisis de la estructura vertical se sugiere seguir los planteamientos de Rangel-Ch. y Lozano (1986), según las categorías Arbóreo inferior (Ai) 25-12 m y Arbolito o subarbóreo (Ar) 12-5 m; además, estimar la cobertura relativa. En el caso de la estructura horizontal se plantea el cálculo del área basal y la definición de clases diamétricas, de acuerdo con Rangel y Velásquez (1997).
Producción primaria
Se hace mediante el método del oxígeno (Gaarder y Gran, 1927); se emplean botellas claras para simular la actividad fotosintética y oscuras para simular la respiración acuática. Preferiblemente el muestreo se hace en la zona fótica y, según la profundidad, en una o hasta tres profundidades para la incubación. Periodo de incubación de dos (2) horas.

Fuente: elaboración propia (2024).



Fitoplancton

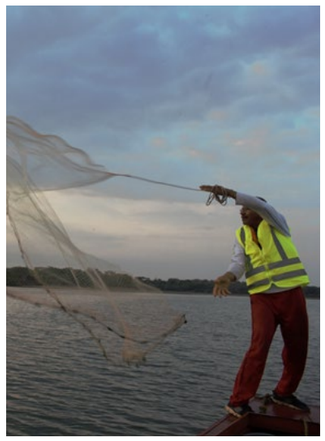
Zooplancton

Ficoperifiton

Macroinvertebrados asociados

Macroinvertebrados bentónicos

Macrófitas



Peces

Aves

Herpetofauna (anfibios y reptiles)

Mamíferos

Estructura vertical y horizontal vegetación arbórea inundable

Producción primaria

Figura 36. Ejemplo de algunos de los métodos de campo propuestos para los grupos y variables biológicos. Fotografías: equipo biodiversidad. Fuente: elaboración propia (2024).

Consideraciones metodológicas para la estimación de flujos de GEI en humedales

Los flujos de emisión de GEI en los ecosistemas incluyen el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), dentro de los cuales el CO_2 es el que mayor flujo genera a la atmósfera. En el suelo, la medición del flujo es producto de la respiración de los organismos que lo habitan (plantas y fauna) y de la descomposición de la materia orgánica disponible. Esta emisión depende, como todo proceso en la naturaleza, de dos variables indispensables para el monitoreo: el tiempo y el espacio, sobre todo en ecosistemas en donde la variabilidad hidroclimatológica y la acción antrópica son muy dinámicas. Existen tres métodos para medir el flujo del carbono: gradiente, cámara de sistema abierto y cámara de sistema cerrado (consultar el Protocolo para medir flujos de GEI) (USAID, 2022).

Tabla 31. Ventajas y desventajas de los métodos de medición del flujo de carbono (Bradford y Ryan, 2008).

Método	Descripción	Ventaja	Desventaja
Del gradiente	Se mide la concentración de GEI a distintas profundidades en el perfil del suelo y se estima el flujo por diferencia de concentración y tasa de difusión de GEI.	Proporciona mediciones a escalas temporales cortas (horas, días, semanas) y largas (meses y años). Permite conocer el flujo a lo largo del perfil e identificar los puntos con mayor producción de GEI.	Los puntos de medición son poco representativos a nivel espacial y el método es costoso al requerir un gran número de mediciones. La tasa de difusión de CO_2 no es igual en todos los puntos, por lo que debe medirse en cada uno.
Cámaras de sistema abierto	Se mide la concentración de GEI del suelo y del aire que sale de la cámara abierta al ambiente; cuando la concentración de GEI en la entrada y salida son iguales, se mide la tasa de flujo del aire al interior de la cámara.	Al estar en contacto con el ambiente refleja de manera más adecuada la dinámica del flujo de carbono del suelo, lo cual es ideal para mediciones continuas en el tiempo.	Necesita equipos grandes y cada medición requiere de varios minutos. Esto dificulta el traslado entre puntos de medición, y es complicado tener una representación espacial adecuada.
Cámaras de sistema cerrado	Se mide el cambio en la concentración de GEI al interior de la cámara cerrada y se calcula el flujo de carbono del suelo; de este modo, se aísla el suelo de la atmósfera.	Las mediciones se realizan de manera rápida, lo cual permite abarcar varios puntos de medición. Pueden realizarse mediciones continuas sobre un mismo punto para evaluar variaciones en el flujo a distintas escalas temporales; para ello hay cámaras automatizadas.	Durante la medición, el aire al interior de la cámara está aislado de la atmósfera y esto puede provocar diferencias en la concentración de GEI o en la presión del aire. Al colocar el anillo se puede perturbar el suelo y obtener mediciones no reales.

El uso de estos métodos depende del objetivo del proyecto y de los compartimientos en donde se haga la medición. Esto conlleva realizar adecuaciones previas tanto en los instrumentos, para una adecuada toma del dato, como en su posterior análisis, con la selección de las ecuaciones para el cálculo del flujo. En cuanto a la matriz agua, se realiza una adecuación a la cámara para que esta pueda flotar sobre la superficie (Figura 37).

Figura 37. Sistema de flotación y amarre para estabilidad de la cámara estática de medición de flujos de GEI en sistemas acuáticos. Fuente: elaboración propia (2024).

En el muestreo del flujo de GEI para la presente propuesta de Protocolo se seleccionó una cámara estática, que junto con el analizador de gases LI-COR (LI-7810), es capaz de proporcionar valores de flujo de GEI a escala local en diferentes compartimientos de monitoreo.

Método de cámara estática

Método dentro del sistema cerrado que consiste en la captura del gas en una cámara cerrada con abertura únicamente sobre la superficie de medición (vegetación, suelo, agua) (Figura 38).

Con este método se mide la tasa de cambio de las concentraciones del gas en un espacio y lapso de tiempo determinados (Megonigal y Schlesinger, 2002; Lovelock et al., 2011). Las cámaras pueden ser fabricadas en varios materiales, como plástico o acrílico; lo importante es garantizar que esta tenga un buen cierre sobre la superficie, a modo de campo de vacío, para evitar la fuga del gas a medir o su intercambio con el exterior.

Figura 38. Ejemplo de instalación de cámaras estáticas sobre suelo, agua y vegetación acuática en humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Adicional a esto, el esquema cerrado permite identificar procesos de respiración o producción de GEI al evitar fugas en el interior. Para medir respiración en el ecosistema (RE), se debe cubrir la cámara a manera de "velo de novia", lo que garantiza la ausencia de luz; mientras que, para medir producción, el sistema debe estar expuesto a la luz solar, de modo que se pueda observar el Intercambio Neto del Ecosistema (NEE), vinculado al metabolismo (Planas, 2018).

Dado que los flujos de gas son muy sensibles a las fluctuaciones de presión, la cámara debe estar ventilada mediante un ventilador que permita un flujo constante, de tal forma que se mantenga el equilibrio de presión entre el interior y el exterior y, así, garantizar una mezcla adecuada sin causar turbulencias ni gradientes de presión (Li-Cor, 2021). Esta metodología es útil para entender el almacenamiento de carbono entre la parte radicular de las plantas, la hojarasca (MOM) y el suelo, como parte del proceso de respiración (emisión de GEI) (Davidson et al., 2002) y permite identificar el RE y NEE y, por tanto, los procesos al interior del sustrato.

De manera preliminar, es necesario medir el intercambio de GEI en el suelo. Con base en esta medición, se determina el cambio en la concentración de los gases en función del tiempo (Butterbach-Bahl et al., 2011). Para eso, se establece el tiempo de medición (intervalo) y el tiempo total del ejercicio; en el caso de analizadores IRGA, se recomienda utilizar intervalos de 10 minutos durante 40 minutos (Díaz, 2018), mientras que para analizadores LI-COR, se sugiere un periodo de 120 segundos (Planas, 2018).

Analizador portátil de gases

Los analizadores pueden medir trazas de gases como CH_4, CO_2 y H_2O de forma estable y precisa con un diseño portátil. Si bien estos analizadores no son económicos, vale la pena su adquisición en proyectos que cuenten con amplios recursos de implementación y, sobre todo, que tengan como eje central la estimación de contenidos de carbono y GEI en ecosistemas estratégicos del país y para sistemas de monitoreo a mediano y largo plazo. Las ventajas de estos analizadores es que tienen un tiempo de respuesta corta (medición cada segundo), alta precisión, desviación menor a 1 ppb en un periodo de 24 horas, una batería de uso superior a ocho horas continuas y lecturas en tiempo real que permiten hacer ajustes para monitoreo en campo. Es importante tener presente que el equipo no puede mojarse, por lo que es recomendable usar un forro altamente impermeable para protegerlo.

Para iniciar la medición, algunos analizadores necesitan alcanzar una temperatura específica en la cavidad de medición entre 52 y 58 °C, por lo que deben ser encendidos mínimo 30 minutos antes de iniciar la toma del dato. El tiempo de duración de la medición recomendada es de entre 3 y 5 minutos, siempre y cuando la cámara esté completamente cerrada y el aire en su interior presente una mezcla estable; en esas condiciones se da inicio a la medición. Para que el proceso sea válido en campo, los resultados deben evidenciar siempre un aumento en la concentración de los gases, así como en el valor del flujo. Los gases se registran en concentración de vapor de agua (ppm), fracción molar de CO_2 en aire seco (ppm) y fracción molar de metano en aire seco (ppb) (Tabla 32).

Finalmente, la concentración de cada gas se determina a través de un algoritmo que compara el espectro de absorción medido con el espectro de alta resolución que se tiene como referencia ('LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual', 2021). El resultado puede observarse en tiempo real al conectar la cámara a través de un celular u ordenador con el software que tiene incorporado el equipo.

Figura 39. Lectura de flujos de carbono en tiempo real. Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 32. Niveles de precisión del analizador de gases portátil LI-COR 7810, usado para el monitoreo de GEI en la propuesta de Protocolo.

Gases traza	Rango de medida	Precisión
CH_4	0,1-50 ppm	0,60 ppb a 2 ppm con una media de 1 segundo 0,25 ppb a 2 ppm con una media de 5 segundos
CO_2	1-10 000 ppm	3,5 ppm a 400 ppm con una media de 1 segundo 1,5 ppm a 400 ppm con una media de 5 segundos
H_2O	100–60 000 ppm	45 ppm a 10 000 ppm con una media de 1 segundo 20 ppm a 10 000 ppm con una media de 5 segundos

Fuente: elaboración propia (2024).

Medidor portátil de CO_2, temperatura y humedad relativa

Los medidores portátiles de CO_2 son usados especialmente para medir la calidad del aire; sin embargo, con el fin de optimizar los recursos para una posible ruta de implementación, en el marco de la propuesta de Protocolo se realizó un ejercicio experimental para medir con ellos el CO_2 del suelo. En este caso, se recomienda usar un contenedor a manera de cámara ubicado directamente sobre el suelo y hacer la medición dentro de este recipiente. Para el monitoreo de GEI en el Protocolo se usó el equipo CO_2 Meter GCH-2018.

Figura 40. Medición en campo de CO_2 y humedad relativa con el equipo CO_2 Meter GCH-2018. Fuente: elaboración propia (2024).

Este medidor portátil de CO_2 tiene una pantalla dual y dos sondas, una para medir CO_2 y temperatura y otra para humedad relativa y temperatura. El medidor de CO_2 tiene un diseño con NDIR (infrarrojo no dispersivo), sensor de tecnología de ondas, que le permite alta repetividad y exactitud en la medición. También cuenta con la función Hold, que fija las lecturas de la medición actual en la pantalla. Asimismo, consta de una función de máximo y mínimo de los datos que se miden y una alarma que se activa cuando se supera el límite de medición fijado en la calibración del equipo (viene calibrado según niveles de calidad del aire). Estos equipos son económicos y de fácil manejo, y ofrecen un resultadoW inmediato, relevante especialmente para zonas donde no se tiene nivel de referencia ni registro de información previa.

Tabla 33. Especificaciones de medición del analizador portátil de gases de sondas, usado para el monitoreo de GEI en la propuesta de protocolo.

Sonda	Gases traza	Rango de medida	Precisión
Sonda de CO_2	CO_2	0-400 ppm	Resolución 1 ppm Exactitud ± 40 ppm para valores menores a 1000 ppm ± 5% para valores entre 1000 y 3000 ppm
	Temperatura	0-50 °C	Resolución 0,1 grados Exactitud 0,8 grados
Sonda de humedad	Humedad relativa	10-95% HR	Resolución 0,1 °C Exactitud ≥ 70% HR 3%+1% HR < 70% HR ± 3% HR
	Temperatura	0-50 °C	Resolución 0,1 grados Exactitud 0,8 grados

Fuente: elaboración propia (2024).

Medidor monitor de gas metano CH_4

El medidor y monitor de gas metano Spd-203 Vetus es un medidor portátil que identifica la concentración de CH_4 para calidad del aire. Su funcionamiento es similar al medidor portátil de CO_2, que mediante una sonda identifica la concentración de metano con las siguientes características:

- Rango de medición 0-10 000 ppm 0-20% LEL (límite inferior de explosividad)
- Resolución 1 ppm, 0,1 LEL
- Exactitud ±2%
- Rango de temperatura de medición 0-50 °C
- Alarma visual y auditiva

Figura 41. Medición de metano CH_4 en campo con el monitor de gas metano Spd203 Vetus. Fuente: elaboración propia.

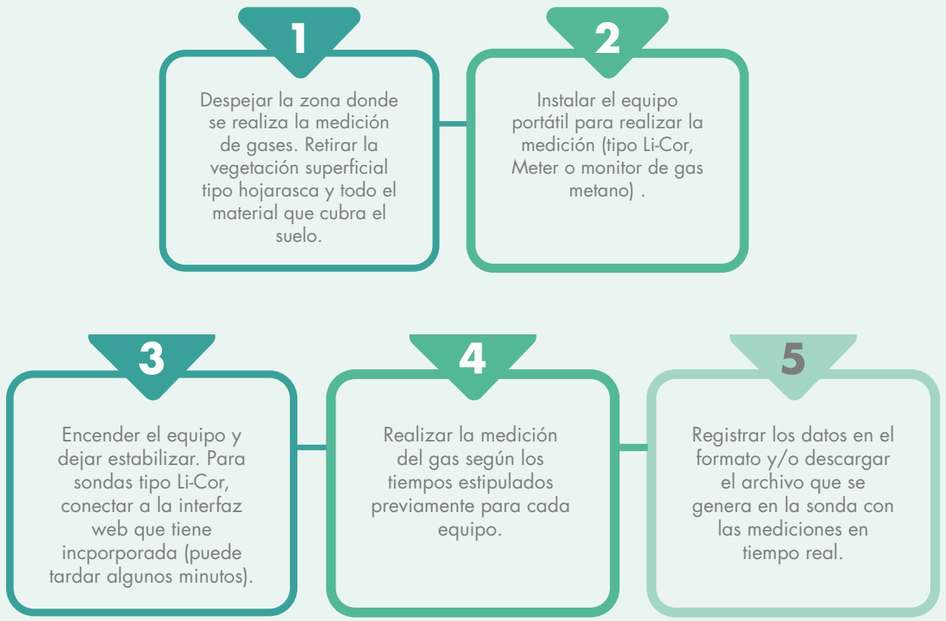
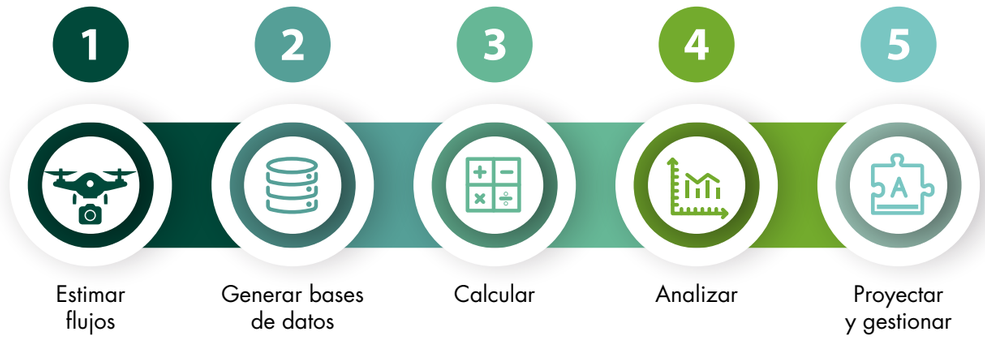


Figura 42. Procedimiento para realizar la medición de flujo y concentración de gases en campo (CO2, metano y vapor de agua). Fuente: elaboración propia (2024).



Etapa de análisis

Estimación del contenido de carbono para los compartimientos de biomasa y MOM

Estimación de biomasa por método directo (cosecha de material)

De las submuestras colectadas en campo de los depósitos de biomasa aérea, radicular y mantillo para cada componente o tipo de vegetación, una de ellas se seca en horno a 60 °C, entre 24 y 72 horas, hasta obtener un peso constante. Para obtener la biomasa del componente se usa la siguiente fórmula:

Ecuación 31. Cálculo para la estimación de la biomasa.

$$BS = (PSm/PHm)\ x\ PH$$

Donde:
BS: biomasa seca (BNAA) del material cosechado en campo (kg)
PSm: peso seco de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg)
PHm: peso húmedo de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg)
PH: peso húmedo del material cosechado en campo

Estimación de biomasa por método indirecto mediante ecuaciones alométricas

En el muestreo de la vegetación arbórea, además de medir el DAP y la altura de cada individuo, es aconsejable determinar, a partir del inventario de vegetación, la densidad de la madera a nivel de especie o género. Para la presente propuesta de Protocolo se recomienda utilizar la base de datos de densidad de madera de árboles del neotrópico de Chave et al. (2006). Teniendo en cuenta estas condiciones, las ecuaciones alométricas propuestas por Chave et al. (2014) y Álvarez et al. (2012) cobran relevancia para la presente propuesta de protocolo (Tabla 34). Adicionalmente, estos modelos son particularmente importantes por dos razones: (i) la zona de proveniencia, ya que la primera ecuación se desarrolló para la zona de vida tropical y la segunda para la zona tropical húmeda de Colombia; y (ii) la zona para la cual se desarrolló el modelo, pues de acuerdo con Brahma et al. (2021), la producción de la biomasa depende de factores como la ubicación y las características edáficas, entre otros.

Tabla 34. Modelos alométricos generales a considerar para la estimación de biomasa áerea de árboles y palmas de humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Fuente: tomado de Chave et al. (2014), Álvarez et al. (2012) y Hughes et al. (1999).

Referencia	Hábito	Ecuación biomasa aérea	Procedencia	Variables que considera
Álvarez et al. (2012)	Árbol	$B=\exp(2.406-1.289 \times \ln(D)+1.169 \times (\ln(D))^2-0.122(\ln(D))^3+0.445\ln(\rho))^6$	Tropical húmedo Colombia	DAP (D), densidad de madera (ρ)
Chave et al. (2014)		$BA=0.0673 \times ((\rho D2) \times H))^{0.97}$	Tropical	DAP (D), densidad de madera (ρ), altura total (H
Hughes et al. (1999)	Palmas	$B=(\exp(3.627+0.5768\ln(H*D^2))) \times 1.02/10^6$	Palmas México	DAP (D), altura total (H)

Al igual que con la biomasa aérea, para la biomasa subterránea o radicular (Tabla 35) se emplea una estimación basada en la relación de variables de crecimiento entre el DAP y la biomasa aérea.

En este caso, se destaca principalmente el modelo propuesto por Cairns et al. (1997), recomendado por autores como Kauffman et al. (2013) y por el IPCC.

Tabla 35. Ecuaciones alométricas generales para estimación de biomasa subterránea.

Hábito	Ecuación biomasa subterránea	Variables	Localidad	Fuente
Árbol	$BS=0.489\ BA^{0.890}$	BA	Bosque tropical. Pantropical	Cairns et al. (1997), citado en Kauffman et al. (2013).
Árbol	$BS= 0.064 \times D^{2.252}$	DAP (D)	Bosques pantanosos. Sumatra (Indonesia)	Suwarna et al. (2012), citado en Kauffman et al. (2013).
Árbol	BS= 0,151 x D1,899	DAP (D)	Colombia San Nicolás (zonas altas, cordillera oriental)	Buitrago et al. (2003), citado en Kauffman et al. (2013).

Fuente: elaboración propia (2024).

Sumado a lo anterior, vale la pena resaltar otros aspectos mencionados por Brahma et al. (2021), quienes aseveran que también es importante considerar los tipos de vegetación y la composición de especies. En este sentido, cobra relevancia el empleo de ecuaciones alométricas especie (o género) específicas. Para esto, se debe recopilar información sobre ecuaciones alométricas, teniendo en cuenta el inventario de especies forestales registrado en el humedal objeto de estudio. Cuando no se encuentren modelos para la especie en particular, se pueden considerar modelos a nivel de género o familia, dependiendo de los recursos económicos y el tiempo disponibles para el proyecto.

Estimación de biomasa muerta (MOM)

Ecuación 32. Cálculo para la estimación de la biomasa muerta (MOM).

$$BM = (PSMOMm/PHMOMm) \times PHMOM$$

Donde:
BM: biomasa de la materia orgánica muerta cosechada en campo (kg)
PSMOMm: peso seco de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg)
PHMOMm: peso húmedo de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg)
PHMOM: peso húmedo del material cosechado en campo

Estimación del contenido de carbono por componente para el compartimiento de biomasa y MOM

Para determinar el carbono orgánico de la biomasa de cada uno de los depósitos definidos con anterioridad, se multiplica la biomasa de cada componente por el factor de conversión de carbono correspondiente (Proclima, 2021). Si se tienen resultados de laboratorio por el método de Walkley-Black, se debe utilizar ese factor.

Según Cisneros-De la Cruz et al. (2021), el factor representa la fracción de carbono orgánico contenido en la biomasa de cada componente. Para esta propuesta de Protocolo se considera el factor ***0,47*** propuesto por Proclima (2021) para la cobertura tipo bosque (y estrato arbustivo). Adicionalmente, se propone un factor de ***0,42*** para la cobertura tipo no bosque (estrato herbáceo), ***0,44*** para la vegetación acuática y ***0,33*** para la materia orgánica muerta (hojarasca, valor que fue obtenido por medio del método de Walkley-Black para cada componente en la ventana de validación realizada en el Complejo Cenagoso Zapatosa; García-M y Andramunio-Acero, 2024). El carbono por componente de la biomasa (kg C/m^2) se estima empleando las siguientes ecuaciones:

Ecuación 33. Cálculo para la estimación del contenido de carbono para la biomasa y la MOM según tipo de cobertura.

Cobertura tipo bosque:

$$C\ bos = [Biomasa\ total\ de\ la\ parcela\ x\ (0{,}47)] / Área\ de\ la\ parcela\ (m^2)$$

Cobertura tipo no bosque (herbácea):

$$C\ no\ bos = [Biomasa\ promedio\ del\ componente\ x\ (0{,}42)] / Área\ de\ la\ subparcela\ (m^2)$$

Cobertura tipo no bosque (vegetación acuática):

$$C\ no\ bos = [Biomasa\ promedio\ del\ componente\ x\ (0{,}44)] / Área\ de\ la\ subparcela\ (m^2)$$

Materia orgánica muerta:

$$C\ MOM = [MOM\ promedio\ del\ componente\ x\ (0{,}33)] / Área\ de\ la\ subparcela\ (m^2)$$

De acuerdo con Cisneros-De la Cruz et al. (2021), el análisis por almacén o componente permite evaluar el aporte de carbono de cada uno y su relación con diferentes procesos ecológicos en el ecosistema (Figura 43).

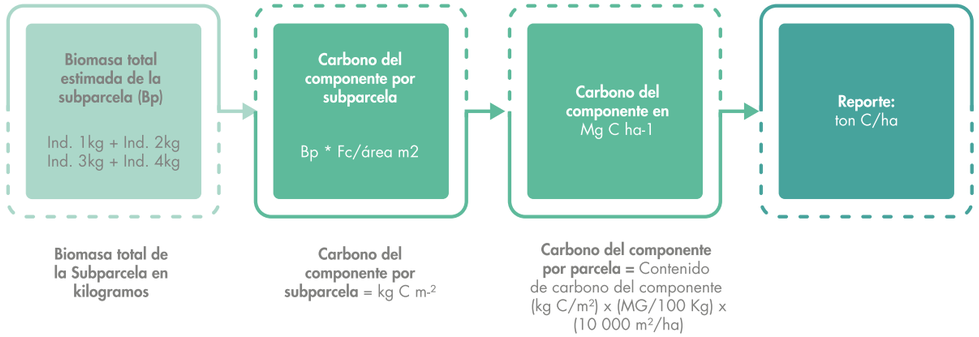


Figura 43. Proceso de estimación de carbono orgánico para los compartimientos de biomasa y MOM. Fuente: elaboración propia (2024).

Estimación del contenido de carbono de las zonas de muestreo

El carbono total contenido en la biomasa viva y muerta de la zona de muestreo se estima sumando el contenido de carbono de cada componente (cobertura tipo bosque, tipo no bosque y MOM). En primer lugar, es necesario convertir el contenido de carbono de cada uno, según el tamaño de la parcela, a unidades empleadas para la evaluación de existencias de carbono (tC/ha). El contenido de carbono total se estima mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 34. Cálculo para la estimación del contenido total de carbono para biomasa.

Adicionalmente, se calcula la desviación estándar para determinar qué tanto se aproximan los datos promedio (Howard et al., 2019). De acuerdo con las recomendaciones de Yepes et al. (2011), el reporte se entrega en toneladas por ha (tC/ha), teniendo en cuenta la cobertura de cada estrato definido, en cuyo caso se reportan los valores promedio y el error estándar (Tabla 36).

Finalmente, es necesario presentar la variabilidad o el error asociado a las mediciones, para lo cual se debe calcular la incertidumbre de los datos.

Componente vegetal del sumidero de carbono (tC/ha) = Contenido de carbono del componente (kg C/m^2) x (Mg/1000 kg) x (10 000 m^2/ha)

Tabla 36. Ejemplo de reporte de contenidos de carbono de la cobertura por zona de muestreo (estrato).

Cobertura	Ton C/ha		
Cultivos	27,34	+	6,41
Forestal	66,33	+	16,59
Pastizal	5,00	+	4,66
OVL	31,08	+	16,88
Humedal	18,7	+	9,48

Fuente: elaboración propia (2024).

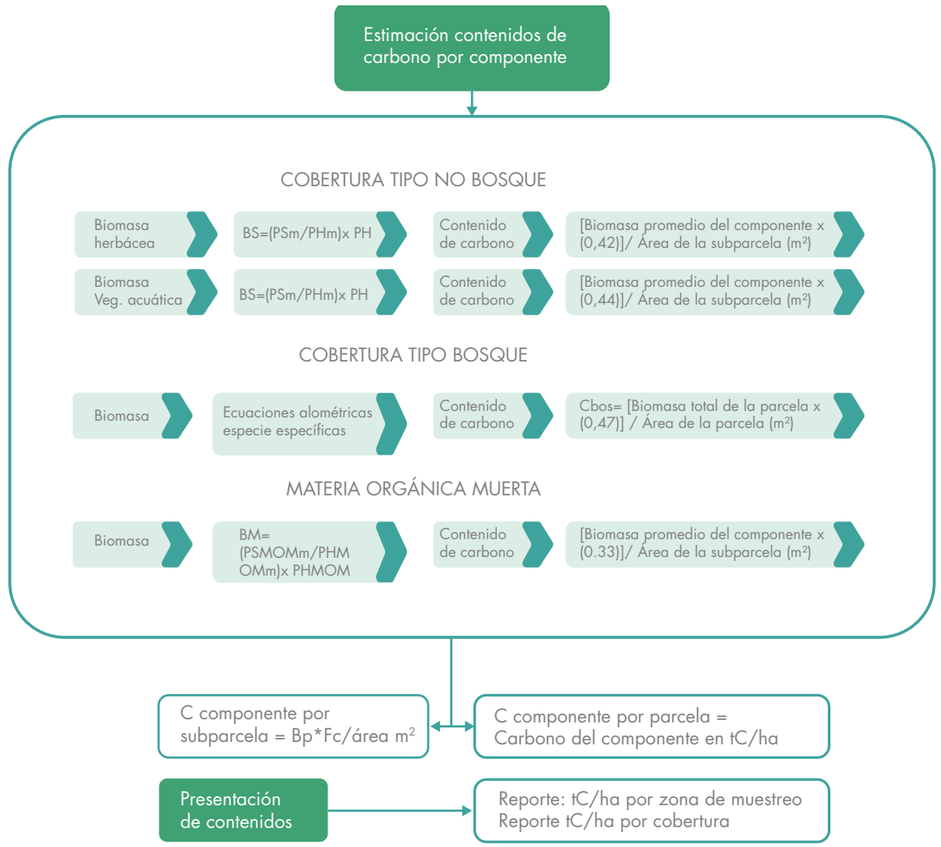


Figura 44. Procedimiento detallado para la estimación de biomasa y contenidos de carbono de cada compartimiento (biomasa y MOM). Fuente: elaboración propia (2024)

Estimación del contenido de carbono para el compartimiento de suelos y sedimentos

Luego de recopilar los resultados de análisis de laboratorio, junto con los datos recolectados en campo, se realiza el análisis de la información, debidamente organizada en bases de datos. A partir de los datos de densidad aparente y teniendo como referencia la profundidad de muestreo, se determina el contenido de carbono orgánico del suelo con la Ecuación 35.

Ecuación 35. Cálculo del contenido de carbono orgánico del suelo.

$$RCOS = Den_Apa * Prof * COS$$

Donde:

RCOS: reserva de carbono orgánico del suelo (t/ha)

Den_Apa: densidad aparente (g/cc)
Prof: profundidad de muestreo-horizonte (cm)
COS: contenido de carbono orgánico del suelo (%)

De acuerdo con la interpretación del contenido de carbono en suelos (según IGAC), se propone el resultado de los análisis en el siguiente rango de proporciones:

COS (%)	Interpretación
<1,2	Bajo
1,2-2,2	Medio
>2,2	Alto

Incertidumbre asociada a estimaciones de contenidos de carbono en los compartimientos de biomasa y suelos

La información del contenido de carbono almacenado en el ecosistema, así como su distribución en las unidades o ZM, es esencial para establecer la planificación de uso del territorio, así como para identificar áreas de importancia ecológica. En este sentido, la fiabilidad de los resultados asociados con estas estimaciones es fundamental para contar con información confiable y veraz que se pueda reproducir en otros espacios a escala regional y nacional.

Los resultados obtenidos de la medición de contenidos de carbono son cuantitativos y constituyen una aproximación a la realidad de la zona estudiada. Sin embargo, las estimaciones presentan una incertidumbre asociada que se puede generar por diferentes errores, en aspectos como el método de colecta de las muestras, las covariables analizadas, errores analíticos o información secundaria de base (Kempen et al., 2012). Desde estas consideraciones, determinar la incertidumbre para los datos obtenidos permite construir modelos del comportamiento espacial del contenido de carbono con datos consistentes, validar el método utilizado para la recolección de datos e identificar zonas que requieren mediciones adicionales.

De acuerdo con el IPCC (2006), en su capítulo 3 sobre incertidumbre, identificar las posibles causas de incertidumbre asociadas a las estimaciones realizadas es una buena práctica. A continuación, se presenta una revisión general de estas causas y su relación con el proceso de validación realizado para la propuesta de *Protocolo de estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* en el CCZ:

- **Falta de exhaustividad:** cuando se usan datos de otras fuentes, por ejemplo, contenidos de carbono en suelos a escala de país, pero que no están disponibles para todas las zonas y, por tanto, existen vacíos de información. No aplica para la ventana piloto de validación, debido a que la estimación se realizó con información primaria (datos recolectados en campo).
- **Uso de modelos:** constituyen una aproximación a la realidad. En este caso, una fuente de incertidumbre son los modelos alométricos empleados para la estimación de biomasa de los elementos arbóreos y arbustivos; sin embargo, se realizó un proceso de selección de modelos teniendo en cuenta las características ambientales de la zona, así como la composición florística de las especies, para tratar de reducir posibles fuentes de error.
- **Falta de datos:** no aplica cuando no existen datos disponibles.
- **Falta de representatividad de los datos:** asociado con la falta de correspondencia entre las condiciones vinculadas a los datos disponibles y las condiciones de la zona evaluada. No aplica para la ventana piloto, dado que las ZM fueron escogidas a partir de un muestreo aleatorio estratificado para asegurar la representatividad de todas las combinaciones (suelos, coberturas) posibles.

- **Error de muestreo aleatorio estadístico:** está asociado con datos que son una muestra aleatoria de tamaño finito, y suele depender de la varianza de la población de la cual se extrae la muestra y del tamaño de la muestra en sí (cantidad de puntos de datos). Este error se puede reducir aumentando la cantidad de muestras independientes tomadas.
- **Error de medición:** se produce en las etapas de medir, registrar y transmitir la información. Para la ventana piloto, las mediciones realizadas, así como el registro en los formatos de campo correspondientes y su transcripción a bases de datos para el procesamiento y análisis de información, se realizaron de forma cuidadosa y exhaustiva, y pasaron por un proceso de revisión con el fin de disminuir este posible error.
- **Generación de informes o clasificaciones erróneas:** se presenta incertidumbre por una definición incompleta, poco clara o errónea. Aplica la misma situación del punto anterior.
- **Datos faltantes:** puede haber incertidumbre cuando se intenta efectuar las mediciones, pero no se obtiene ningún valor. Aplica principalmente para el muestreo de zonas en donde, a pesar de intentar acceder a la parcela, no se logra realizar este muestreo, por ejemplo, por condiciones ambientales.

Para establecer la incertidumbre se toman como referencia las directrices del IPCC (2006), según las cuales mediante el análisis estadístico de los datos de los muestreos se establece la información del terreno. En este caso, la base para estimar la incertidumbre es la información relativa a los errores de las mediciones o del método usado para levantar la información. Es decir, es necesario conocer las medidas de tendencia central (media, mediana o moda) y las medidas de localización y de escala, entre las que están la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el rango intercuartil. Con ellas se procede a realizar el cálculo del error estándar de la muestra evaluada (Ecuación 36), que es indispensable para la estimación del intervalo de confianza.

Ecuación 36. Cálculo del error estándar para el cálculo de la incertidumbre.

$$SE = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde:
SE: error estándar de la muestra
S: desviación estándar de la muestra
n: tamaño de la muestra.

Para calcular el intervalo de confianza *(IC)* de la media con una alta confiabilidad (95 %), se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 37. Cálculo del intervalo de confianza para el cálculo de la incertidumbre.

$$IC = \bar{X} \pm 1.96 \times SE$$

Donde:
$\bar{X}$: valor de la media de la muestra
EE: valor del error estándar de la muestra

Es decir, la media de la población estará con un 95 % de probabilidad dentro de la media de la muestra más o menos 1,96 veces el error estándar.

La incertidumbre se calcula considerando la desviación estándar del promedio, como lo muestra la Ecuación 38.

Ecuación 38. Cálculo de la incertidumbre.

$$U = \pm\left(\frac{1{,}96 \times S_{\bar{x}}}{\bar{X}}\right) \times 100$$

Donde:
U: incertidumbre (%)
$S_{\bar{x}}$: desviación estándar del promedio
$\bar{X}$: valor de la media de la muestra

El rango de incertidumbre de las mediciones de biomasa y suelos, una vez determinadas, se combinan para lograr la estimación de la incertidumbre total para el proceso integrado. Este resultado se obtiene mediante el método de propagación de error, el cual se fundamenta en estimar la incertidumbre de los resultados, con base en el cálculo de la incertidumbre de las categorías individuales, lo que además permite identificar dónde se presenta mayor error (IPCC, 2006). Se utiliza el método 1 – Suma y resta, considerando la suma del carbono estimado en los compartimientos de biomasa y suelos.

Ecuación 39. Cálculo para la estimación de la incertidumbre integrada.

$$U_{Total} = \frac{\sqrt{(U_b \times x_b) + (U_s \times x_s)}}{|x_b + x_s|}$$

Donde:
U_{Total}: valor de incertidumbre resultante en porcentaje
U_b y U_s: valor de incertidumbre del compartimiento de biomasa y suelos
x_b y x_s: valores medios de contenidos de carbono del compartimiento de biomasa y suelos

Análisis de resultados de biodiversidad

Al igual que para la etapa de muestreo, la literatura y los métodos propuestos para el análisis corresponden a los utilizados en el piloto de validación de esta propuesta de Protocolo y se deben considerar como opciones científicamente aprobadas y actualizadas, pero no condicionantes para el desarrollo de proyectos con los mismos objetivos. A continuación, se presentan los elementos apropiados para cada variable en el orden de los niveles propuestos y, en todos los casos, se sugiere principalmente el uso de claves, bases de datos y literatura especializada, actualizada y asociada con organismos tropicales o neotropicales.

Composición y estructura de los grupos biológicos

Para la identificación taxonómica de los organismos, tendiente al establecimiento de la composición, se recomienda la siguiente literatura:

- Fitoplancton y ficoperifiton: Bicudo y Menezes (2006, 2017); Guiry y Guiry (2024); Taylor et al. (2010).
- Zooplancton: De Smet y Pourriot (1997); Elmoor-Loureiro et al. (2004); Koste y Shiel (1989a, 1989b, 1989c); Koste (1978); Kotov (2013); Nogrady et al. (1993, 1995);

Nogrady y Segers (2002); Paggi y Paggi (1995); Perbiche-Neves et al. (2015); Reid (1985); Ruttner-Kolisko (1974); Segers (1995a, 1995b, 2002, 2003, 2007); Sudzuki y Haberman (1998); Wallace et al. (2006).

- Macroinvertebrados acuáticos (asociados y bentónicos): Álvarez (2005); Aristizábal-García (2017); Domínguez y Fernández (2009); Hamada et al. (2014); Linares et al. (2018); McCafferty (1981); Posada-García y Roldán-Pérez (2003); Springer et al. (2010).
- Peces: DoNascimiento et al. (2017); García-Alzate et al. (2020); Herrera-Collazos et al. (2020); Terán et al. (2020); García-Alzate y Morales (2022); Fricke et al. (2023).
- Macrófitas acuáticas: APG (2016); Bernal et al. (2019); ColPlantA (2022); Cook (1990); Crow (2002); Madriñán et al. (2017); Posada-García y López-Muñoz (2011); Rodulio (1999); Tropicos.org (2022); Velásquez (1994).
- Aves: Remsen et al. (2023).
- Herpetofauna (anfibios y reptiles): principalmente Frost (2023) y Uetz (2023). Otras: Acevedo-Rincón et al. (2016); Arroyo et al. (2019); Carvajal-Cogollo (2019); Carvajal-Cogollo et al. (2012); Dubois (2017); Escalona-Sulbarán et al. (2021); Medina-Rangel (2007, 2009); Rangel-Ch. (2008); Rangel-Ch. et al. (2012).
- Mamíferos: Chame (2003); Defler (2003); Morales et al. (2004); Solari et al. (2013); Tirira (2008).
- Vegetación arbórea inundable: APG (2016); Bernal et al. (2019); Gentry (1996); Mahecha (1997).
- En cuanto a la estructura, para todos los grupos se propone utilizar, al menos, las siguientes métricas:
  - Densidad, abundancia o porcentaje de cobertura (según el grupo).
  - Descriptores ecológicos: riqueza específica, índice de diversidad de Shannon, índice de dominancia de Simpson, índice de equidad o equitatividad de Pielou, entre otros.

Principales aspectos de la ecología, aspectos biogeográficos, categorías de conservación y hábitos migratorios de las especies

Además de la literatura anterior, que en su mayoría contiene aspectos de la ecología de las especies (incluyendo los hábitos migratorios, cuando aplican), se recomiendan para las demás variables:

- Aspectos biogeográficos: para todos los grupos se sugiere GBIF (2023) y la Resolución 0126 del 2024. Específicamente para los peces se sugiere también Zapata y Usma (2013); para las macrófitas, Cortés-Castillo et al. (2022) y Madriñán et al. (2017); para las aves, Chaparro-Herrera et al. (2012); y para los anfibios y/o reptiles, AmphibiaWeb (2023); Morales-Betancourt et al. (2015) y Rueda-Almonacid et al. (2004).
- Categorías de conservación: para todos los grupos, CITES (2023), Resolución 0126 del 2024 y UICN (2023). Adicionalmente, para las macrófitas y la vegetación arbórea inundable, Bernal et al. (2019) y CABI (2023); para los peces, Mojica et al. (2012); para las aves, Renjifo et al. (2016); y para la herpetofauna, las mencionadas en el párrafo anterior.

Aspectos comerciales, valor de uso y/o importancia cultural de las especies

Sobre esta variable, además de indagar principalmente en el área del proyecto, se recomienda consultar CITES (2023) para los grupos de fauna; Bernal et al. (2019) y CABI (2023), para las macrófitas y la vegetación arbórea inundable; López-Casas et al. (2020), Resolución 1924 (2015), Rojas-Ceballes et al. (2013) y SEPEC (2023), para los peces.

Estimación de la biomasa y/o el contenido de carbono para el compartimiento de biodiversidad

Para este compartimiento, las estimaciones de biomasa y/o contenidos de carbono se proponen específicamente para los grupos de hidrobiota, excepto para las macrófitas acuáticas, consideradas en el compartimiento de biomasa y MOM.

Dado que el cálculo de la biomasa de los organismos microscópicos (fitoplancton, ficoperifiton y zooplancton), así como de los macroinvertebrados, conlleva un extenso y detallado trabajo de laboratorio (Figura 45), esta metodología se plantea principalmente para una muestra representativa (por ejemplo, 30 individuos de cada taxón) de los organismos dominantes, los más abundantes (por sitio de muestreo) y los de mayor tamaño dentro de cada uno de dichos ensambles.

Cabe anotar que la selección de los organismos dominantes puede efectuarse por diferentes métodos; sin embargo, para esta propuesta de Protocolo se propone la prueba de Olmstead-Tukey (Sokal y Rohlf, 1981), que considera tanto la abundancia como la frecuencia de los organismos.

También es importante señalar que en el piloto de validación de esta propuesta metodológica, la estimación de la biomasa, realizada mediante la inclusión de los organismos indicados (dominantes, de mayor tamaño y más abundantes), correspondió en todos los casos a más del 50% de la densidad calculada y, en la mayoría de ellos, a más del 80%; por lo que se considera una valoración muy aproximada a la biomasa total de los ensambles. Asimismo, se debe indicar que para los organismos microscópicos las estimaciones se realizaron mediante fotografías. A continuación, se especifica el procedimiento para estimar la biomasa de cada grupo de hidrobiota. Además, se indican algunas de las referencias bibliográficas en las que se encuentran métodos detallados para los cálculos de biomasa de los grupos que así lo requieren, y se plantea el uso de un programa de morfometría geométrica de uso libre. Sin embargo, es necesario aclarar que existen diversas metodologías y programas ampliamente usados y validados que ofrecen resultados similares, por lo que los aquí propuestos no son condicionantes para efectuar las estimaciones.

Fitoplancton y ficoperifiton

- Biovolumen celular medio para cada organismo (BvCm): para efectuar las mediciones necesarias se recomienda el programa de morfometría geométrica TPSdig2; y para la estimación del biovomumen se propone el uso de las fórmulas contenidas en Edler (1979), Hillebrand et al. (1999) y Mullin et al. (1966). Este último método se basa en la semejanza de las algas o partes de ellas con formas geométricas.
- Biovolumen medio por individuo (BvmI): para los organismos coloniales y cenobiales, se obtiene multiplicando el BvCm por el número medio de células de las colonias o cenobios (Strathmann, 1967).
- Biomasa media por individuo (BmI): BvmI × Densidad de cada individuo.
- Biomasa por sector o zona de muestreo: ΣBmI, sumatoria de la biomasa media de los organismos registrados en el área especificada para el monitoreo.
- Los valores de biomasa de estos ensambles, si se siguen los métodos propuestos para su muestreo y cuantificación de la densidad, se reportan en $\mu m^3/ml$ para el fitoplancton y en $\mu m^3/cm^2$ para el ficoperifiton o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

Zooplancton

- Biovolumen por especie: según Ruttner-Kolisko (1977), se calcula mediante fórmulas específicas para las formas geométricas más cercanas a la forma de cada especie y siguiendo las especificaciones de Bottrell et al. (1976) y McCauley (1984).
- Biomasa en peso húmedo: se calcula según Bottrell et al. (1976).
- Biomasa en peso seco: se estima según Dumont et al. (1975) y Pace y Orcutt (1981).
- Biomasa por sitio o zona de monitoreo: corresponde a la sumatoria de la biomasa de las especies registradas en el área especificada para el monitoreo.

Los valores de biomasa del zooplancton, según los métodos de muestreo y cuantificación propuestos anteriormente, se reportan en g/L o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

Macroinvertebrados acuáticos (asociados a vegetación y bentónicos)

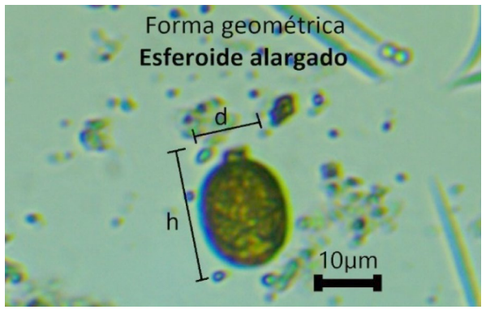
- Según Wetzel y Likens (2000), este procedimiento se puede efectuar mediante dos métodos. Se aclara que ambos métodos pueden combinarse, según los organismos que conformen los ensambles:
  - Directo por peso seco: secado y pesaje de los organismos (separados por taxón).
  - Indirecto: por relaciones de longitud peso, a partir de las ecuaciones de Smock (1980).

Los valores de biomasa de los macroinvertebrados se reportan en g/m^2 o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

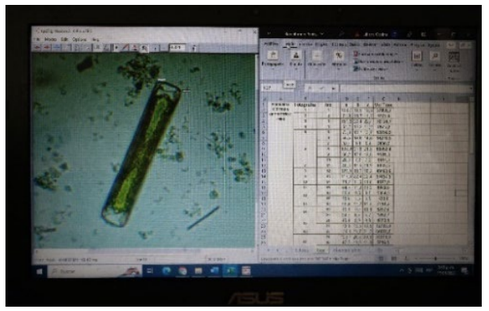
Peces

- La biomasa por especie corresponde al peso total de los ejemplares capturados y por sitio o ZM, y a la sumatoria de las biomasas de los peces que conforman los ensambles.

Estos valores se reportan en gramos (g) o unidades equivalentes.



Cálculo de dimensiones para estimar el volumen de los organismos según las formas geométricas



Estimación del biovolumen de los organismos usando TPSdig2

Separación de organismos por taxón

Secado al aire, previo al secado en horno

Pesaje

Figura 45. Ejemplo de algunos de los procedimientos necesarios para la estimación de la biomasa de algas (fitoplancton y ficoperifiton) y macroinvertebrados. Fotografía: Liliana Ospina-Calle y José Posada-García. Fuente: elaboración propia (2024).

Para el caso específico de las algas (fitoplancton y ficoperifiton) y del zooplancton, también se propone realizar la estimación del contenido de carbono, según los siguientes cálculos:

Fitoplancton y Ficoperifiton

- De acuerdo con Menden-Deuer y Lessard (2000), el contenido de carbono celular (pgC/cel) corresponde a 0,288 × $V^{0,811}$para las **diatomeas** y a 0,216 × $V^{0,939}$ para las algas **no diatomeas**; donde V es el volumen celular.

Zooplancton

Según Rossa et al. (2007), para los **rotíferos** el contenido de carbono (µgC) corresponde al 48 % del peso seco de los organismos y, de acuerdo con King y Greenwood (1992), para los **grupos de artrópodos** dicho contenido corresponde al 44 % de su peso seco.

Criterios Técnicos para el cálculo de emisiones o absorciones de CO_2 a partir de factores de emisión (FE) y datos de actividad (DA)

Factores de emisión

De acuerdo con el IPCC, se requieren los datos de actividad (DA) y los factores de emisión (FE) para el cálculo de las emisiones o remociones del área investigada. Los FE hacen referencia a las pérdidas o ganancias de carbono en el área por conversión de coberturas (usos de suelo). De esta forma, se puede estimar la pérdida por conversión del humedal, por ejemplo, a tierras de cultivo (Figura 46), o la ganancia por actividades de reforestación y recuperación del humedal.

Figura 46. Ejemplo de conversión de coberturas de humedales.
Fuente: elaboración propia (2024).

Existen dos métodos para estimar estos cambios. En el primero, denominado de aumento y pérdida, se determinan en función de los factores de emisión de actividades específicas (deforestación, plantaciones, drenajes) que se derivan de literatura y de los datos de estas actividades en cada país (Howard et al., 2019).

El otro método sugerido para esta propuesta de Protocolo es el de diferencia de las existencias, definido por Kauffman et al. (2014), en el cual se emplean las mediciones de carbono de cada compartimiento en al menos dos momentos distintos: estimación inicial (t1) y estimación posterior (t2).

Se recomienda realizar las mediciones de cada compartimiento en las mismas parcelas de la estimación inicial para las posteriores estimaciones, utilizando el mismo método (Howard et al., 2019). Sin embargo, si esto no es posible, las siguientes estimaciones se pueden realizar en una ubicación similar a la evaluada inicialmente, asumiendo una incertidumbre mayor en las mediciones. Los compartimientos de carbono se miden siguiendo los métodos definidos en la sección de etapa de muestreo de la presente propuesta de Protocolo.

El cambio en las existencias de carbono se estima siguiendo los pasos (Figura 47):

Cambio en las existencias de carbono (tC/ha) = Existencias de carbono total en el t_2 (suma de todos los compartimientos en t_2)–Existencias de carbono total en el t_1 (suma de todos los compartimientos en t_1).

Figura 47. Estimación del cambio en las existencias de carbono (FE).
Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores de contenido de carbono de t1 y t2 se presentan en estado sólido; por tanto, deben convertirse para utilizar el dato como factor de emisión (estado gaseoso). En este caso, el contenido de carbono obtenido en tC/ha se transforma a tCO_2/ha, multiplicando este valor por (44/12), que corresponde a la relación de peso molar entre el CO_2 y el carbono (C). Valores positivos indican liberación de carbono a la atmosfera; por su parte, valores negativos indican captación de carbono por parte de la biomasa y el suelo, es decir, remoción de la atmósfera (secuestro de carbono) (Tabla 37).

Tabla 37. Valoración del cambio en las existencias de carbono (FE).

Cambio existencias C	Descripción
+	Liberación de carbono a la atmósfera
=	No hay variación (estable)
-	Secuestro de carbono de la atmósfera

Fuente: elaboración propia (2024).

Identificación de datos de actividad

La propuesta aquí presentada parte del concepto de Datos de Actividad (DA) definido en esta propuesta de Protocolo para el sector AFOLU, que se adapta a los ecosistemas de humedales no gestionados. De esta manera, los DA se estiman en los cambios de las clases de coberturas o usos de suelos, incluyendo los cuerpos de agua durante una vigencia de tiempo específica:

Ecuación 40. Cálculo del Dato de Actividad.

$$DA = \frac{\Delta(Cobertura\ o\ uso\ del\ suelo)}{Periodo\ de\ tiempo^{1}\ y\ temporalidad^{2}}$$

$$A = \frac{\text{Cobertura 2} - \text{cobertura 1}}{t2 - t1}$$

Donde:
[1] El periodo se define conforme a la información que se tenga de las coberturas en un lapso identificado (t_2-t_1)
[2] La temporalidad se define en los periodos secos y lluviosos debido a las fluctuaciones del cuerpo de agua. Para los humedales del Magdalena Medio y Bajo, por su régimen bimodal de precipitación, se hace en dos temporalidades (lluvia y seca).

A partir de esta ecuación se propone utilizar información espacial y multitemporal, con base en imágenes de satélite, que permitan clasificar las coberturas en cada periodo y así obtener los deltas o cambios entre el o los periodos determinados. A continuación, se presenta un esquema general del proceso para la generación de los DA en humedales no gestionados, basado en los cambios de uso (Figura 48).

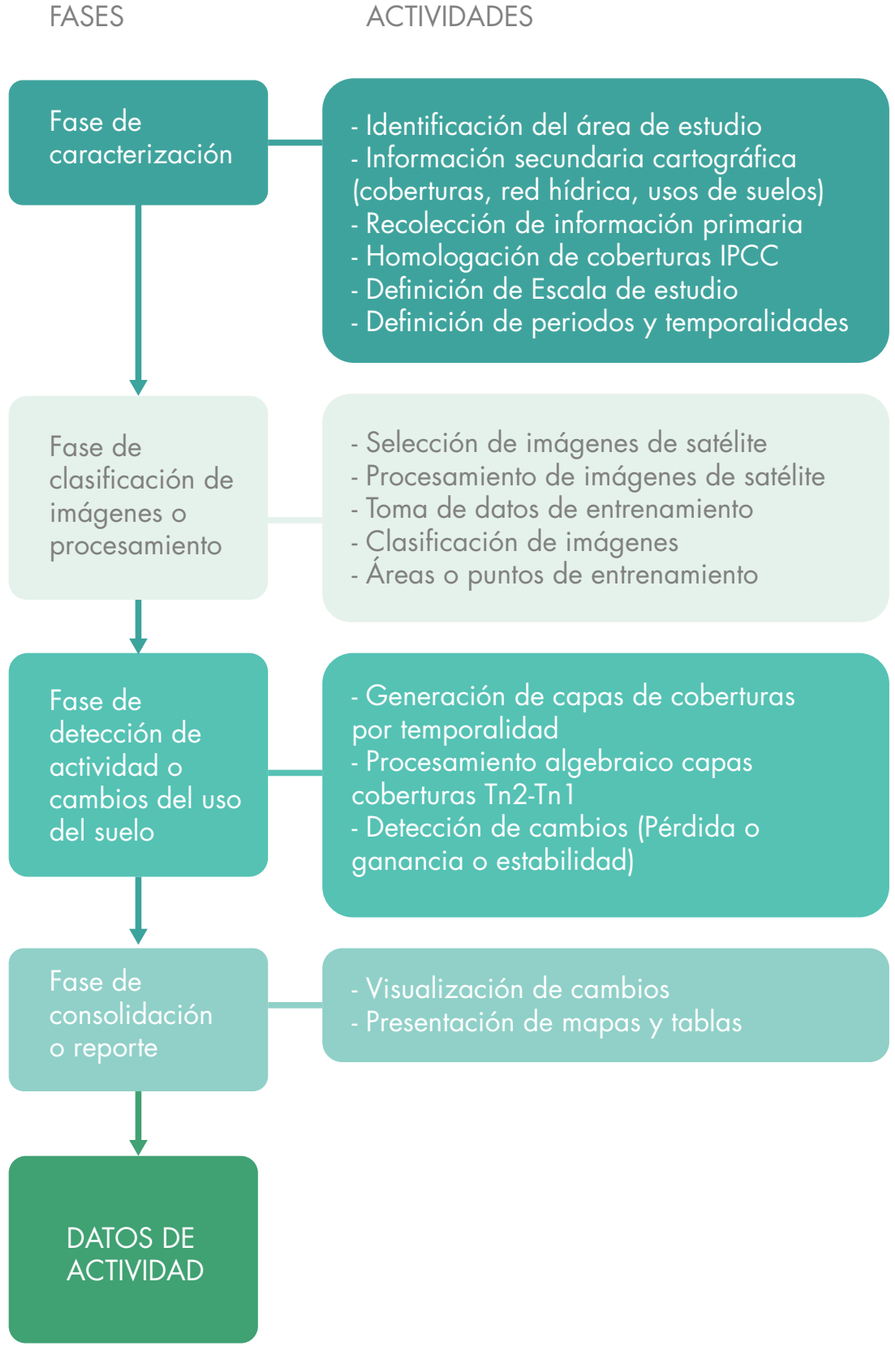


Figura 48. Esquema general de la metodología para la descripción de los DA. Fuente: elaboración propia (2024).

Además, en cada una de estas fases se proponen las actividades para dar cumplimiento al proceso y generar el reporte de los DA (Figura 49).

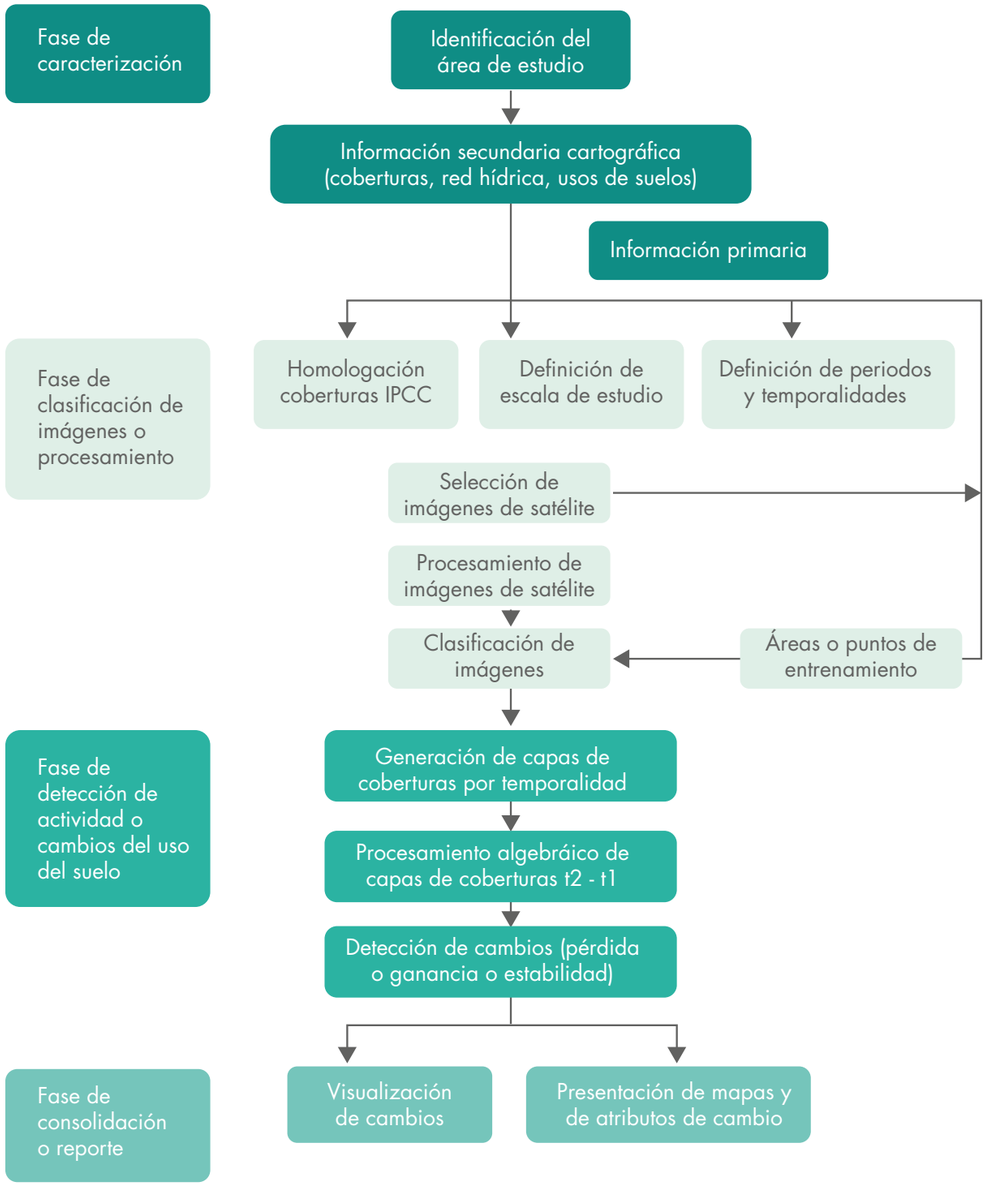


Figura 49. Diagrama de flujo del proceso para el monitoreo de los DA. Fuente: elaboración propia (2024).

Fase de caracterización

Consiste en la recopilación y el análisis de información (geográfica y tabular), para identificar o conformar una línea base inicial que sea el soporte de las fases siguientes. Las actividades necesarias son: (i) identificación del área de estudio; (ii) análisis de información secundaria e información primaria; (iii) homologación de coberturas con el IPCC; y (iv) definición de escalas junto con la periodicidad y temporalidad.

Identificación del área de estudio

Es el primer paso para acotar los límites donde se determinarán los DA; la manera de realizar esta identificación se expone en las secciones "Humedales del Magdalena Medio y Bajo" y "Análisis de cambios de extensión del humedal"

Análisis de información secundaria e información primaria

Se utiliza información secundaria relacionada con datos geográficos a diferentes escalas y tabulares provenientes de fuentes oficiales, como las de la capa oficial de coberturas, la red hídrica, los usos de suelos y los modelos de elevación digital, entre otros. También se usan imágenes de plataformas web gratuitas y reconocidas, que incluyan las coberturas presentes en el área de estudio durante los periodos y las temporalidades correspondientes para la evaluación de los DA.

Además, se utilizan herramientas de SIG y de teledetección como soporte del álgebra de mapas y del procesamiento de las imágenes de satélite o fotografías aéreas, entre otras actividades que permiten procesar los datos y lograr el objetivo del proceso. Estas pueden ser de versión libre o comercial; en este caso, se propone el uso de la versión libre de GEE para el procesamiento de las imágenes y el programa ArcGis para el soporte y apoyo cartográfico vectorial y de álgebra de mapas.

Homologación de coberturas con el IPCC

Debido a que la información oficial de las coberturas de la tierra disponible utiliza la metodología y la leyenda para Colombia de CLC, y esta difiere de la leyenda propuesta por el IPCC en el sector AFOLU, es necesario realizar la homologación de dichas coberturas, proceso metodológico descrito en la sección "Delimitación e identificación de zonas de muestreo".

Definición de escalas, periodicidad y temporalidad

La escala de trabajo define el detalle espacial de los datos geográficos y puede ir desde un nivel muy general o pequeño hasta un nivel detallado o grande. La selección depende, entre otros, de factores como (i) el área de estudio, (ii) los recursos económicos, (iii) el nivel de detalle de la información y (iv) los tipos de muestreo del trabajo de campo. Ver la explicación en la sección "Generación del inventario cartográfico para el monitoreo".

Por otro lado, la periodicidad se define con base en la información de los insumos cartográficos y de las imágenes de satélite o fotografías aéreas propuestas, como mínimo para dos periodos de tiempo. A partir de

esta información se identifican los cambios en el uso del suelo o en las coberturas durante dicho lapso; adicionalmente, de acuerdo con los regímenes de precipitación, se puede proponer una temporalidad que cubra épocas de estiaje o secas y épocas húmedas o de lluvias.

Fase de procesamiento o clasificación de imágenes

Se realiza mediante técnicas que transforman los pixeles de una imagen de satélite o fotografía aérea en datos o clases de información temática relevante, con el fin de cumplir los objetivos del estudio (Chuvieco, 1995). En este caso, la finalidad es la obtención de la información de coberturas de la tierra bajo las categorías del IPCC en los periodos y temporalidades especificadas con anterioridad.

Selección de imágenes

Para el cumplimiento del objetivo del cálculo del DA se pueden utilizar diferentes imágenes gratuitas o comerciales; sin embargo, en esta propuesta de Protocolo se sugiere la selección de imágenes multiespectrales Sentinel 2, teniendo en cuenta que cubren el área de estudio, tienen una adecuada resolución espacial y temporal, y se pueden obtener imágenes diarias.

Procesamiento de imágenes

Consiste en la elaboración o el tratamiento de la imagen de forma computacional o digital con el fin de hacer correcciones o arreglos y obtener información adecuada, entre otros aspectos. La plataforma GEE permite utilizar filtros para seleccionar imágenes por fecha, ubicación, cobertura de nubes, etc., y cuenta con algunas funciones para construir índices y realizar análisis espaciales; también sirve para crear mapas, gráficos y otras visualizaciones de datos.

Áreas o puntos de entrenamiento

Es un conjunto de datos que se utiliza para preparar un modelo de aprendizaje automático y como puntos de control para clasificar las imágenes, con el fin de predecir una categoría a partir de un conjunto de variables independientes y que representan las muestras de cada una de las clases de cobertura de la tierra. De esta manera, en cada periodo se realiza un mapa de puntos de entrenamiento o de puntos de control para cada clase de cobertura en el programa ArcGIS. La cantidad de puntos por clase se puede hallar de forma empírica dependiendo de la experiencia del intérprete, el conocimiento del lugar, el tamaño del pixel y la cantidad de clases, entre otras consideraciones; o utilizando fórmulas de distribución multinominal para el número de clases.

Clasificación de imágenes

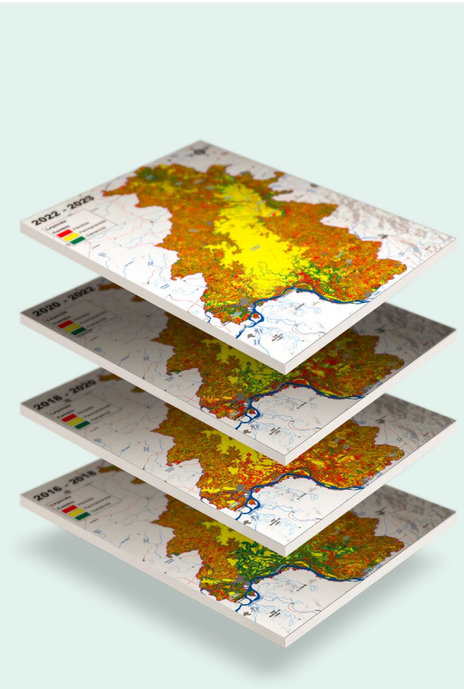
Para clasificar las imágenes se identifican los cambios en el uso del suelo con una periodicidad de dos años, con el fin de convertirlos en los estimativos de los DA. Para este propósito, se utiliza la clasificación supervisada, que puede ser efectuada en diferentes programas. Se propone el uso de GEE, soportado por un mapa de puntos de entrenamiento con las clases de coberturas conocidas para guiar (o supervisar) un algoritmo matemático para etiquetar el espacio espectral, como el Ramdom Forest o algoritmos de clasificación supervisada.

Fase de detección de cambios

Se enmarca propiamente en la identificación de los cambios de usos de suelos en los diferentes periodos y temporalidades. Se realiza mediante la generación de capas por periodo y temporalidad, el procesamiento algebraico (cambios de uso por categoría) y la detección de cambios, con la ayuda de las tecnologías de la información y los métodos de *machine learning* (aprendizaje de máquinas).

Generación de los mapas de coberturas

Posteriormente a la clasificación de imágenes, para cada periodo y temporalidad se genera un mapa de coberturas con las clases, según se defina la homologación entre las coberturas IPCC y las oficiales de CLC.



Procesamiento algebraico y detección de cambios

En este contexto, se propone calcular los cambios sobre los periodos de referencia mediante la fórmula adaptada de Kindu et al. (2013), citado en Kindu et al. (2020), (Ecuación 41):

Ecuación 41. Fórmula de identificación de cambios de cobertura

$$\Delta Coberturas = \frac{Area\ t2 - Area\ t1}{Area\ t1}$$

Donde:
ΔCoberturas: representa el cambio de las coberturas. El área se define para las clases de coberturas; los valores positivos indican incremento y los valores negativos, decremento.

Fase de consolidación y reporte

Tiene como objetivo visualizar los cambios y presentar los mapas de cambios en las diferentes coberturas propuestas. Para el caso específico de DA calculados, se propone estructurar una base de datos alfanumérica que se ajuste a los formatos definidos en el Sistema Nacional de Inventarios de Emisiones de Gases Efecto Invernadero para Colombia (SINGEI).

Indicadores de cambio

Se proponen los siguientes indicadores, adaptados de los que el IDEAM recomienda a escala nacional para el monitoreo de la superficie de bosque natural (IDEAM, 2019).

Tasa promedio anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas

Corresponde a la variación de la superficie cubierta por coberturas naturales, incluidos los bosques naturales que no estén siendo previamente monitoreados a escala nacional por el IDEA9M en áreas de humedales del Magdalena Medio y Bajo. El indicador debe calcularse para cada una de las coberturas naturales en el área de referencia y en el intervalo de tiempo entre el año inicial t_1 y el año final t_2. Para su cálculo se utiliza la expresión del IDEAM (2019), modificada para centrar el análisis en los cambios de coberturas naturales en los ecosistemas de humedal.

Ecuación 42. Tasa promedio anual de cambio de la superficie.

$$TC_{i,(t1:t2)} = \left[\frac{\frac{ACT_{i,t2} - ACT_{i,t1}}{ACT_{i,t1}}}{(t2 - t1)}\right] * 100$$

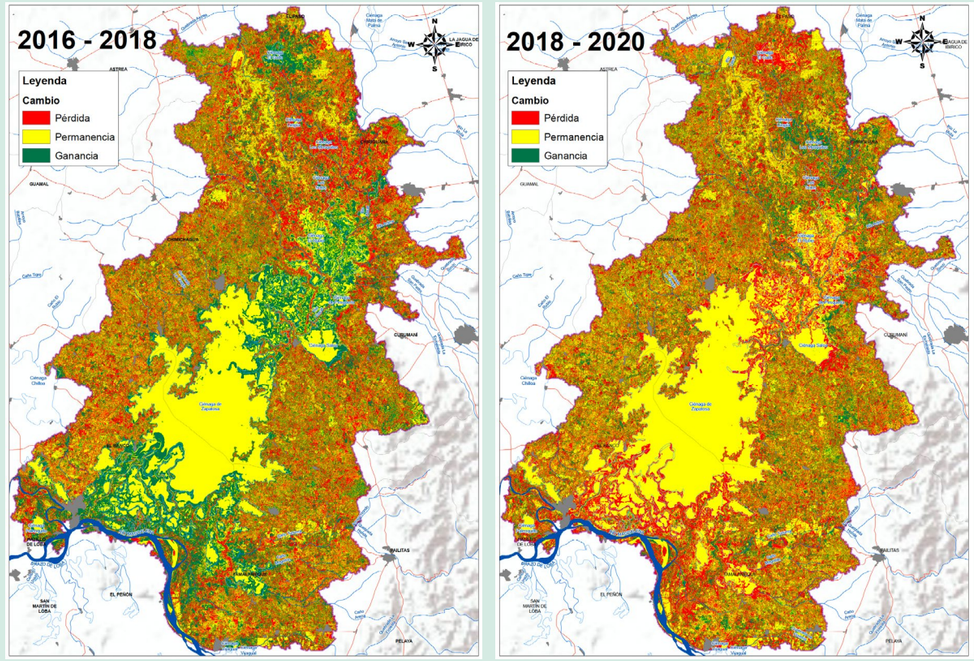
Donde:
$TC_{i,(t1:t2)}$: tasa promedio de cambio anual del área que ocupa la cobertura de la tierra natural i, entre las dos fechas t1 y t2
$ACT_{i,t1}$: área cubierta por la cobertura de la tierra natural i, en el momento t1, expresada en hectáreas (ha)
$ACT_{i,t2}$: área cubierta por la cobertura de la tierra i, en el momento t2, expresada en hectáreas (ha)

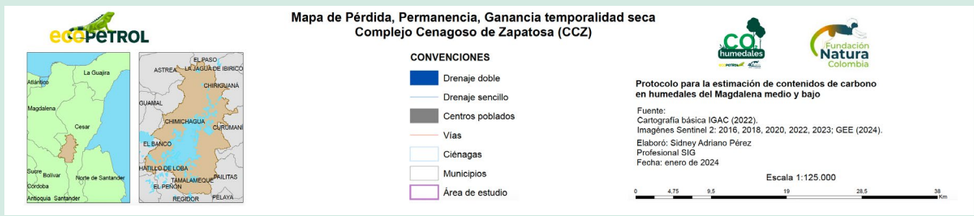
Porcentaje total de cobertura natural estable

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se mantiene estable durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de la evaluación t1 y la fecha final t2, dada en porcentaje, la cual se establece como se expresa en la siguiente ecuación.

Ecuación 43. Cálculo del porcentaje total de la cobertura natural.

$$PACNE = \frac{ACNE}{AT} * 100$$





Donde:
PACNE: porcentaje de cobertura natural que se mantiene estable
ACNE: área de cobertura natural que se mantiene estable
AT: área total de referencia

Porcentaje total de ganancia de cobertura natural

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se gana durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t1 y la fecha final t2, dada en porcentaje, según la Ecuación 44.

Ecuación 44. Cálculo del porcentaje total de ganancia de la cobertura natural.

$$PAGCN = \frac{AGCN}{AT} * 100$$

Donde:
PAGCN: porcentaje de ganancia de cobertura natural
AGCN: área de ganancia de cobertura natural
AT: área total de referencia

Porcentaje total de pérdida de cobertura natural

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se pierde durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t1 y la fecha final t2, dada en porcentaje, según la siguiente ecuación.

Ecuación 45. Cálculo del porcentaje total de pérdida de cobertura natural.

$$PAPCN = \frac{APCN}{AT} * 100$$

Donde:
PAPCN: porcentaje de pérdidas de cobertura natural
APCN: área de pérdidas de cobertura natural
AT: área total de referencia

Cálculo de emisiones o absorciones de CO_2

La metodología completa para el cálculo de emisiones o absorciones consta de dos pasos generales (Figura 50):

- Estimación de FE
- Detección de DA

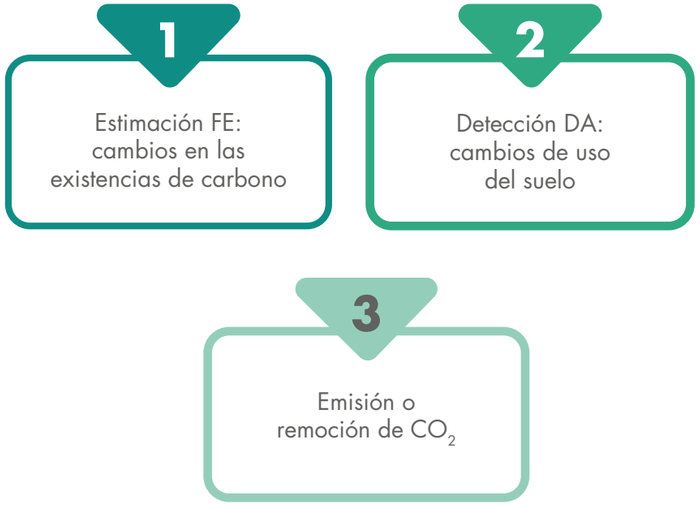
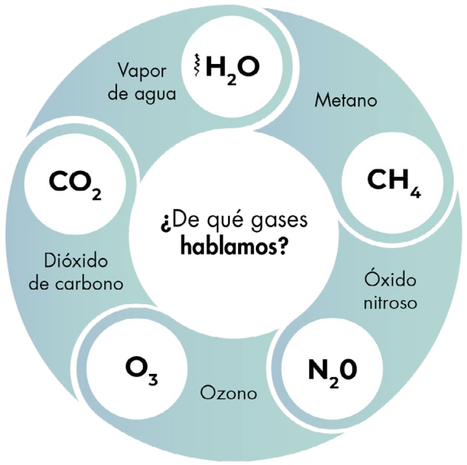


Figura 50. Metodología para el cálculo de emisiones o absorciones de CO2. Fuente: elaboración propia (2024).



Cálculo del flujo de GEI

Para la determinación de los flujos de los gases de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), es muy importante la selección de las ecuaciones adecuadas según el compartimiento donde se realice la medición: biomasa, suelo o agua. Para suelo, la primera ecuación de flujo, que por defecto se calcula en algunas cámaras (por ejemplo, tipo Li-Cor), corresponde a:

Ecuación 46. Primera ecuación para el cálculo del flujo de GEI.

$$f = \frac{10 * V * Po * \left(1 - \frac{Wo}{1000}\right)}{R * S * (To + 273.15)} x \frac{\partial C'}{\partial t}$$

Donde:
F: tasa de flujo del suelo del gas (µmol m–2 s –1)
V: volumen (cm3)
Po: presión inicial (kPa)
Wo: fracción molar inicial de vapor de agua (mmol mol–1)
S: área de suelo (cm2)
R: constante universal de los gases
To: temperatura inicial del aire (°C)
$\partial C'/\partial t$: tasa inicial de cambio de la fracción molar del gas, habiéndosele aplicado previamente la corrección por la dilución del vapor de agua (µmol mol–1 s –1)

Para el caso de la corrección por vapor de agua, algunas sondas ya corrigen el efecto de la dilución que provoca; es decir, entregan los resultados de las concentraciones de los gases en aire seco. En caso de que la sonda a utilizar no realice por defecto la corrección, se debe correr la siguiente ecuación.

Ecuación 47. Cálculo para la corrección por vapor de agua para los flujos de GEI.

$$C'c = \frac{Cc}{1 - Cv}$$

$$C'm = \frac{Cm}{1 - Cv}$$

Donde:
Cc: CO_2 medido en aire húmedo
Cm: CH_4 medido en aire húmedo
Cv: concentración de vapor de agua

Indicadores ambientales

Los humedales, por tratarse de ecosistemas transicionales cuya dinámica de recepción de aguas de ecosistemas lóticos es constante, presentan procesos continuos de regeneración de la vegetación, cambios en las condiciones de humedad del suelo, así como muerte y descomposición de organismos de gran importancia para regular el ciclo del carbono. Adicionalmente, son ecosistemas sujetos a dinámicas constantes de transformación para el desarrollo de diversas actividades económicas; por esta razón, resulta indispensable adelantar actividades que permitan evaluar su estado y generar propuestas de manejo y uso sostenible. Una forma de hacerlo es la definición de indicadores ambientales que sean un "sistema de señales claras y oportunas sobre una dinámica o proceso ambiental" y que faciliten la priorización de procesos relevantes a tener en cuenta para la toma de decisiones (evaluación e intervención) (Quiroga-Martínez, 2009). De acuerdo con lo anterior, en esta propuesta de Protocolo se sugiere la definición de índices espectrales y de AVC como indicadores ambientales para la toma de decisiones en los humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Cálculo de índices espectrales

El cálculo de índices se basa en los valores de: (i) la radiación entrante que se refleja en la superficie del agua, (ii) la radiación que penetra el agua y (iii) la radiación reflejada por las coberturas terrestres colindantes, ubicadas hacia afuera de los límites de las superficies de agua. Dado que el enfoque de esta propuesta de Protocolo es el análisis de humedales, se suguiere el cálculo de índices espectrales en diferentes etapas: desde la búsqueda y generación de mosaicos con cubrimiento para el área de interés hasta el análisis de los resultados a partir de datos estadísticos. En la Figura 51 se presenta cada una de las etapas y su descripción se expone más adelante.

Figura 51. Etapas de la metodología para el cálculo y análisis de índices espectrales para el monitoreo de humedales del Magdalena Medio y Bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Etapa 1 – Selección de imágenes satelitales para el área de interés

Para calcular los índices espectrales para el monitoreo de humedales del Magdalena Medio y Bajo se propone usar imágenes Sentinel-2 del programa Copernicus de la Comisión Europea. Este programa satelital se caracteriza por disponer sus imágenes de manera gratuita en las siguientes plataformas de descarga:

- Plataforma Earth Explorer del United States Geological Survey (USGS): https://earthexplorer.usgs.gov/
- Plataforma Copernicus Services Data Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA): https://sentinel-hub.com/develop/capabilities
- Plataforma Google Earth Engine, que dispone diferentes catálogos de datos: https://earthengine.google.com/

Etapa 2 – Generación de compuestos de medianas de imágenes satelitales

Según el área geográfica definida, se identifican y seleccionan las escenas Sentinel-2 que cubren en su totalidad el polígono delimitado para tal fin. En cuanto a la temporalidad de los mosaicos de Sentinel-2 requeridos, en esta propuesta de Protocolo la periodicidad del monitoreo se definió en cada dos años; por lo tanto, la búsqueda y selección de escenas debe hacerse acorde con dicha temporalidad. Así mismo, para cada año se establecen periodos trimestrales, según los análisis de variables climatológicas, para identificar los regímenes climáticos de la ventana seleccionada (monomodales o bimodales). Una vez definidas el área de interés y la temporalidad de las imágenes, se procede a la búsqueda, revisión y descarga de los compuestos temporales de medianas (mosaicos) en GEE. Este proceso se realiza mediante la creación del código para la descarga de los compuestos temporales de medianas de las imágenes Sentinel-2 presentado en la Tabla 38.

Este código incluye una línea específica para el enmascaramiento de nubes a ser eliminadas del área de interés; así mismo, los resultados cuentan con una corrección atmosférica, por lo que los valores de pixel se encuentran en valores de reflectancia de superficie, que son óptimos para calcular posteriormente los índices espectrales.

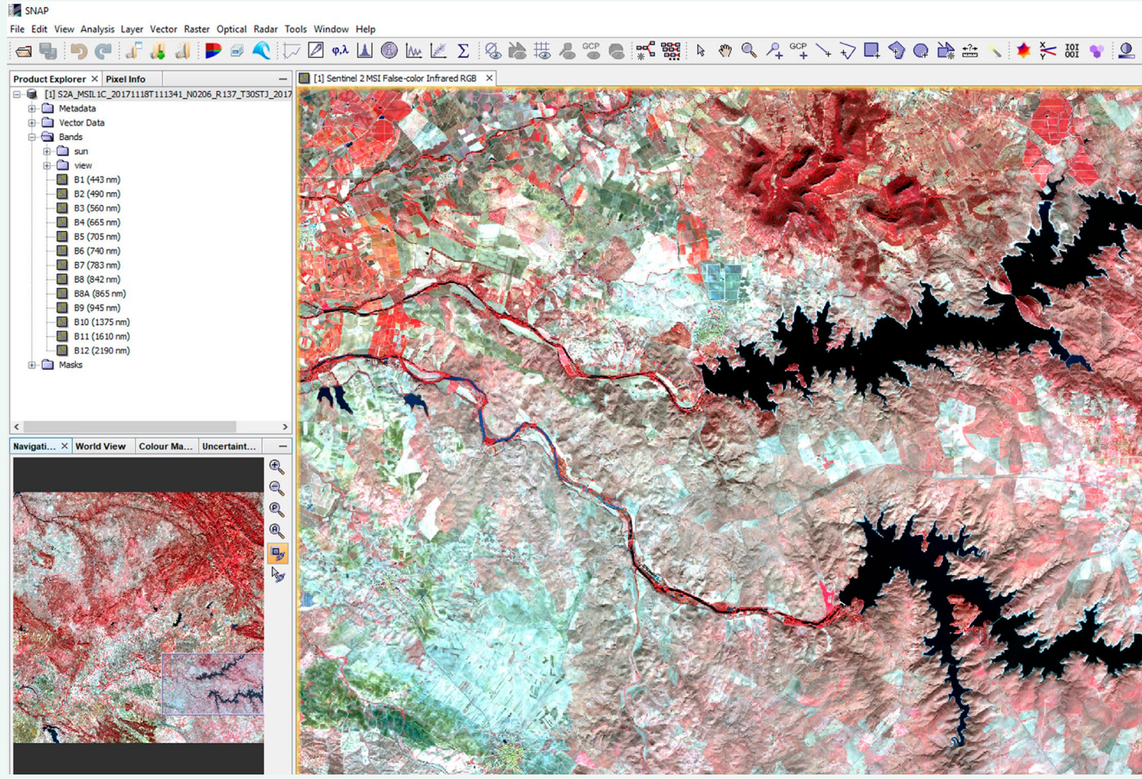


Tabla 38. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes ópticas Sentinel-2.

Criterio	Código
Enmascaramiento de nubes	function maskS2clouds(image) { var qa = image.select('QA60');
Indicar bits para identificar: Nubes: bits = 10 Cirrus: bits = 11	var cloudBitMask = 1 << 10; var cirrusBitMask = 1 << 11;

Función para leer los valores de máscara de bits de nubes, cirrus o sin nubes de la banda QA60 y agregar cada tipo de nube como una nueva banda a la imagen original.	var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
	.and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));
	return image.updateMask(mask).divide(10000);
	}

Cargar colección Sentinel-2	var dataset = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
Filtrar para el área de interés	.filterBounds(table)
Filtrar por rango de fechas	.filterDate ('2016-09-01', '2016-11-30');
Prefiltrado para obtener los gránulos con menos nubes	.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10)) .map(maskS2clouds);

Parámetros de visualización	var rgbVis = {
	min: 0.0,
	max: 0.3,
	bands: ['B8', 'B4', 'B3'],
	};

Centrar para visualizar sobre el área de interés: Complejo Cenagoso de Zapatosa	Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);
Adicionar la capa al mapa base	Map.addLayer(dataset.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');
Exportar mosaico Sentinel-2 a Google Drive	Export.image.toDrive({ image:dataset.mean(), region: table, scale:10, description:'MosS2_T1_2016_V4', fileFormat:'GeoTIFF', maxPixels:1e13 });

Fuente: elaboración propia (2024).

Etapa 3–Cálculo de índices espectrales

Se calculan los índices espectrales de vegetación, agua y quemas que se presentan en la Tabla 39 con las respectivas fórmulas.

Tabla 39. Ecuaciones y funcionalidad de los índices espectrales propuestos para el monitoreo de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. NIR: Infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta.

N.°	Índice espectral	Tipo de medición	Fuente
1	**Ecuación 48.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI). $NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$	Productividad de la vegetación acuática y ecosistemas inundables. Análisis multitemporales de los estados fenológicos de la vegetación.	Hilker et al. (2007)
		Estado de la vegetación acuática o vegetación de ecosistemas inundables.	Song et al. (2013)
2	**Ecuación 49.** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). $SAVI = \left(\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo + L}\right) * (1 + L)$	Presencia de biomasa con corrección del brillo del suelo.	Rondeaux et al. (1996)
3	**Ecuación 50.** Índice de Área Foliar (LAI). $LAI = -\frac{ln\left(0{,}69 - \frac{SAVI}{0{,}59}\right)}{0{,}91}$	Características biofísicas asociadas a las copas de los árboles.	Tucker y Sellers (1986)
4	**Ecuación 51.** Índice de clorofila (GCI). $GCI = \left(\frac{NIR}{Verde}\right) - 1$	Presencia de clorofila, que indica contaminación por nutrientes que impulsan el crecimiento de las algas.	Gitelson et al. (2003)
5	**Ecuación 52.** Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI) $NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	Cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo.	McFeeters (2013)
6	**Ecuación 53.** Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) $MNDWI = \frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR}$	Medición de la extensión de los territorios cubiertos de agua que los separa de las demás coberturas terrestres.	Xu (2006)
7	**Ecuación 54.** Índice Normalizado de Área Quemada (NBRI) $NBRI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Resalta áreas quemadas en grandes zonas de incendio.	De Santis y Vaughan (2009)

Fuente: elaboración propia (2024), a partir de las fuentes de información presentadas.

Para ejecutar los procesos del cálculo de cada índice espectral en GEE, en la ventana de editor de código se insertan primero las líneas de código creadas para la generación de mosaicos, como se presentó en la Tabla 39, con el fin de tener el conjunto de imágenes disponibles. Seguidamente, se crea el código para cada índice (Tabla 40), donde se indican las bandas a tener en cuenta de acuerdo con cada ecuación presentada en la Tabla 39. Cabe mencionar que para el cálculo del LAI, debido a que su fórmula se basa en los resultados obtenidos con el SAVI, el proceso se realiza teniendo en el código las líneas requeridas para el cálculo del SAVI y después se incluyen las del LAI, tal como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Códigos desarrollados en Google Earth Engine para el cálculo de los índices espectrales.

N.°	Índice espectral	Código
1	NDVI	var NDVI = Vegetacion.expression ('float ((NIR–RED) / (NIR + RED))',{ 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4')});
2	SAVI	var SAVI = Vegetacion.expression ('float (((NIR–RED) / (NIR + RED + L))* (1+L))',{ 'L': 0.5, // Cobertura vegetación 0-1 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4')});
3	LAI	var SAVI = Vegetacion.expression ('float (((NIR–RED) / (NIR + RED + L))* (1+L))',{ 'L': 0.5, // Cobertura vegetación 0-1 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4')}); var LAIg = SAVI.multiply(5.405).subtract(0.114)
4	GCI	var GCI = Vegetacion.expression ('float (((NIR) / (GREEN))–1)', { 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'GREEN': Vegetacion.select ('B3')});
5	NDWI	var NDWI = Agua.normalizedDifference(['B3', 'B8']);
6	MNDWI	var MNDWI = Agua.normalizedDifference(['B3', 'B11']);
7	NBRI	var NBRI = Vegetacion.expression (,float (NIR–SWIR) / float (NIR + SWIR)', { 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'SWIR': Vegetacion.select ('B12')});

Fuente: elaboración propia (2024).

Adicionalmente, para recortar el resultado de cada índice a partir del polígono del área de interés, se inserta la siguiente línea de código con la función 'Clip': var NDVI_clip = NDVI.clip(table). Para visualizar cada resultado en la plataforma, se crean las líneas de código con el gradiente de colores de la simbología más apropiada según sea el caso; sin embargo, cada usuario es libre de crear su propia escala de colores conforme a lo que requiera:

a. Índices de vegetación: colores en escala de semáforo, que van desde rojo hasta verde.

```
var vis = {
  min: -1,
  max: 1,
  palette: ['FFFFFF', 'CE7E45',
  'DF923D', 'F1B555', 'FCD163',
  '99B718','74A901', '66A000',
  '529400', '3E8601', '207401',
  '056201','004C00', '023B01',
  '012E01', '011D01', '011301']};
```

b. Índices de agua: colores en escala de azules, que van desde azul claro hasta azul oscuro.

```
var vis = {
  min: -1,
  max: 1,
  palette: ['F4F6F6', 'AED6F1',
  '2980B9', '1A5276']};
```

c. Índices de áreas quemadas: colores en escala de amarillos, rojos y negros.

```
var vis = {
  min: -5,
  max: 1.3,
  palette: ['DAF7A6','FFC300','FF5733'
  ,'C70039','900C3F','581845']};
```

Para exportar los resultados a Google Drive se insertan las siguientes líneas de código para cada temporalidad y cada índice calculado:

```
Export.image.toDrive({ image: ndvi1 //
nombre imagen
description: 'NDVI_S2_T1_2022', // nom-
bre archivo
scale: 10, // resolución espacial de la
imagen
fileFormat:'GeoTIFF', // formato en que se
exporta la imagen
region:table});//recortaraláreadeinterés
```

Luego se descarga el resultado de cada proceso para cada temporalidad establecida y se verifica en el *software* SIG que los índices hayan sido calculados de manera correcta.

Etapa 4 – Análisis de cambios a nivel de cobertura

En esta etapa se analizan los cambios de cada índice por cobertura para la temporalidad de análisis. Para esto, en el *software* SIG seleccionado se ejecutan geoprocesos como se describe a continuación.

Paso 1 – Generación de archivos ráster que representan la media de cada período

Para cada índice espectral de cada período (seco y de lluvias) se genera un nuevo archivo ráster a partir del cálculo del promedio (media) de los valores del pixel, tomando como datos de entrada los resultados de cada temporalidad. Este proceso se hace con la herramienta Raster calculator, mediante la que se suman primero los archivos de las diferentes temporalidades y luego se dividen entre el número total de años de análisis, como lo muestra la siguiente ecuación:

Ecuación 55. Cálculo de la media por periodo para análisis espectrales.

$$Media_{Indice} = \frac{Indice_{Año1} + Indice_{Año2} + +Indice_{Año3} + Indice_{Año4}}{4}$$

Al tener los resultados de la media de cada temporalidad, dado que en la mayoría de casos los archivos resultantes tienen vacíos de información por presencia de nubes, especialmente en épocas de lluvias, se deben realizar tres procesos para rellenar los pixeles sin información y así contar con datos completos para el análisis. Estos se realizan con la calculadora ráster insertando los siguientes códigos:

- Identificar zonas vacías: IsNull("media_indice")
- Rellenar los pixeles vacíos ajustando el valor de pixeles; entre más grande sea, rellena mayor cantidad de vacíos: FocalStatistics("media_indice", NbrCircle(100,"CELL"),"MEAN")
- Condicional para identificar valores iguales a 1 que son valores faltantes: Con("%isnul%" == 1,"%relleno%"," media_indice")

Paso 2–Cálculo de estadísticos zonales por cobertura terrestre

Debido a que los humedales presentan variaciones en su dinámica, el cálculo de los estadísticos zonales a partir de cada imagen ráster resultante del cálculo de los índices espectrales se hace para calcular diversos estadísticos para áreas delimitadas en un archivo vectorial.

Dado que en la propuesta de Protocolo los datos de biomasa se analizan a partir de las coberturas terrestres, la capa a partir de la cual se calculan los estadísticos zonales es la de coberturas de la tierra (clasificación CLC) presentes en el área de interés, que corresponden a las siguientes clases: bosques y áreas seminaturales (clase 3), áreas húmedas (clase 4) y superficies de agua (clase 5).

El proceso se realiza usando la herramienta Zonal statistics del *software* ArcGIS, que calcula diversos estadísticos para una o varias zonas con base en los datos de las imágenes ráster que representan los valores de la media de los índices espectrales calculados para las temporadas seca y de lluvias.

Los estadísticos calculados son seleccionados según las necesidades. Se recomienda calcular los estadísticos descritos a continuación (ESRI, 2023); sin embargo, los que se requieren principalmente son la media y la desviación estándar para el cálculo del coeficiente de variación en el paso 3.

- Mínimo: se asigna el valor más bajo de cada zona.
- Máximo: se asigna el valor más alto en cada zona.
- Rango: es la diferencia entre los valores máximos y mínimos en cada zona.
- Media: se asigna el promedio de los valores de cada zona.
- Desviación estándar: se asigna la desviación estándar de los valores en cada zona.

El resultado es una tabla con los estadísticos seleccionados donde se presentan los valores por polígono según la clasificación CLC. Un ejemplo de cómo funciona el proceso se presenta en la Figura 52.

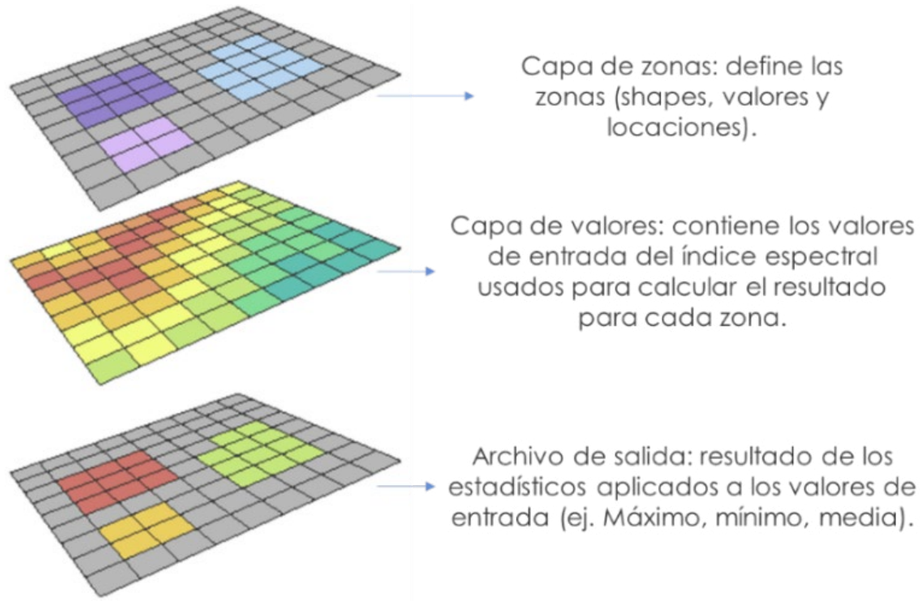


Figura 52. Archivos de entrada y archivo de salida para el proceso de cálculo de estadísticos zonales como tabla. Fuente: tomado y ajustado de https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-zonal-statistics-works.htm

Paso 3–Cálculo del coeficiente de variación (CV)

A partir de los valores obtenidos con los estadísticos zonales para la desviación estándar y la media, se procede al cálculo del CV. Este representa el cambio que experimenta el área de interés a través de la serie de tiempo, en este caso a nivel de polígono de coberturas. El CV se expresa en porcentaje para facilitar su interpretación, y se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 56. Cálculo del coeficiente de variación para índices espectrales.

$$CV = \left(\frac{DS}{Media}\right) * 100$$

Donde:
CV: coeficiente de variación
DS: desviación estándar

Para el caso de los índices espectrales de agua, en caso de que los valores sean negativos, la media se debe tomar como valor absoluto, de forma que estos valores sean positivos antes de proceder con el cálculo del CV. La interpretación del CV se hace de la siguiente forma:

- Valores altos indican que hubo cambios representativos en la dinámica del ecosistema.
- Valores bajos indican que el ecosistema acuático es estable y que no hubo mayores cambios.

Directrices IPCC

Compartimientos de monitoreo:
Biomasa, MOM, suelos y bioversidad

Altos valores de conservación (AVC)

Un AVC es un valor biológico, ecológico, social o cultural excepcionalmente significativo o de importancia crítica. La identificación de zonas de AVC en los humedales del Magdalena Medio y Bajo mediante el establecimiento de indicadores que se representan geográficamente es una importante estrategia para identificar escenarios de adaptación y mitigación frente al cambio climático. Los AVC se dividen en:

- **AVC 1. Diversidad de especies:** concentraciones de diversidad biológica que contengan especies endémicas o especies raras, amenazadas o en peligro de extinción, y que son de importancia significativa a escala global, nacional o regional.
- **AVC 2. Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje:** ecosistemas y mosaicos de ecosistemas de gran tamaño a escala de paisaje, importantes a escala global, nacional o regional, y que contienen poblaciones viables de la gran mayoría de las especies presentes de manera natural, bajo patrones naturales de distribución y abundancia.
- **AVC 3. Ecosistemas y hábitats:** ecosistemas, hábitats o refugios raros, amenazados o en peligro.

- **AVC 4 Servicios ecosistémicos:** servicios básicos del ecosistema en situaciones críticas, como la protección de áreas de captación de agua y el control de la erosión de suelos y laderas vulnerables.
- **AVC 5 Necesidades de las comunidades:** sitios y recursos fundamentales para satisfacer las necesidades básicas de las comunidades locales o los grupos indígenas (medios de vida, salud, nutrición, agua, etc.), identificados mediante el diálogo con dichas comunidades o pueblos indígenas.
- **AVC 6 Valores culturales:** sitios, recursos, hábitats y paisajes significativos por razones culturales, históricas o arqueológicas a escala global o nacional; o de importancia cultural, ecológica, económica, religiosa o sagrada. Son valores críticos para la cultura tradicional de las comunidades locales o pueblos indígenas.

Específicamente para sistemas de agua dulce o humedales continentales, como los del Magdalena Medio y Bajo, la High Conservation Value Resource Network o la Red de Recursos de ACV (HCVRN, 2013) proporciona algunos detalles (términos clave, ejemplos, fuentes de datos y enfoque) para la identificación y aplicación de los AVC, como se expone a continuación.

AVC 1. Diversidad de especies

Para este caso se sugiere revisar, entre otros, las listas rojas globales y nacionales en las categorías "vulnerable" o superiores; las listas de especies endémicas a escala de país; las bases de datos a nivel de país o locales (IUCN, FishBase, Ecorregiones de Agua Dulce del Mundo–FEOW, WildFinder, BioFresh, WDPA, entre otras); los datos regionales de Birdlife International sobre rutas de vuelo y migración y la Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres. Además, la Base de Datos Mundial de Áreas Protegidas (WDPA en inglés) para la verificación de sitios Ramsar; las listas de Áreas Clave para la Biodiversidad (ACB) y los mapas locales y nacionales de planicies de inundación, humedales estacionales y manantiales, entre otros. Asimismo, se recomienda el uso de fuentes de información locales, imágenes de satélite y la realización de estudios de campo, incluyendo entrevistas o encuestas a las comunidades.

Especies raras, amenazadas o en peligro (RAP)

- Presencia de áreas protegidas reconocidas designadas en su totalidad o en parte para la conservación de especies RAP o hábitats de agua dulce.
- Presencia de especies RAP que dependen de sistemas dulciacuícolas para la totalidad o una parte de su ciclo biológico (varias especies RAP, una población considerable de una especie RAP, refugios).
- Sistemas de agua dulce sin protección identificados como ACB, IBA (Áreas Importantes para Aves) o equivalentes.

Especies endémicas de agua dulce

- Presencia de especies endémicas (a escala nacional o de ecorregión) o especies de distribución restringida altamente dependientes de sistemas de agua dulce.
- Presencia de áreas protegidas reconocidas, designadas en su totalidad o en parte para la conservación de especies endémicas o de agua dulce de distribución restringida.

Áreas de uso temporal crítico, incluyendo refugios de corriente o térmicos, o áreas de desove o reproducción, cría, migración, alimentación o hibernación

- Rutas de migración o dispersión críticas para peces, aves acuáticas, especies de mamíferos, anfibios o reptiles dependientes de sistemas de agua dulce, o invertebrados acuáticos; por ejemplo, llanuras de inundación, estanques profundos, corredores del cauce de ríos, etc.
- Presencia de áreas protegidas reconocidas designadas en su totalidad o en parte para la conservación de sistemas de agua dulce de uso crítico en ciertos periodos.

AVC 2. Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje

Sistemas de agua dulce con patrones hídricos intactos

- Lagos y humedales con periodos hídricos naturales.

AVC 3. Ecosistemas y hábitats

- Ecosistemas, hábitats o refugios raros, amenazados o en peligro.

AVC 4. Servicios del ecosistema básicos en situaciones críticas

Cuencas hidrográficas o de captación críticas para la gestión o el mantenimiento de eventos extremos relacionados con el caudal (por ejemplo, inundaciones o sequías)

- Llanuras de inundación y otros humedales.

Franjas de amortiguamiento con vegetación de ribera o llanuras de inundación intactas

- Llanuras de inundación sin diques.

AVC 5. Necesidades básicas de comunidades locales

Sitios y recursos fundamentales para satisfacer las necesidades básicas de las comunidades locales

- Poblaciones de animales o plantas de agua dulce de las que dependen las comunidades locales.

Metodología para identificar zonas con AVC en humedales del Magdalena Medio y Bajo

La metodología presenta los lineamientos para identificar los criterios, de acuerdo con cinco AVC, a partir de las condiciones analizadas para el área de interés que corresponda a un humedal. Así, a futuro, las zonas identificadas con AVC pueden ser incorporadas a la planificación, implementación y evaluación del estado de los humedales del país, teniendo en cuenta la alta diversidad cultural, social, biológica y ecológica. Para la zonificación se propone como método la evaluación multicriterio (EMC), mediante un Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que permita realizar la valoración de los indicadores planteados, de manera que se obtenga un resultado basado en procesos estadísticos adecuados para ser aplicados con herramientas SIG. Esto incluye el alistamiento de los insumos geográficos, la reclasificación de valores y la superposición ponderada de los insumos cartográficos primarios y secundarios para la delimitación de las zonas con AVC propuestos desde los compartimientos de biodiversidad, biomasa y suelos, asignando ponderaciones calculadas con el método de Saaty (1980) del PAJ.

Fase 1. Identificación de los AVC del área de interés

Primero, se identifican las categorías que aplican de acuerdo con la HCVRN (Brown y Senior, 2014). Esta red de expertos ayuda a los usuarios a identificar, gestionar y monitorear diferentes AVC en sitios de desarrollo actuales o potenciales, mediante herramientas aplicables globalmente y que funcionan a diferentes escalas (paisajes o jurisdicciones, granjas, plantaciones, unidades de gestión, pequeñas propiedades), ecosistemas (desde bosques hasta pastizales y sistemas acuáticos) y sistemas productivos (agricultura, silvicultura, acuicultura, entre otros).

Después de identificar los criterios, se plantean los indicadores para cada uno, teniendo en cuenta que se obtenga una respuesta según su definición. Con el listado de indicadores propuestos por los profesionales, se procede a la revisión de información y a la generación de insumos geográficos para la zonificación, como se describe en la Fase 2.

Fase 2. Revisión y generación de insumos geográficos y cartográficos del área de interés

Se hace la revisión de información espacial existente para el área de estudio, la cual puede variar acorde con la escala de trabajo definida según el detalle del resultado esperado. Se selecciona la información primaria y secundaria, se realiza una priorización de las variables y el respectivo acondicionamiento cartográfico de la información disponible, teniendo en cuenta que los datos geográficos pueden ser de tipo vectorial y/o ráster. Para aquellos casos en que la información geográfica no esté disponible, se planeta generarla dentro de los alcances de esta propuesta de Protocolo. Esto se hace en formato vectorial o ráster para su representación espacial, de acuerdo con los recursos y el tiempo necesarios.

La revisión de la información geográfica de las variables espaciales establecidas para cada criterio de AVC se realiza a través de la verificación de los siguientes aspectos:

- Clase de formato: vectorial o ráster.
- Calidad de la información geográfica en lo referente a escala, resolución y demás factores que permitan obtener resultados precisos para la zonificación.
- Metodologías para la generación de insumos disponibles.
- Tipo de información geográfica temática, necesaria para la definición de criterios e indicadores.

Es importante tener en cuenta que los insumos se encuentran a diferentes escalas cartográficas y se han elaborado para diferentes temporalidades, según los tiempos de generación cartográfica de las entidades productoras; sin embargo, debido a que en algunos casos es la única información con que se cuenta, se debe dejar explícita la descripción de cada insumo usado o realizado para el proceso.

No obstante, se recomienda contar con información espacial a una escala mayor (1:25 000 o menos) para que, con la zonificación, los resultados tengan más detalle. Si se tienen todas las capas geográficas de entrada, uno de los procesos que se puede hacer es un re-muestreo (*resample*) a un tamaño de pixel igual para todas ellas. Al contar con todas las capas geográficas, se procede a reclasificar los valores en una escala común de evaluación que abarque aspectos de adecuación, preferencia y riesgo para la zonificación. De esta manera, se busca uniformizar la clasificación.

Fase 3. Evaluación multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)

En la tercera fase se emplea la EMC y se crea la matriz de comparación entre criterios. Para esto, se propone adoptar la metodología basada en el PAJ, en la cual se aplican procesos de decisiones multicriterio, cuyo uso p ermite solucionar problemas complejos que pueden incluir diferentes variables o indicadores (Saaty, 2008); en este caso, variables espaciales para la zonificación de AVC. Los criterios se seleccionan teniendo en cuenta los niveles jerárquicos del PAJ, y la recomendación es que se involucre la escala de valoración de expertos (Fuenzalida Díaz et al., 2013). El PAJ se basa en una jerarquía definida por niveles de importancia, en la que se manejan relaciones de forma tal que, nivel a nivel, se planteen nodos para alcanzar el objetivo de la investigación (Figura 53). El nivel 0 contiene la meta u objetivo de la investigación; el nivel 1 posee los criterios considerados para la zonificación de AVC; en el nivel 2 se encuentran los factores representados por los indicadores; en el nivel 3 se generan las alternativas; y en el nivel 4 se encuentran las decisiones. Para cada uno de los niveles se realiza revisión, verificación y validación a través de una calificación que se realiza de acuerdo con la importancia propia de la zonificación de AVC en el área de trabajo definida. Para esto, se aplica la matriz de comparación de juicio de decisión (Saaty, 2008).

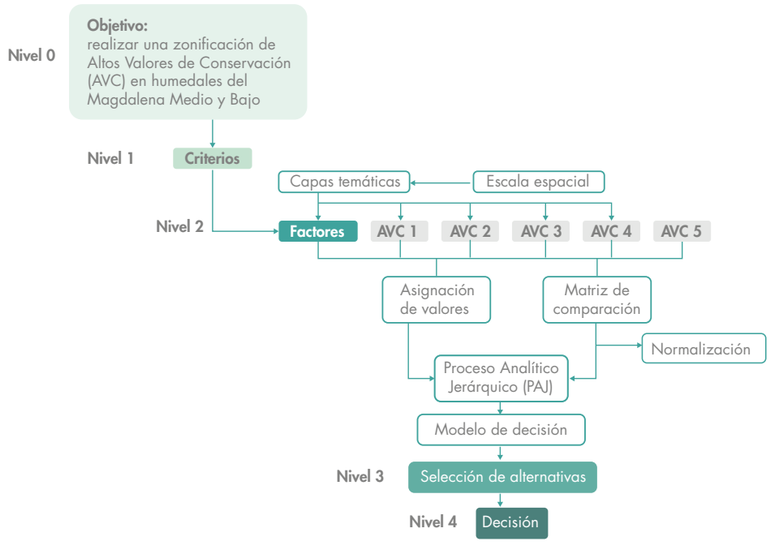


Figura 53. Modelo jerárquico diseñado para identificar zonas con Altos Valores de Conservación. Fuente: elaboración propia (2024).

Nivel 0 – Objetivo de la investigación

Generar los mapas de las zonas con AVC mediante un proceso de evaluación multicriterio en el entorno de un SIG.

Nivel 1 – Criterios

En este caso son cinco los criterios definidos para los AVC, considerados como puntos de referencia para la toma de decisiones. Estos son medidos o caracterizados de acuerdo con su importancia, y hacen parte del resultado final del proceso de EMC y de la puntuación que se les otorgue (Gómez y Cano, 2006).

Nivel 2 – Factores

Los factores están representados por los indicadores comprendidos para cada AVC identificado. Dentro de este nivel se incluyen características que resaltan las capacidades de la biodiversidad, los ecosistemas, los hábitats, las coberturas terrestres y los procesos ecológicos, y son valoradas en una escala jerárquica (Gómez y Cano, 2006). Además, se realizan tres actividades principales:

- Asignación de valores: se hace la evaluación del modelo PAJ, representado por juicios de valor obtenidos a partir de una escala de medida de números, mediante comparaciones entre los criterios. En la Tabla 41 se presentan los valores principales del PAJ planteados por Saaty (2008) como escala fundamental de preferencia, de manera que la evaluación sea hecha por un grupo de expertos en la temática.
- Generación de la matriz de comparación de criterios: se construye una matriz con filas y columnas en las que se diligencian los criterios; en este caso son cinco criterios. Al tener la matriz, se asignan los valores de acuerdo con la escala del 1 al 9, que indica la importancia de un criterio frente a otro; en la valoración participan los expertos, quienes asignan calificaciones de manera individual para luego llegar a un consenso final.

La valoración de un criterio frente a él mismo siempre será igual a 1. La valoración inversa se calcula dividiendo 1 entre el valor asignado en la primera evaluación; por ejemplo, si al criterio "diversidad de especies" se le asigna una valoración de 7 frente al criterio "ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje", al valor de este último frente al primero se le asigna un valor de 1/7. Un ejemplo de la plantilla que se construye para la valoración se presenta en la Tabla 42.

Tabla 41. Valores por intensidad de la escala del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 2008).

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	a(ij)=1/a(ji)	Cuando i tiene un valor respecto a j igual a un entero de los indicados arriba, entonces el valor de j respecto a i es igual a 1/a.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 42. Ejemplo de matriz de comparación de criterios con la escala de valores del PAJ.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	5	7	9
C2	1/3	1	5	3	3
C3	1/5	1/5	1	9	7
C4	1/7	1/3	1/9	1	5
C5	1/9	1/3	1/7	1/5	1

Fuente: elaboración propia (2024).

- Normalización de los valores: se estandarizan los valores para integrar todos los criterios o factores en un solo método de evaluación que se ejecute mediante una misma escala de comparación y, así, se elimina la dispersión de la información identificada (Berumen y Redondo, 2007).

De acuerdo con lo anterior, este proceso se aplica a la matriz de comparaciones. Para ello, el PAJ asigna el peso de cada uno de los criterios (Wi) y el índice de consistencia (Ci) de los juicios de valor entre pares de criterios (Saaty, 2008).

Peso (wi): W1= (1*I1/I2*I1/I3*…I1/In) 1/n	**Índice de consistencia**: C1= W1/W
W2= (I2/I1*1*I2/I3*…I2/In) 1/n	C2= W2/W
Wn= (In/I1*In/I2*…1) 1/n	Cn= Wn/W

Es importante tener en cuenta que el PAJ puede tener debilidades en el momento de analizar decisiones de tipo ambiental, como es el caso de la identificación de zonas de AVC mediante el uso de paneles de expertos, debido a una falta de consistencia (Benítez et al., 2011). Esto puede ser resultado de ausencia de información o conocimiento al dar una valoración a cada criterio (Stein y Mizzi, 2007), poca experiencia en la metodología de evaluación o mala interpretación de las instrucciones sobre el proceso (Noble, 2004).

Nivel 3 – Alternativas

Hacen referencia a los resultados obtenidos luego de la valoración de criterios por medio de los cuales se identifican las alternativas que funcionan como propuestas factibles. Estas son la base primordial para alcanzar el objetivo general, que es realizar la zonificación de los AVC según las características de cada indicador, las cuales además se convierten en pros y contras para este proceso.

Nivel 4 – Decisión

En este nivel se analiza el modelo, la emisión de juicios y las evaluaciones que se generaron en la matriz de comparaciones. La emisión de juicios se basa en investigaciones científicas consultadas y, de acuerdo con las características propias del área de estudio, la evaluación se realiza usando combinaciones binarias entre pares frente a un tercer elemento, entre criterios, factores y alternativas.

Fase 4 – Superposición ponderada de capas geográficas para obtener el resultado de la zonificación

Dado que en la presente metodología se puede establecer determinado número de criterios con diferente número de indicadores según los AVC identificados, primero se debe obtener un único archivo geográfico (vectorial o ráster) por cada criterio, de manera que la superposición final se haga a partir de cinco capas geográficas en formato ráster. Los valores de las capas de datos de entrada deben corresponder a un rango entre adecuado y no adecuado (por ejemplo, de 1 a 5), y en la capa de idoneidad resultante las áreas con valores altos son las más adecuadas para que se dé la actividad evaluada, que en este caso sería la identificación de los AVC. Después de clasificar las capas geográficas, se procede al cruce de las capas geográficas de los criterios, mediante la herramienta "Unión". Al tener la capa final con los atributos de los AVC se crea un nuevo campo en la tabla de atributos para luego, con la calculadora de campos, multiplicar los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia (matriz de comparación de criterios); los pesos se representan en decimales dividiendo el valor del porcentaje por 100, como lo indica la siguiente ecuación.

Ecuación 57. Cálculo de superposición ponderada para procesos de zonificación.

$$Suma\ ponderada = (C1 * P1) + (C2 * P2) + (C3 * P3) + (C4 * P4) + (C5 * P5)$$

Donde:
Ci: valor de cada criterio
Pi: ponderación o peso de cada criterio

Esta metodología es muy usada en las evaluaciones multicriterio, debido a que algunos criterios de elegibilidad son más importantes que otros. Por eso, es necesario comparar varios candidatos adecuados y establecer si cumplen con un conjunto de criterios de diferente importancia y en qué grado (Jabbar et al., 2009).

Muestreo en el Complejo Cenagoso Zapatosa. Fotografía: José Manuel Pantoja.

Variables unificadas para el muestreo de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Como ejercicio final, se presenta la compilación de todas las variables propuestas para el monitoreo del contenido de carbono en humedales para cada uno de los comportamientos y procesos; esto con el fin de simplificarles a los implementadores la selección de las variables a muestrear y hacer costo eficiente el uso del recurso y del tiempo dispuesto para la evaluación del estado del ecosistema de humedal para el motor de transformación de cambio climático (Tabla 43).

Tabla 43. Variables finales por compartimiento y proceso para la implementación de ejercicios de monitoreo para estimar contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Comunidad/estrato/característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
Compartimiento biomasa								
Arbóreo, arbustivo	DAP	Cuantitativa	Local	Mínimo	N/A	Forestal (F), pastizal (G), herbazal (Hz), otra vegetación leñosa (OVL), humedal (W), cultivo (C)	cm	Anual
	Altura total						m	
	Densidad de madera						g/cm^3	
Herbáceo	Peso húmedo						kg	
	Peso seco							
	Contenido de carbono			Complementario			%	
Vegetación acuática	Peso húmedo			Intermedio			kg	Semestral
	Peso seco							
	Contenido de carbono			Complementario			%	
Compartimiento Materia Orgánica Muerta (MOM)								
Hojarasca, mantillo	Peso húmedo	Cuantitativa	Local	Mínimo	N/A	Forestal (F), pastizal (G), herbazal (Hz), OVL , humedal (W), cultivo (C)	kg	Semestral
	Peso seco						kg	
	Contenido de carbono			Complementario			%	
Compartimiento suelos								
Terrestre	Densidad aparente	Cuantitativa	Local	Mínimo	1:100 000	0-25 cm	gr/cm^3	Bienal– Trienal[1]
	Arena			Complementario		25-50 cm	%	
				Mínimo		0-25 cm		
	Limo			Complementario		25-50 cm		
				Mínimo		0-25 cm		

Comunidad/estrato/característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
Terrestre	Arcilla	Cuantitativa	Local	Complementario	1:100 000	25-50 cm	%	Bienal– Trienal[1]
				Mínimo		0-25 cm		
	Contenido de carbono			Complementario		25-50 cm		
				Mínimo		0-25 cm		
	Carbono orgánico almacenado			Complementario		25-50 cm		
				Mínimo		0-25 cm	t/ha	
				Intermedio		25-50 cm		
				Complementario		0-50 cm		
	Fraccionamiento de humus/Carbono total					0-25 cm	%	
	Fraccionamiento de humus/Carbono extractable							
	Fraccionamiento de humus/Ácidos húmicos							
	Fraccionamiento de humus/Ácidos fúlvicos							
Compartimiento sedimentos								
Transición y cuerpo de agua	Arena	Cuantitativa	Local	Mínimo	1:100 000	Fondo acuático	%	Bienal– Trienal[1]
	Limo							
	Arcilla							
	Contenido de carbono							
	Arena					0-25 cm en áreas superficiales de depósito de sedimentos, arenales o afloramientos		
	Limo							
	Arcilla							
	Contenido de carbono							
Compartimiento biodiversidad[2,3]								
Fitoplancton	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo	1:25 000	Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	N/A	Semestral
	Densidad	Cuantitativa					Ind/ml	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
Fitoplancton	Biomasa	Cuantitativa	Local	Complementario	1:25 000		µg/ml	Semestral
	Biomasa de carbono						pgC/ml	
Ficoperifiton	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo		Sustratos en orillas de cuerpo de agua	N/A	

Comunidad/estrato/ característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
Ficoperifiton	Densidad	Cuantitativa	Nacional	Mínimo	1:25 000	Sustratos en orillas de cuerpo de agua	Ind/cm^2	Semestral
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Biomasa		Local	Complementario			µg/cm^2	
	Biomasa de carbono						pgC/cm2	
Zooplancton	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo		Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	N/A	
	Densidad	Cuantitativa					Ind/L	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Biomasa	Cuantitativa	Local	Complementario			µgPS/L	
	Biomasa de carbono						µgC/L	
Macroinvertebrados asociados	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo		Plantas acuáticas en cuerpo de agua y/o área litoral	N/A	
	Densidad	Cuantitativa					Ind/m^2	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Biomasa	Cuantitativa	Local	Complementario			g/m^2	
Macroinvertebrados bentónicos	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo		Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	NA	
	Densidad	Cuantitativa					Ind/m^2	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
Macroinvertebrados bentónicos	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Biomasa	Cuantitativa	Local	Complementario			g/m^2	

Comunidad/estrato/ característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
Peces	Listado de composición	Cualitativa	Nacional	Mínimo	1:25 000	Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	N/A	Semestral
	Abundancia	Cuantitativa					Ind	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Biomasa	Cuantitativa					G	
	Talla						Cm	
	Aspectos biogeográficos	Cualitativa					N/A	
	Categorías de conservación							
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
	Hábitos migratorios							
Macrófitas	Listado de composición		Nacional	Mínimo			%	
	Cobertura	Cuantitativa					S	
	Riqueza						Nats/ind	
	Índice de diversidad						N/A	
	Índice de equidad							
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
Aves	Listado de composición		Nacional	Mínimo		Coberturas homologadas según IPCC	Ind	
	Abundancia	Cuantitativa					S	
	Riqueza						Nats/ind	
	Índice de diversidad						N/A	
	Índice de equidad							
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa				Coberturas homologadas según IPCC		
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							

Comunidad/estrato/ característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
	Hábitos migratorios							
Anfibios	Listado de composición		Nacional	Mínimo				
	Abundancia	Cuantitativa					Ind	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad							
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa					N/A	
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
Reptiles	Listado de composición		Nacional	Mínimo	1:25 000	Coberturas homologadas según IPCC		Semestral
	Abundancia	Cuantitativa					Ind	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad							
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa					N/A	
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
Mamíferos	Listado de composición		Nacional	Mínimo				
	Abundancia	Cuantitativa					Ind	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad							
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa					N/A	
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							

Comunidad/estrato/ característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
	Hábitos migratorios							
Vegetación arbórea inundable	Listado de composición		Nacional	Mínimo		Coberturas homologadas según IPCC		Anual
	Abundancia	Cuantitativa					Ind	
	Riqueza						S	
	Índice de diversidad						Nats/ind	
	Índice de equidad						N/A	
	Índice de dominancia							
	Descripción de principales aspectos ecológicos	Cualitativa						
	Aspectos biogeográficos							
	Categorías de conservación							
	Aspectos comerciales, valor de uso e importancia cultural		Regional	Intermedio				
	DAP	Cuantitativa	Local	Complementario	1:25 000		Cm	
	Altura total						m	
	Altura de ramificación							
	Cobertura de copa							
Bacterioplancton	Biomasa		Regional	Intermedio		Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	Cel/L	Anual
Hidrológica	Producción primaria bruta					Aguas abiertas (cuerpo de agua)	mgC/m³/h	
	Producción primaria neta							
	Respiración							
	Transparencia Secchi		Nacional	Mínimo		Aguas abiertas (cuerpo de agua) y/o litoral	m	Semestral
	Temperatura del agua						°C	
	Conductividad eléctrica						µS/cm	
	Turbiedad						UNT	
	Oxígeno disuelto/Saturación de oxígeno[4]						mg/L y/o %Saturación	
	pH						Unidades	
	Potencial Redox		Regional	Intermedio			mV	
	Carbono orgánico total						mg/L	
	Demanda Biológica de Oxígeno							
	Demanda Química de Oxígeno							
	Fósforo total/Ortofosfatos[4]							
	Nitrógeno total, nitritos y nitratos							

Comunidad/estrato/ característica	Variable	Tipo de variable	Alcance del muestreo	Categoría de monitoreo	Escala espacial de monitoreo	Sector o zona de muestreo	Unidad de medida	Periodicidad de medición
Hidrológica	Temperatura ambiente	Cuantitativa			1:25 000	Cuerpo de agua	°C	
	Profundidad total		Nacional	Mínimo			m	
	Área total del espejo de agua						m^2, ha o equivalentes	Anual
	Morfometría		Local	Complementario			N/A	Trienal
	Volumen total						m^3	
	Tasa del flujo del agua						m^3/s	
Componente cartográfico (SIG)								
Vegetación acuática y terrestre	Salud y la densidad de la vegetación	Cuantitativa	Regional	Mínimo	1:25 000	Bosque, herbazal, arbustal, pastizal, cultivos, OVL	Adimensional	Mensual
	Cantidad de clorofila en las hojas		Local	Intermedio				
Vegetación terrestre	Área de las hojas en relación con el área terrestre							
Superficies de agua	Presencia de agua		Regional	Mínimo				
Terrestre	Afectación por incendios		Local	Intermedio				
Acuático	Dinámica de extensión del humedal		Regional	Mínimo		Humedal	ha	Trimestral
	Distribución espacial de la vegetación acuática		Local	Intermedio	Menor a 1:25 000			Quincenal
Superficies de agua	Dinámica hídrica		Regional	Mínimo	1:25 000		Adimensional	Trimestral
Inclinación del terreno	Pendiente			Intermedio		Bosque, herbazal, arbustal, pastizal, cultivos, OVL, humedal	Grados/%	Anual
Ambiental	Precipitación			Mínimo			mm	Mensual
	Temperatura						°C	
	Humedad relativa			Intermedio			%	
Fauna acuática y terrestre	Distribución potencial			Complementario			Adimensional	Trimestral
Biodiversidad	Riqueza		Regional	Complementario	1:50 000	Bosque, herbazal, arbustal, pastizal, cultivos, OVL, humedal	Número sp.	
Biodiversidad	Abundacia		Regional	Complementario	1:50 000	Bosque, herbazal, arbustal, pastizal, cultivos, OVL, humedal	Número de individuos por unidad de área o volumen	
Datos de actividad: coberturas de la tierra (por periodo de tiempo y temporalidad)	Área de las coberturas de la tierra		Regional	Mínimo	1:100 000	Coberturas de la tierra según IPCC (asentamientos, tierras de cultivo, pastizales, forestales, herbazales, OVL, otras tierras, humedales y cuerpos de agua)	Bienal	Bienal
Datos de actividad: cambios de las coberturas de la tierra por periodo y temporalidad	Diferencia del área de las coberturas entre los periodos y temporalidad definida							

Fuente: elaboración propia (2024).

1 La recomendación para la periodicidad del monitoreo es Bienal o trienal, especialmente si se asocia con medición de biomasa, siempre que no haya intervención o cambios en la cobertura dada por gestión del terreno; si ese es el caso, se debe hacer medición anual después de la intervención.

2 Los grupos biológicos (comunidades) que se presentan en esta matriz (excepto el bacterioplancton) corresponden a los analizados en el piloto de validación de la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Sin embargo, se anota que para cada proyecto se deben priorizar los grupos en función de las características biológicas y ecológicas del humedal, así como de los intereses particulares de conservación y manejo.

3 En la mayoría de los casos se pueden utilizar unidades equivalentes, en función de los métodos usados para los análisis.

4 Se propone al menos la medición de una de las variables mencionadas, pero, dependiendo del presupuesto y los objetivos específicos del proyecto, pueden ser todas.

Índicadores propuestos para el seguimiento a la estimación de los contenidos de carbono: un sistema de monitoreo

Desde los diferentes compartimientos se proponen indicadores claves para el establecimiento de un sistema de monitoreo del contenido de carbono y la biodiversidad de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. Esto con la finalidad de alimentar periódicamente la base de datos del cálculo de dichos indicadores y así realizar un seguimiento eficiente a la dinámica del carbono en estos ecosistemas estratégicos del país, para tomar acciones efectivas de gestión en procesos de adaptación/mitigación/compensación frente al cambio climático.

Para estos indicadores se crea una hoja metodológica con base en los parámetros del DANE y las hojas de cálculo del IDEAM. En estas se cobijan los principales aspectos para realizar una operación estadística. Todas las variables que se proponen en estos indicadores están contenidas en las metodologías de la propuesta del Protocolo.

Tabla 44. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva: componente arbóreo, arbustivo y herbáceo.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Contenido de carbono en biomasa viva: componente arbóreo, arbustivo y herbáceo	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Biomasa viva: componente arbóreo, arbustivo y herbáceo
Unidad de medida	tC/ha (toneladas de carbono por hectárea)
Periodicidad	X Anual; Semestral; Trimestral Mensual; Diario; Otro Otra, cuál: _____
Cobertura geográfica	Nacional; Departamental Municipal; X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone medición anual, sin embargo el reporte será bienal, en línea con el Inventario Forestal Nacional (IFN) y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC).

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Descripción del indicador	
Definición	Contenido de carbono para la vegetación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo en sus componentes herbáceo, arbustivo y arbóreo asociados con la dinámica de fijación de carbono en la biomasa mediante la fotosíntesis. De acuerdo con Brown et al. (1996), la biomasa representa la cantidad de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o fijado y conservado en forma de biomasa en función de la composición florística, la edad y la densidad de la población de cada componente en la comunidad vegetal.
Pertinencia	El indicador permite cuantificar los contenidos de carbono de la biomasa viva para los componentes arbóreo, arbustivo y herbáceo que se consideran estables en el año de medición, en relación con la vegetación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Compartimiento definido por el IPCC en donde se almacena el carbono. La biomasa viva está conformada por la biomasa aérea y la biomasa subterránea. La primera hace referencia a toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje; la biomasa subterránea es la biomasa de las raíces, con exclusión de raíces finas de menos de 2 mm de diámetro. Para adelantar la medición de cada componente se deben establecer parcelas semipermanentes en las zonas de muestreo definidas en el área de análisis, de acuerdo con el proceso de homologación de suelos y coberturas indicado y detallado en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024).
Fórmula de cálculo	Carbono en cobertura tipo bosque que incluye elementos de porte arbustivo y arbóreo; se calcula con la siguiente fórmula: $C_{bos} = \frac{BT_{parcela} \times 0.47}{Área_{parcela}}$ Donde: C_{bos}: carbono en cobertura tipo bosque $BT_{parcela}$: biomasa total de la parcela $Área_{parcela}$: área de la parcela (m^2) $C_{no\ bos}$ o carbono en cobertura tipo no bosque (elementos herbáceos); se calcula mediante la siguiente fórmula: $C_{no\ bos} = \frac{BP_{componente} \times 0{,}42}{Área_{subparcela}}$ Donde: $C_{no\ bos}$: carbono en cobertura tipo no bosque $BP_{componente}$: biomasa promedio del componente (herbáceo) $Área_{subparcela}$: área de la subparcela (m^2) Es importante aclarar que el valor entre paréntesis (0,42) corresponde a la fracción de carbono estimada para cada componente.
Metodología de cálculo	Se recomienda seguir la metodología definida en la etapa de análisis de la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024) en las secciones: • Estimación de biomasa por medio del método directo (cosecha de material) para el componente herbáceo. • Estimación de biomasa a través del método indirecto, es decir, mediante ecuaciones alométricas (componente arbustivo y arbóreo). • Estimación de contenidos de carbono por componente.
Interpretación	El indicador permite identificar los contenidos de carbono asociados a la biomasa viva en la vegetación; con el monitoreo periódico es posible determinar si se ha ganado o perdido carbono en el área de interés.
Restricciones o limitaciones	Se recomienda una cobertura temporal bienal; sin embargo, si en el área de interés ocurre un evento de disturbio con pérdida de la biomasa evidente, el muestreo debe realizarse inmediatamente después de dicho evento.
Facilidad de obtención	Fácil X Regular Difícil ¿Por qué?: requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado para la toma de datos en campo y para el análisis de laboratorio cuando se hace la estimación de contenidos de biomasa y carbono

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 45. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva: componente vegetación acuática y MOM.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Contenido de carbono en biomasa viva: componente vegetación acuática y MOM	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Biomasa viva componente (vegetación acuática) y biomasa muerta (MOM)
Unidad de medida	tC/ha (toneladas de carbono por hectárea)
Periodicidad	Anual X Semestral Trimestral Mensual Diario Otro Otra, cuál: _____

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal X — Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo
Cobertura temporal	Se propone medición anual, sin embargo el reporte será bienal, en línea con el Inventario Forestal Nacional (IFN) y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC).
Descripción del Indicador	
Definición	Contenido de carbono para la vegetación acuática, asociado con la dinámica de fijación de carbono en la biomasa mediante la fotosíntesis y el contenido de carbono de la biomasa muerta (MOM). Está relacionado con la dinámica de productividad de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Pertinencia	El indicador permite cuantificar los contenidos de carbono de la biomasa viva para la vegetación acuática y la biomasa muerta (MOM) de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Compartimientos definidos por el IPCC en donde se almacena carbono; la biomasa viva está conformada por la biomasa aérea y la biomasa subterránea. La MOM es la biomasa muerta en diferentes estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (hojas, ramas y cáscaras de frutos). Para adelantar la medición de cada componente se deben establecer parcelas semipermanentes en las ZM definidas en el área de análisis, de acuerdo con el proceso de homologación de suelos y coberturas indicado y detallado en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024).
Fórmula de cálculo	Carbono en cobertura tipo no bosque (vegetación acuática); la fórmula es la siguiente: Donde: $C_{no\ bos\ veg\ acuática} = \frac{BP_{componente} \times 0{,}44}{Área_{subparcela}}$ $C_{no\ bos\ veg\ acuática}$: carbono en cobertura tipo no bosque $BP_{componente}$: biomasa promedio del componente (vegetación acuática) $Área_{subparcela}$: área de la subparcela (m^2) Carbono en materia orgánica muerta; la fórmula a emplear es la siguiente: $C_{MOM} = \frac{BP_{MOM} \times 0{,}43}{Área_{subparcela}}$ Es importante aclarar que el valor entre paréntesis (0,43) corresponde a la fracción de carbono estimada para cada componente.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Metodología de cálculo	Los componentes vegetación acuática y materia orgánica muerta (MOM) deben monitorearse al menos dos veces al año teniendo en cuenta la estacionalidad del ecosistema; para generar un valor único en el año se propone trabajar con el promedio de los valores de contenido de carbono obtenidos para la temporada seca y la temporada de lluvias.
Interpretación	El indicador permite identificar los contenidos de carbono asociados a la biomasa viva en la vegetación acuática y MOM; a través del monitoreo periódico es posible determinar si se ha ganado o perdido carbono en estos componentes en el área de interés.
Restricciones o limitaciones	Si durante el proceso de muestreo no es posible adelantar la medición de la vegetación acuática, se puede presentar la estimación únicamente para la MOM.
Facilidad de obtención	Fácil — X Regular — Difícil ¿Por qué?: Requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado para la toma de datos en campo y para el análisis de laboratorio cuando se hace la estimación de contenidos de biomasa y carbono.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 46. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de contenido de carbono en biomasa viva y muerta.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Contenido de carbono en biomasa viva y muerta	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Biomasa viva: componentes arbóreo, arbustivo, herbáceo, vegetación acuática Biomasa muerta: MOM
Unidad de medida	tC/ha (toneladas de carbono por hectárea)
Periodicidad	X Anual — Semestral — Trimestral Mensual — Diario — Otro Otra, cuál: _____

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone medición anual, sin embargo el reporte será bienal, en línea con el Inventario Forestal Nacional (IFN) y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC).
Descripción del Indicador	
Definición	Contenido de carbono de la vegetación hidrófita, asociado con la dinámica de fijación de carbono en la biomasa mediante la fotosíntesis, y contenido de carbono de la biomasa muerta (MOM), asociado con la dinámica de productividad de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Pertinencia	El indicador permite cuantificar los contenidos de carbono de la biomasa viva y muerta para la vegetación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Compartimientos definidos por el IPCC en donde se almacena carbono. La biomasa viva está conformada por la biomasa aérea y la biomasa subterránea de los componentes arbóreo, arbustivo, herbáceo y vegetación acuática. La primera hace referencia a toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje; la biomasa subterránea comprende la biomasa de las raíces, con exclusión de raíces finas de menos de 2 mm de diámetro. Adicionalmente, la MOM es la biomasa muerta en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (hojas, ramas y cáscaras de frutos). Para adelantar la medición de cada componente se deben establecer parcelas semipermanentes en las zonas de muestreo definidas en el área de análisis, de acuerdo con el proceso de homologación de suelos y coberturas, procesos indicados y detallados en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024).
Fórmula de cálculo	El cálculo del indicador se realiza mediante las siguientes ecuaciones: $C_{componente} = C_{bos} + C_{no\ bos\ (herbácea)} + C_{no\ bos\ (veg\ acuática)} + C_{MOM}$ Donde: $C_{componente}$: contenido de carbono por componente (kC/m²) C_{bos}: carbono en cobertura tipo bosque $C_{no\ bos\ (herbácea)}$: carbono en cobertura no bosque (herbácea) $C_{no\ bos\ (veg\ acuática)}$: carbono en cobertura no bosque (vegetación acuática) C_{MOM}: carbono en materia orgánica muerta De la ecuación anterior: $C_{total} = C_{componente} \times \frac{1\ Mg}{100\ kg} \times \frac{10000\ m^2}{ha}$ Donde: C_{total}: contenido de carbono total de biomasa viva y muerta (tC/ha) $C_{componente}$: contenido de carbono del componente kC/m²

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Metodología de cálculo	Se recomienda seguir la metodología definida en la etapa de análisis de la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024) en las secciones: • Estimación de biomasa por medio del método directo (cosecha de material). • Estimación de biomasa a través del método indirecto mediante ecuaciones alométricas. • Estimación de contenidos de carbono por componente para el compartimiento de biomasa y MOM.
Interpretación	El indicador permite identificar los contenidos de carbono asociados a la biomasa viva y muerta; a través del monitoreo periódico es posible determinar si se ha ganado o perdido carbono en la zona de estudio.
Restricciones o limitaciones	Se recomienda una cobertura temporal bienal; sin embargo, si en el área de interés ocurre un evento de disturbio con pérdida de la biomasa evidente, el muestreo debe realizarse inmediatamente después de dicho evento.
Facilidad de obtención	Fácil — X Regular — Difícil ¿Por qué?: Requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado para la toma de datos en campo y para el análisis de laboratorio cuando se hace estimación de contenidos de biomasa y carbono.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 47. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de reserva de carbono almacenado en suelos.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Reserva de carbono almacenado en suelos	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Suelos
Unidad de medida	tC/ha (toneladas de carbono por hectárea)
Periodicidad	Anual — Semestral — Trimestral Mensual — Diario — X Otro Otra, cuál: bienal o trienal
Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Cobertura temporal	• De acuerdo con el Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización (IDEAM et al., 2017), la periodicidad del monitoreo depende de las necesidades para el manejo de la salinización y se propone una temporalidad quinquenal (cada cinco años) para el nivel regional, la cual aplica para este indicador. • Tomando esta información como referente nacional, la periodicidad del monitoreo es bienal o trienal, siempre que no haya intervención o cambios en la cobertura dada por gestión del terreno; en este último caso se debe hacer medición anual después de la intervención. • Esta periodicidad anual aplica igualmente para zonas de uso intensivo (cultivos). • La información del indicador tiene validez hasta que se realice un nuevo monitoreo.
Descripción del Indicador	
Definición	La reserva de carbono almacenado en suelos indica la cantidad de materia orgánica que, mediante procesos de mineralización y humificación realizada por microorganismos, se transforma y se almacena en el suelo en forma de sustancias complejas y estables constituidas por carbono.
Pertinencia	El indicador permite cuantificar el carbono almacenado en los suelos a la(s) profundidad(es) determinada(s) en el diseño metodológico.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos
Marco conceptual	El suelo constituye uno de los principales sumideros de carbono, donde se almacena en formas orgánicas, correspondiente al Carbono Orgánico del Suelo. Además, el suelo es un recurso muy vulnerable frente al cambio climático; los impactos generados por la intervención y el uso inadecuado pueden degradarlo y con ello convertir la reserva de carbón en Gases de Efecto Invernadero (GEI).
Fórmula de cálculo	El cálculo del indicador se realiza mediante la siguiente ecuación: $RCOS = Den_{Apa} \times Prof \times COS$ Donde: *RCOS:* reserva de Carbono Orgánico del Suelo (tC/ha) Den_{Apa}*:* densidad aparente (g/cc) *Prof:* profundidad de muestreo-horizonte (cm) *COS:* contenido de carbono orgánico del suelo (%)
Metodología de cálculo	La metodología para efectuar el cálculo de la reserva de carbono almacenado en suelos se presenta en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024) en la sección Etapa de análisis. Para las variables específicas de la ecuación se requiere realizar la toma de muestras de suelo según la metodología establecida para las variables requeridas: • Para densidad aparente, método del cilindro. • Contenido de carbono orgánico por método de Walkley-Black. • Profundidad mínima de medición: 0-30 cm.
Interpretación	El indicador permite identificar los contenidos de carbono almacenado por hectárea en suelos a la profundidad especificada (0-30 cm). A través del monitoreo periódico es posible determinar si se ha ganado o perdido carbono en los suelos de la zona de estudio.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Restricciones o limitaciones	• La información requerida para el cálculo del indicador siempre debe ser la versión más actualizada. • La medición es válida, siempre y cuando no haya procesos de intervención.
Facilidad de obtención	Fácil X Regular Difícil ¿Por qué?: Requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado para la toma de datos en campo y para el análisis de laboratorio cuando se hace la estimación de contenidos de carbono.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 48. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de riqueza en biodiversidad.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Riqueza específica (riqueza)	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Biodiversidad
Unidad de medida	S
Periodicidad.	Anual X Semestral Trimestral Mensual Diario Otro Otra, cuál: bienal o trienal
Cobertura geográfica	Nacional Departamental Municipal X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone semestral para abarcar los periodos hidrológicos de mayor influencia en los humedales del Magdalena Medio y Bajo (aguas bajas o seco y aguas altas o lluvias).
Descripción del Indicador	
Definición	La riqueza específica es la forma más sencilla de medir la biodiversidad, ya que se basa únicamente en el número de especies presentes, sin tomar en cuenta su valor de importancia.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Pertinencia	El indicador permite cuantificar el número de especies (diversidad alfa) de cada uno de los grupos biológicos analizados. Además, se utiliza como parte de varios índices de diversidad. El propósito es contar con datos de referencia que permitan identificar los cambios estructurales de las comunidades biológicas en función de las variaciones naturales y de origen antrópico.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	La riqueza específica o diversidad alfa es el resultado del proceso evolutivo que se manifiesta en la existencia de diferentes especies dentro de un hábitat particular.
Fórmula de cálculo	El cálculo del indicador se realiza mediante el conteo del número de especies en una muestra (en un sitio y periodo específicos).
Metodología de cálculo	Realización del muestreo mediante observación, identificación taxonómica y cuantificación del número de especies in situ (para la fauna vertebrada y la vegetación) o mediante la recolección de muestras (fitoplancton, ficoperifiton, zooplancton, macroinvertebrados) y el análisis posterior en laboratorio (identificación, conteo y cuantificación del número de especies).
Interpretación	Generalmente, la interpretación se realiza por comparación entre periodos y/o sectores de muestreo (aumento o disminución en un periodo o área determinada).
Restricciones o limitaciones	Si no se logra la determinación taxonómica hasta el nivel específico, el indicador no refleja un valor exacto.
Facilidad de obtención	Fácil X Regular Difícil ¿Por qué?: Requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado para la toma de datos en campo y el análisis de laboratorio.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 49. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de abundancia/densidad/cobertura correspondiente al compartimiento de biodiversidad.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Abundancia/Densidad/Cobertura	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	Biodiversidad
Unidad de medida	Número de individuos (abundancia) Número de individuos en unidad de área (densidad) Número de individuos en unidad de volumen (densidad) Porcentaje de individuos por área (cobertura)
Periodicidad	Anual X Semestral Trimestral Mensual Diario Otro Otra, cuál:
Cobertura geográfica	Nacional Departamental Municipal X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone semestralmente para abarcar las temporadas hidrológicas de mayor influencia en los humedales del Magdalena Medio y Bajo (aguas bajas o seco y aguas altas o lluvias; con renovación cada dos años).
Descripción del Indicador	
Definición	Corresponde a la abundancia de un taxón (especie o jerarquía taxonómica definida) en un sitio y periodo de muestreo. Dependiendo del grupo biológico, se expresa en abundancia total (número de individuos) o en densidad (individuos por unidad de área o volumen) o porcentaje de cobertura.
Pertinencia	• Finalidad/Propósito • El indicador permite cuantificar la abundancia (total o relativa) de individuos de una categoría taxonómica específica para cada uno de los grupos biológicos analizados. Además, se utiliza como parte fundamental de los índices de diversidad. • El propósito es contar con datos de referencia que permitan identificar los cambios estructurales de las comunidades biológicas en función de las variaciones naturales y de origen antrópico. Además, identificar aquellas especies que por su escasa representatividad son más sensibles a las perturbaciones ambientales.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Dependiendo del grupo biológico y de las metodologías utilizadas para los muestreos, este indicador se expresa en diferentes formas. Para este caso se plantea como sigue: • Número de individuos (abundancia) para los grupos de fauna vertebrada y vegetación arbórea inundable. • Número de individuos en unidad de volumen (densidad) para el plancton (fitoplancton, zooplancton). • Número de individuos en unidad de área (densidad) para el ficoperifiton y los macroinvertebrados acuáticos. • Porcentaje de individuos por área (cobertura) para las macrófitas acuáticas.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Fórmula de cálculo	El cálculo del indicador se realiza mediante las siguientes ecuaciones: • Abundancia: número de individuos por muestra. • Densidad del fitoplancton (para el método de conteo por campos en microscopio invertido, previa sedimentación de la muestra): $Células\ o\ individuos/_{ml} = \frac{\text{Número de células o individuos contados} * \text{área total de la cámara}}{\text{Área de un campo} * \text{número de campos contados} * \text{volumen sedimentado}}$ Donde: Área del fondo de la cámara (mm^2) Área del campo óptico (mm^2) Volumen sedimentado (mL) • Densidad del zooplancton (para el método de conteo en cámara Sedgwick-Rafter en microscopio óptico): $Individuos/_{L} = \frac{\text{Número de individuos contados}}{\text{Volumen contado} * \text{volumen filtrado/volumen concentrado}}$ En todos los casos el volumen expresado en L • Densidad del ficoperifiton (para el método de conteo por campos, en microscopio invertido, utilizando cámara de Sedgwick-Rafter): $Células\ o\ Individuos/_{cm^2} = \frac{N * At * Vt}{Ac * nc * Vs * As}$ Donde, *N* = Número de células o individuos contados *At* = Área total de la cámara (cm^2) *Vt* = Volumen total de la muestra (mL) *Ac* = Área del campo de observación (cm^2) *nc* = Número de campos observados *Vs* = Volumen sedimentado (mL) *As* = Área del sustrato (cm^2) • Densidad de macroinvertebrados: número total de individuos en un área establecida. • Cobertura: porcentaje de ocupación de la categoría taxonómica definida en un área establecida.
Metodología de cálculo	Realización del muestreo mediante observación, identificación taxonómica y cuantificación *in situ* (para la fauna vertebrada y la vegetación) o mediante la recolección de muestras (fitoplancton, ficoperifiton, zooplancton, macroinvertebrados) y el análisis posterior en laboratorio (identificación, conteo y cálculos con las fórmulas planteadas).
Interpretación	Generalmente, la interpretación se realiza por comparación entre categorías taxonómicas (abundancia relativa) y entre periodos y/o sectores de muestreo (aumento o disminución en un periodo o área determinada).

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Restricciones o limitaciones	Las fórmulas planteadas corresponden a las metodologías de análisis definidad en la propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* (Andramunio-Acero et al., 2024): • Densidad del fitoplancton y el ficoperifiton: cuantificación por método de Utermöhl bajo microscopio invertido, usando cámara de sedimentación (o cámara de Sedgwick-Rafter para el ficoperifiton) y contando campos aleatorios. • Densidad del zooplancton: cuantificación en cámara Sedgwick-Rafter bajo microscopio óptico. • Densidad de macroinvertebrados y cobertura de macrófitas: cuantificación en un área previamente establecida (ejemplo: 1 m^2). • Abundancia de vertebrados (peces, aves, anfibios, reptiles, mamíferos): cuantificación en campo, mediante observación directa y/o indirecta (huellas, rastros, heces, madrigueras y nidos, entre otros). • Sin embargo, estas fórmulas pueden ser modificadas en función de los métodos de campo y/o laboratorio y/o de los equipos de muestreo y análisis utilizados, siempre y cuando se sigan métodos estandarizados y validados y los análisis sean llevados a cabo por profesionales competentes para cada grupo.
Facilidad de obtención	Fácil X Regular Difícil ¿Por qué?: Requiere de tiempo, recursos financieros y personal especializado.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 50. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de cambio de superficie de humedal continental natural.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Cambio de superficie de humedal continental natural	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	SIG agua y biodiversidad
Unidad de medida	Hectáreas (ha)
Periodicidad	X Anual Semestral Trimestral Mensual Diario Otro Otra, cuál: _____

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal X — Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone que el indicador sea calculado cada año; sin embargo, para cada uno se identifican temporadas a partir de análisis de variables hidrometeorológicas. Si se cuenta con insumos para cada temporada según los regímenes climáticos, el indicador debe ajustarse.
Descripción del Indicador	
Definición	Medición cuantitativa de la extensión de los humedales en la región del Magdalena Medio y Bajo. El indicador proporciona una visión clara y específica de la cobertura de humedales y permite evaluar los cambios en su superficie a lo largo del tiempo.
Pertinencia	• Este indicador se fundamenta en la premisa de que los humedales son ecosistemas críticos que brindan una amplia gama de servicios ambientales, incluida la regulación del ciclo del agua, la biodiversidad, la mitigación de inundaciones y la provisión de hábitats vitales para la fauna y flora. • El indicador contribuye significativamente a la comprensión del estado y la dinámica de estos ecosistemas, lo cual es esencial para la gestión ambiental y la toma informada de decisiones en la conservación de los humedales del Magdalena Medio y Bajo. El cambio en la superficie de estos humedales puede ser indicativo de presiones ambientales y actividades humanas, como la urbanización, la agricultura, la extracción de recursos naturales y el cambio climático.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Definición operativa: se parte de la definición clara y precisa de lo que constituye un "humedal continental natural" para garantizar la coherencia en la medición y la comparabilidad entre diferentes áreas geográficas. Esto podría basarse en criterios como la presencia de agua estacional o permanente, la vegetación característica y la importancia ecológica. Metodología de evaluación: se requiere una metodología robusta y estandarizada para cuantificar la superficie de los humedales continentales naturales en un área determinada en diferentes momentos. Esto implica el uso de tecnologías de teledetección, imágenes satelitales, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis de series temporales para identificar y delimitar los humedales y medir los cambios en su extensión. Variables asociadas con el análisis: • Cobertura de vegetación inundable para evaluar la evolución de la vegetación en los humedales, con identificación de posibles alteraciones o degradaciones de la biomasa. • Calidad del agua para analizar parámetros como niveles de nutrientes y presencia de contaminantes, con el fin de determinar la influencia de factores hídricos en la superficie de los humedales. • Uso del suelo en las áreas circundantes al humedal para identificar posibles impactos antropogénicos en la superficie y la funcionalidad de los humedales. • Variables climáticas, como temperatura y precipitación, para evaluar cómo estos cambios pueden afectar la extensión de los humedales.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Marco conceptual	• Presencia y diversidad de especies de flora y fauna en los humedales, ya que la salud de estos ecosistemas está intrínsecamente ligada a la biodiversidad. • Dinámica hídrica, incluyendo niveles y regímenes de inundación, de acuerdo con las temporalidades de análisis, para entender mejor la relación entre la hidrología y la variabilidad en la superficie de los humedales.
Fórmula de cálculo	El cálculo del indicador se realiza mediante las siguientes ecuaciones: $CSH = \frac{SHC(t2) - SHC(t1)}{SHC(T1)} * 100$ Donde: *CS* es el cambio de superficie del humedal expresada en porcentaje *SHC(t2)* es la superficie del humedal continental natural para la temporalidad reciente en hectáreas *SHC(t1)* es la superficie del humedal continental natural para la temporalidad anterior en hectáreas
Metodología de cálculo	La metodología para calcular el indicador comprende el uso de imágenes de sensores remotos. Esto implica varios pasos que combinan el análisis y el procesamiento de datos geoespaciales: • Se seleccionan las imágenes de satélite disponibles para el área de estudio y el período de tiempo de interés. Es importante elegir imágenes con una resolución espacial y temporal que permita detectar y monitorear cambios en la superficie del humedal con suficiente detalle. • Se hace el preprocesamiento de imágenes satelitales mediante la corrección de efectos atmosféricos, se eliminan las nubes y sombras, se hace la completitud de los vacíos de información y se mejora la calidad general de los datos. • Se delimita el humedal mediante la clasificación de las imágenes a partir de los mosaicos generados de imágenes satelitales. Esto se hace usando algoritmos de clasificación supervisada o no supervisada, así como la integración de datos multiespectrales y de índices espectrales que resalten las características distintivas de los humedales, como la presencia de agua y vegetación acuática. • Se hace la validación utilizando puntos de referencia terrestres o imágenes de alta resolución como referencia, para evaluar la precisión de la delimitación del humedal y realizar ajustes si es necesario. • A partir del análisis multitemporal, se comparan las delimitaciones del humedal en diferentes momentos y se cuantifican los cambios de superficie a lo largo del tiempo. Esto implica la comparación de imágenes satelitales de diferentes fechas y la identificación de áreas que han experimentado ganancias o pérdidas de superficie de humedal. • Se interpretan los resultados del análisis para identificar patrones de cambio en la superficie de los humedales, así como posibles causas subyacentes (actividades humanas, eventos climáticos extremos o procesos naturales).
Interpretación	Identificar si hay aumento, disminución o si se mantiene la superficie del humedal en estudio respecto a la superficie existente en el periodo de la línea base. Esto se hace para cada temporada de análisis (seca o lluvias).
Restricciones o limitaciones	• Limitaciones de resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales. • Los cambios estacionales en la cobertura de agua y vegetación pueden introducir sesgos en la detección de cambios en la superficie del humedal.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Restricciones o limitaciones	• Identificar y comprender las causas subyacentes de los cambios en la superficie del humedal puede ser complejo y requiere un análisis multidisciplinario que tenga en cuenta factores como actividades humanas, cambio climático y procesos naturales. • Se recomienda contar con insumos cartográficos actualizados de las variables complementarias para que el análisis se complemente con datos actualizados a la fecha de análisis.
Facilidad de obtención	Fácil — Regular — X Difícil ¿Por qué?: Disponibilidad, calidad y procesamiento de imágenes de satélite, interpretación de resultados.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 51. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de superficie de humedal que permanece como tal.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Superficie de humedal que permanece como tal	
Tema de referencia	Humedales
Compartimiento	SIG agua y biodiversidad
Unidad de medida	Hectáreas (ha)
Periodicidad	X Anual — Semestral — Trimestral Mensual — Diario — Otro Otra, cuál: _____
Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal — X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone que el indicador sea calculado cada año; sin embargo, dentro de cada año se identifican temporadas a partir de análisis de variables hidrometeorológicas, por lo que, si se cuenta con insumos para cada temporada según los regímenes climáticos, el indicador debe ajustarse.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Descripción del Indicador	
Definición	Los humedales incluyen todo tipo de tierras que estén cubiertas o saturadas por aguas todo el año o la mayor parte de este, y que no entran en las categorías de tierras forestales, tierras de cultivo o pastizales. En esta subcategoría se tienen en cuenta los humedales del Magdalena Medio y Bajo que no han sido convertidos, por lo que los procesos biológicos y geoquímicos, así como las emisiones y absorciones de GEI se deben analizar a partir del área calculada y de variables como la profundidad, la saturación del agua, el clima y la disponibilidad de nutrientes.
Pertinencia	El monitoreo y la evaluación de la conservación de los ecosistemas de humedal proporcionan una medida directa de la cantidad de terreno que mantiene su estado original sin cambios significativos. Este indicador no solo permite evaluar la efectividad de las medidas de conservación, sino que también sirve como una herramienta para detectar y abordar presiones y amenazas sobre los humedales, identificando áreas prioritarias para la protección y promoviendo una gestión sostenible que garantice la preservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos clave que estos hábitats proporcionan. Ofrece una medida concreta y cuantificable de la conservación de los humedales, lo que permite evaluar el progreso hacia los objetivos de conservación establecidos. Esta información es fundamental para tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos y la implementación de acciones de conservación. Además, al proporcionar datos sobre la cantidad de humedales intactos, el indicador ayuda a sensibilizar sobre la importancia de estos ecosistemas y a promover su protección ante presiones de desarrollo y amenazas ambientales.
Metas/Estándares	No existen metas o estándares establecidos.
Marco conceptual	Definición operativa: establecer la definición clara y precisa de lo que constituye un "humedal" y qué se considera que permanece "como tal". Esto incluye criterios específicos relacionados con la presencia de agua estacional o permanente, la composición de la vegetación, la biodiversidad asociada y la función ecológica del humedal: • Identificación y delimitación de humedales: uso de algoritmos de clasificación de imágenes para detectar características distintivas de los humedales, como cuerpos de agua y vegetación acuática. • Monitoreo temporal: comparación de la extensión de los humedales en diferentes momentos a lo largo del tiempo para determinar cuánta superficie se mantiene como humedal. • Interpretación de cambios: cambios en la superficie de los humedales en el contexto de presiones ambientales y actividades humanas, como la urbanización, la agricultura, la minería y el cambio climático. • Evaluación de la integridad del humedal: cuantificación del porcentaje de su superficie original que permanece intacta para evaluar el grado de disturbio o degradación del humedal y orientar la implementación de medidas de conservación y restauración. Variables asociadas con el análisis: • Los cambios en el uso del suelo circundante pueden influir en la conservación de los humedales; la urbanización y la agricultura intensiva pueden ejercer presión sobre estos ecosistemas, afectando su extensión y calidad.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Marco conceptual	• El nivel de protección legal y las medidas de gestión implementadas en las áreas de humedales son factores determinantes; por ejemplo, conocer si está en categoría Ramsar, si existe plan de manejo ambiental o de ordenamiento de cuencas, así como presencia de áreas protegidas. • La invasión de especies exóticas y la contaminación son amenazas importantes que pueden contribuir a la degradación de los humedales y a la disminución de su superficie original; por lo tanto, es importante complementar el indicador con un análisis propio del recurso hídrico. • La variabilidad climática y los eventos extremos, como sequías e inundaciones, pueden desempeñar un papel significativo en la conservación de los humedales, lo que afecta su salud y extensión. Así, considerar estas variables en conjunto con el indicador principal proporciona una comprensión más completa de los factores que afectan su conservación.
Fórmula de cálculo	$PSHT_t = \left(\frac{SH_t}{SHLB}\right) \times 100$ Donde: $PSHT_t$ es la proporción de superficie de humedal en el tiempo t SHT_t es la superficie en hectáreas (ha) con cobertura de humedal en el tiempo t $SHLB$ es la superficie total en hectáreas (ha) del humedal delimitado en la línea base (mapas oficiales de ecosistemas acuáticos o mapas de humedales).
Metodología de cálculo	La metodología para calcular el indicador comprende el uso de imágenes de sensores remotos; esto implica varios pasos que combinan el análisis y el procesamiento de datos geoespaciales: • Se seleccionan las imágenes de satélite disponibles para el área de estudio y el período de tiempo de interés. Es importante elegir imágenes con una resolución espacial y temporal que permita detectar y monitorear cambios en la superficie del humedal con suficiente detalle. • Se hace el preprocesamiento de imágenes satelitales mediante la corrección de efectos atmosféricos, se eliminan las nubes y sombras, se completan los vacíos de información y se mejora la calidad general de los datos. • Se hace la clasificación de los mosaicos de imágenes satelitales para identificar y delimitar el humedal. Para eso, se usan algoritmos de clasificación supervisada o no supervisada, así como la integración de datos multiespectrales y de índices espectrales que resalten las características distintivas de los humedales, como la presencia de agua y vegetación acuática. • Se hace la validación utilizando puntos de referencia terrestres o imágenes de alta resolución como referencia, y así se evalúa la precisión de la delimitación del humedal y se realizan ajustes si es necesario. • A partir del análisis del año de estudio frente a la línea base (mapas temáticos de humedales), se compara la extensión del humedal y se cuantifican los cambios de superficie. • Se interpretan los resultados del análisis para identificar si el humedal permanece como tal, es decir, que no ha tenido cambios en su extensión. Se hace la diferenciación entre el número de hectáreas que han sufrido conversión y el número de hectáreas del humedal que permanecen como tal.
Interpretación	Analizar las tendencias temporales y el porcentaje de superficie intacta para identificar áreas críticas de pérdida de humedal.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Restricciones o limitaciones	• Limitaciones de resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales. • Los cambios estacionales en la cobertura de agua y vegetación pueden introducir sesgos en la detección de si el humedal permanece como tal. • Se recomienda contar con insumos cartográficos actualizados de las variables complementarias para que el análisis se complemente con datos actualizados.
Facilidad de obtención	Fácil — Regular — X Difícil ¿Por qué?: Disponibilidad, calidad y procesamiento de imágenes de satélite, interpretación de resultados.

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 52. Propuesta de hoja metodológica para el indicador de tasa promedio anual de cambio de la superficie natural de los humedales cubierta por diferentes coberturas (Adaptación de la "Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)" (IDEAM, 2019).

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*	
Tasa promedio anual de cambio de la superficie natural cubierta por diferentes coberturas	
Tema de referencia	Datos de Actividad
Compartimiento	SIG-Datos de Actividad (DA)
Unidad de medida	Porcentaje (%)
Periodicidad	Anual — Semestral — Trimestral Mensual — Diario — X Otro Otra, cuál: bienal
Cobertura geográfica	Nacional — Departamental Municipal — X Otra Otra, cuál: Humedales del Magdalena Medio y Bajo.
Cobertura temporal	Se propone que el indicador sea calculado cada dos años, de acuerdo con los reportes bienales de cambio climático.

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Descripción del Indicador	
Definición	Corresponde a la variación de la superficie cubierta por coberturas naturales en dos periodos de tiempo (t1, t2), incluidos los bosques naturales que no estén siendo previamente monitoreados a escala nacional por el IDEAM en áreas de humedales del Magdalena Medio y Bajo. Para su cálculo se utiliza la expresión modificada del IDEAM, con el fin de centrar los análisis en los cambios de coberturas naturales en los ecosistemas de humedal del Magdalena Medio y Bajo.
Pertinencia	Este indicador monitorea los cambios de las áreas de coberturas naturales en los humedales del Magdalena Medio y Bajo en diferentes periodos de tiempo y permite identificar los cambios o porcentajes asociados a la pérdida, ganancia o permanencia de las coberturas naturales en dichas áreas de estudio. De esta manera, puede relacionarse con los Datos de Actividad en el sector AFOLU para los humedales no gestionados del Magdalena Medio y Bajo.
Metas/Estándares	Muestra los cambios posiblemente asociados con la presión humana.
Marco conceptual	El IDEAM (2019), en el marco de la identificación de los cambios de la superficie de la tierra para diferentes coberturas, propone la "Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)", con el fin de monitorear los cambios en la superficie cubierta por diferentes coberturas. Para los humedales no gestionados del Magdalena Medio y Bajo, este indicador se adapta con el propósito de conocer el cambio de las coberturas naturales en un periodo de tiempo determinado y relacionarlo con los Datos de Actividad. • De esta manera, se realiza la homologación de las coberturas de la tierra del IDEAM con el marco propuesto por el IPCC, lo que deja las siguientes coberturas para los humedales del Magdalena Medio y Bajo: asentamientos, tierras de cultivo, pastizales, forestales, herbazales, otra vegetación leñosa, otras tierras, humedales y cuerpos de agua. Adicionalmente, para la elaboración de este indicador se utilizan las coberturas naturales (forestales, herbazales, otra vegetación leñosa, humedales y cuerpos de agua), lo que permite conocer su tasa de cambio. • Igualmente, la tasa de cambio se elabora a partir de información obtenida por medio de tecnologías de teledetección, imágenes satelitales, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de series temporales para identificar las áreas de coberturas y sus cambios.
Fórmula de cálculo	$$TC_{i,(t1:t2)} = \left[\frac{\frac{ACT_{i,t2} - ACT_{i,t1}}{ACT_{i,t1}}}{(t2 - t1)}\right] * 100$$ Donde: $TC_{i,(t1:t2)}$: tasa promedio de cambio anual del área que ocupa la cobertura de la tierra natural i, entre las dos fechas, t1 y t2 $ACT_{i,t2}$: área cubierta por la cobertura de la tierra natural i, en el momento t1, expresada en hectáreas (ha) $ACT_{i,t2}$: área cubierta por la cobertura de la tierra i, en el momento t2, expresada en hectáreas (ha)

Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*

Metodología de cálculo	La metodología para calcular el indicador comprende el uso de imágenes de sensores remotos; esto implica varios pasos que combinan el análisis y el procesamiento de datos geoespaciales: • Se seleccionan las imágenes de satélite disponibles para el área de estudio y el período de tiempo de interés. Es importante elegir imágenes con una resolución espacial y temporal que permitan detectar y monitorear cambios en la superficie del humedal con suficiente detalle. • Se hace el preprocesamiento de imágenes satelitales mediante la corrección de efectos atmosféricos, se eliminan las nubes y sombras, se hace la completitud de los vacíos de información y se mejora la calidad general de los datos. • Se realiza la clasificación de las coberturas homologadas al IPCC usando algoritmos de clasificación supervisada o no supervisada. • Se hace el análisis de las coberturas y sus variaciones de pérdidas y ganancias. • Se interpretan los resultados del análisis para identificar patrones de cambio en las áreas de cobertura natural.
Interpretación	De acuerdo con el IDEAM (2019), el menor valor que puede tomar el indicador es -100. Este se obtiene de forma intuitiva cuando ninguna fracción de la superficie ocupada por la cubierta de la tierra tipo i, identificada en el tiempo inicial 1, se registra en el tiempo final 2. Valores negativos relativamente altos (cercanos a -100) representan pérdidas importantes de cobertura natural entre los dos instantes de tiempo medidos, en tanto que valores negativos relativamente bajos representan pérdidas de cobertura no tan importantes. Un valor del indicador igual o cercano a cero refleja que la superficie cubierta no cambió entre los dos instantes de tiempo; los valores positivos se presentan cuando la cobertura es mayor en el tiempo t2 que en el tiempo t1.
Restricciones o limitaciones	Limitaciones de resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales: • Para que los datos de superficie cubierta por diferentes tipos de cobertura obtenidos en los dos instantes de tiempo sean comparables, estos deben haber sido generados para la misma escala y mediante el mismo protocolo. • Los cambios estacionales en los periodos de lluvias generan mayor nubosidad. • Identificar y comprender las causas subyacentes de los cambios en la cobertura puede ser complejo y requiere un análisis multidisciplinario que tenga en cuenta factores como actividades humanas, cambio climático y procesos naturales. • Se recomienda contar con insumos cartográficos actualizados de las variables complementarias para que el análisis se complemente con datos actualizados a la fecha de análisis.
Facilidad de obtención	Fácil — Regular — X Difícil ¿Por qué?: Disponibilidad, calidad y procesamiento de imágenes de satélite, interpretación de resultados y especialización del personal.

Fuente: elaboración propia (2024).

Estrategia para la gestión de la información

Estructura de base de datos carbono en humedales

Desde el inicio de la implementación de un proceso de levantamiento de información es muy importante identificar y establecer la ruta para gestionar los datos que se van generando en cada proceso (premuestreo, muestreo y fase de análisis). Se sugiere estructurar una base de datos que permita acceder de forma ordenada a la información y que pueda actualizarse constantemente. Por ejemplo, para la validación de esta propuesta de Protocolo, la base de datos se denominó **ProtoCarbonoCCZ** en PostgreSQL y tiene una estructura que permite el correcto flujo de la información para garantizar la rapidez en el procesamiento y el mantenimiento de los estándares de seguridad de la información.

La base de datos Carbono en humedales se alimenta de tres fuentes:

- Información secundaria, que corresponde a los datos obtenidos en la búsqueda de publicaciones (artículos científicos, libros, reportes de proyectos, etc.); estos aportan información de estimaciones de carbono en humedales a nivel nacional e internacional para los compartimientos de carbono identificados en el proyecto.
- La información generada en el piloto de validación de la propuesta del Protocolo en la ventana de aproximación seleccionada.
- La información oficializada del país y administrada en SIG, que integra diversos tipos de datos, como la ubicación espacial organizada en capas de información que permite la visualización de los datos utilizando mapas y escenas 3D.

La base de datos está organizada en cuatro grandes componentes (biomasa, MOM, suelos y sedimentos, biodiversidad y, por último, información de las zonas de muestreo). Cada uno de estos componentes está conformado por una estructura de tablas relacionadas entre sí (Figura 54).

Herpetofauna del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fotografía: Alejandro Peña García.

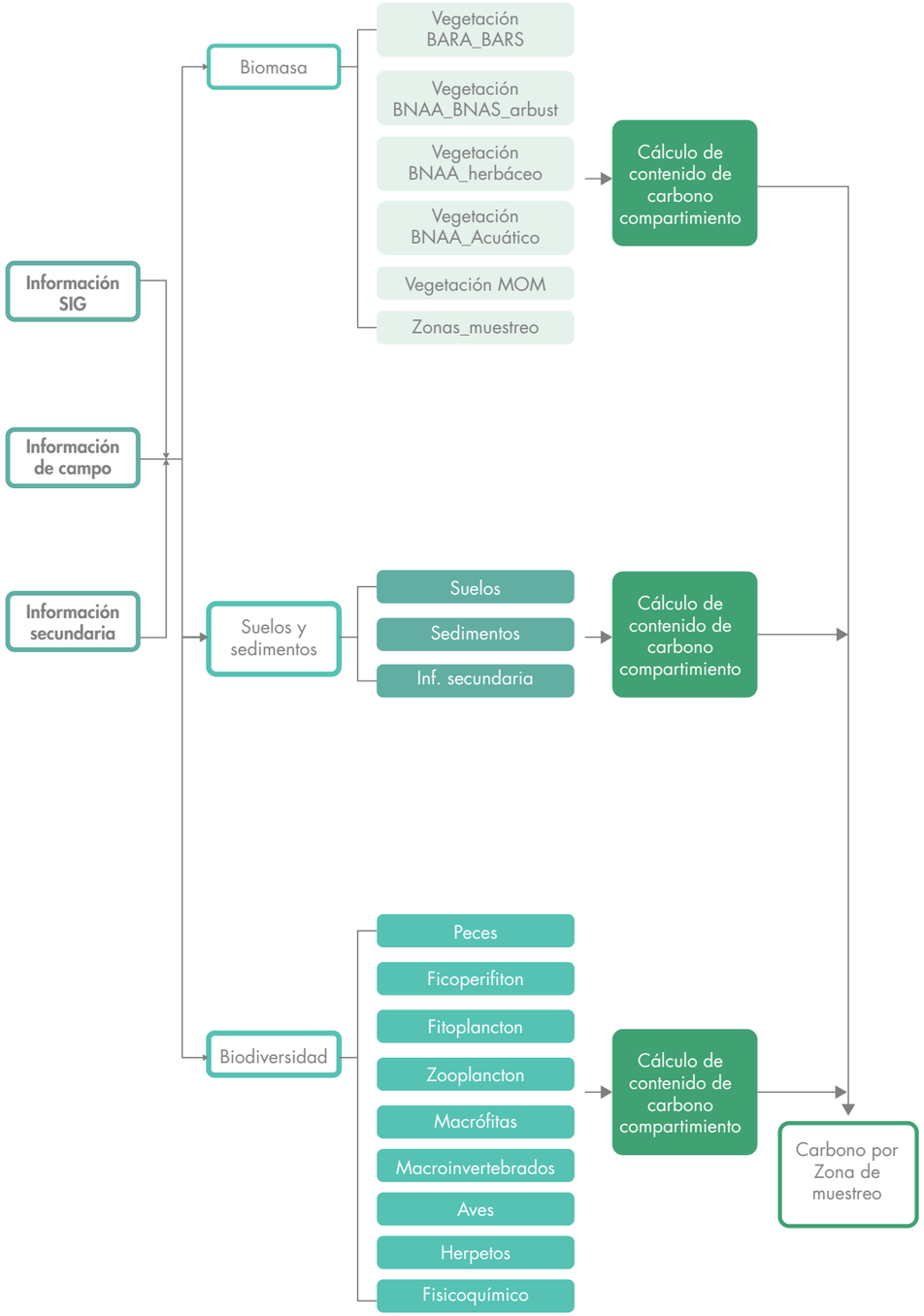


Figura 54. Propuesta de estructura de base de datos de carbono en humedales. Fuente: elaboración propia (2024).

Pasos para el análisis estadístico de la información

A partir de la colecta de información en campo, se sugieren los siguientes pasos para la validación de los datos:

- **Inspección de datos:** identificación de datos inconsistentes. Esto implica verificar valores faltantes, duplicados, valores atípicos, tipos de datos incorrectos y otros errores.
- **Plan de limpieza de datos:** después de identificar los problemas con los datos, se crea un plan para abordarlos. Esto implica determinar cómo completar los valores faltantes, eliminar duplicados y manejar valores atípicos.
- **Ejecución de limpieza de datos:** en algunos casos se usan métodos estadísticos para imputar valores faltantes, eliminar duplicados y transformar los datos al formato correcto.
- **Verificación de datos:** con datos limpios, se verifica que estos sean precisos y consistentes. Esto implica verificar errores y valores atípicos.

Figura 55. Pasos para el análisis estadístico de datos. Fuente: elaboración propia (2024).

Con esta revisión, se identifican inconsistencias en (i) variables numéricas, respecto a la escala de medición en la que fueron tomadas; y (ii) variables categóricas, dada la naturaleza de la variable, relacionadas con errores en la digitación de la información.

Luego de tener las matrices con los datos limpios, se realiza el Análisis Exploratorio de Datos (EDA). Existen varias técnicas estadísticas y de visualización para explorar los datos y obtener información sobre características, tendencias y patrones de las variables incluidas en cada compartimiento. De esta forma, se busca detectar anomalías o valores atípicos e identificar cualquier relación o asociación entre variables. Las variables que presentan valores de NA representan a las variables categóricas, que por su naturaleza no pueden ser incluidas en los cálculos de valores mínimos (Min), media (Mean) y máximos (Max).

Propuesta de análisis estadístico de la información

Para establecer la manera de procesar la información, es importante revisar con cada líder temático los posibles análisis estadísticos a realizar a partir de los datos colectados en campo. En general, y debido a la naturaleza de los datos que se propone colectar en los compartimientos de carbono identificados, estos se analizan por medio de estadística descriptiva univariada y multivariada. Dentro de los métodos de estadística multivariada, se sugiere usar los que se exponen a continuación.

Análisis de componentes principales (ACP)

Es una técnica estadística multivariada que se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos mediante la transformación de las variables originales en un nuevo conjunto de variables ortogonales llamadas componentes principales. Los componentes principales están ordenados en términos de la cantidad de varianza que explican los datos. El primer componente principal explica la mayor parte de la varianza, el segundo explica la mayor parte del segundo, y así sucesivamente. La selección de un subconjunto de los componentes principales reduce efectivamente la dimensionalidad de los datos al tiempo que se retiene la mayor parte de la información.

Análisis de conglomerados

Por medio de este análisis se busca agrupar observaciones similares en conglomerados o en subgrupos, en función de sus características o atributos. A su vez, se pretende identificar agrupaciones naturales dentro del conjunto de datos que pueden no ser evidentes de inmediato cuando se observan los datos sin procesar. En el análisis de conglomerados se utiliza una métrica de distancia para calcular la similitud entre objetos u observaciones. Las métricas de distancia más utilizadas incluyen la distancia euclidiana y la distancia de Manhattan. Una vez que se construye la matriz de similitud, se utiliza un algoritmo de agrupación para reunir los objetos en función de sus similitudes.

Análisis factorial

Es una técnica estadística multivariada utilizada para identificar factores o dimensiones subyacentes en un conjunto de datos. El objetivo es identificar un conjunto más pequeño de variables latentes, conocidas como factores, que pueden explicar las correlaciones entre las variables observadas. Se supone que las variables observadas están relacionadas con los factores a través de una relación lineal, donde la carga factorial representa la fuerza de la relación entre el factor y la variable.

Propuestas de implementación

Propuestas para la cuantificación de la reducción de emisiones y remociones de gei a partir de las iniciativas de conservación de biodiversidad

Aunque no existen directrices nacionales ni internacionales (considerando los lineamientos del IPCC) para la cuantificación de la reducción de emisiones y remociones de GEI en sistemas naturales, las propuestas que se presentan en este apartado se basan principalmente en el concepto de "adicionalidad", que deben cumplir las iniciativas de mitigación sectoriales y de proyectos REDD+. La adicionalidad consiste básicamente en que los resultados de las iniciativas deben ser adicionales a los que se habrían producido si el proyecto no se hubiera llevado a cabo.

De esta forma, se pretende garantizar que los resultados de las iniciativas planteadas sean "adicionales" al escenario de referencia y que representen un beneficio neto para la atmósfera (en cuanto a la reducción de emisiones de GEI), tal como lo plantean las directrices colombianas para las cuantificaciones (Minambiente, 2023) y, en este caso particular, también para la biodiversidad, principalmente en términos de la conservación del ecosistema, la protección de AVC (en las seis categorías planteadas por la HCVRN [2013]) y la restauración/rehabilitación de los hábitats y ecosistemas.

Es importante destacar que estas iniciativas buscan ser estrategias de mitigación (encaminadas a combatir la causa y minimizar los posibles impactos del cambio climático) y/o adaptación (para reducir las consecuencias negativas y aprovechar las oportunidades que se puedan originar) al cambio climático.

Con este propósito, se enmarcan en algunas de las principales medidas, acciones e instrumentos propuestos o implementados en países de América Latina y el Caribe (CEPAL, 2015), y se pueden articular con objetivos o estrategias de conservación que se desarrollen en los humedales y/o con los planes y políticas de orden nacional e internacional para la conservación de la biodiversidad, la regulación de la calidad del agua, el suministro de alimentos y/o las contribuciones no materiales de la naturaleza a la sociedad, entre otras.

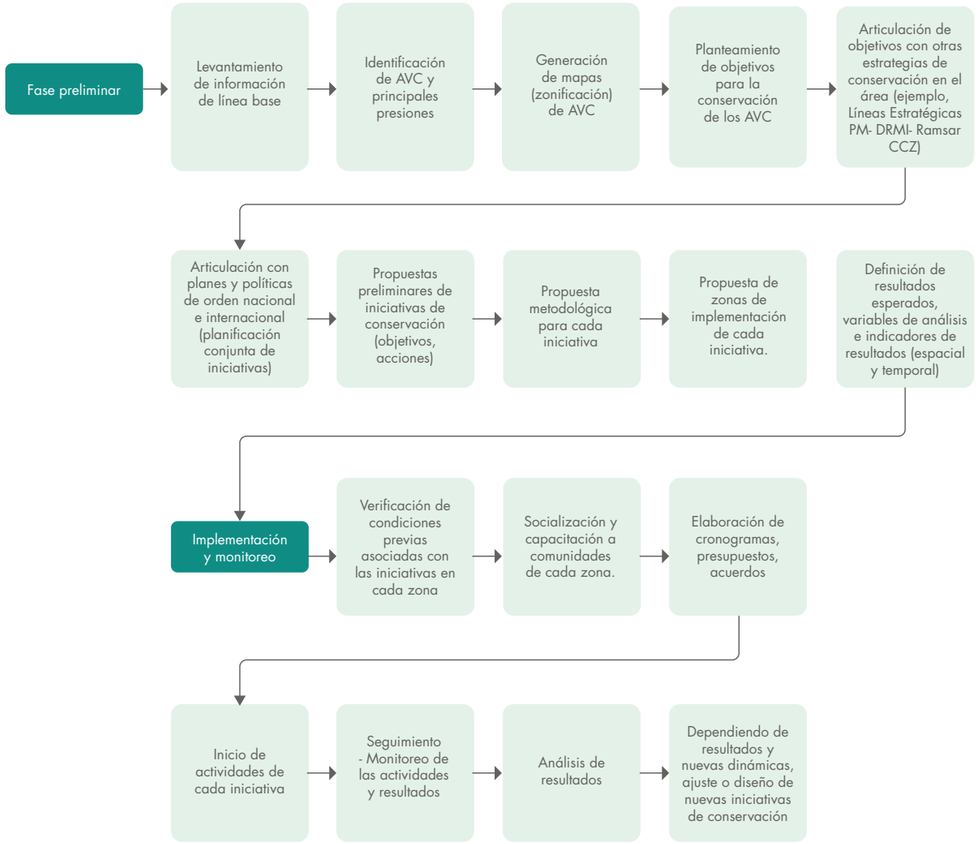


Figura 56. Ruta metodológica propuesta para la identificación de Altos valores de Conservación (AVC) y el planteamiento, implementación y monitoreo de iniciativas de conservación. Fuente: elaboración propia (2024).

Como ejemplo, con base en las actividades y acciones que se desarrollan en los humedales del Magdalena Medio y Bajo, y de algunas de las principales presiones sobre las especies, hábitats y ecosistemas identificados, en la Tabla 53 se proponen algunas iniciativas de mitigación y adaptación.

Tabla 53. Ejemplo de iniciativas para medidas de mitigación/adaptación en humedales.

Ejemplos de iniciativas	Algunas medidas de mitigación y/o adaptaciones asociadas
Contribuir con la restauración del flujo natural de agua y de la hidrobiota entre los sistemas lóticos de menor magnitud y los sistemas lénticos que conforman el sistema de humedales a monitorear.	**Adaptación:** • Monitoreo de especies, hábitats y ecosistemas. • Protección, conservación y restauración de los ecosistemas y el recurso hídrico. • Gestión de riesgo y seguridad alimentaria. • Acciones contra inundaciones.
Aprovechamiento económico de especies que puedan estar ocasionando algún efecto en la dinámica del humedal (por ejemplo, especies con potencial de invasión).	**Mitigación:** • Programas para promover el uso de biocombustibles. • Acciones para el uso de energías renovables y alternas. • Reducción de emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques. **Adaptación:** • Seguridad alimentaria. • Acciones para la conservación y aprovechamiento de los ecosistemas.
Programa de sensibilización y conservación de las especies endémicas, raras o en peligro y de los hábitats en peligro del humedal.	**Mitigación:** • Reducción de emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques. **Adaptación:** • Capacitación e investigación en sectores vulnerables. • Planes contra incendios forestales. • Educación ambiental.
Manejo eficiente de residuos sólidos con mala disposición en los humedales y sus alrededores.	**Mitigación:** • Manejo de residuos sólidos y rellenos sanitarios. **Adaptación:** • Programas de protección de ecosistemas y acciones para adaptación de comunidades ante el cambio climático y de reducción de la vulnerabilidad ante la disposición de agua potable.
Programa de rehabilitación, restauración y/o reforestación con especies nativas y propias de humedales.	**Mitigación:** • Reducción de emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques. **Adaptación:** • Acciones y medidas contra la degradación de los suelos. • Medidas para protección y desarrollo de cuencas.

Ejemplos de iniciativas	Algunas medidas de mitigación y/o adaptaciones asociadas
Concienciación, control y vigilancia para el uso de artes de pesca adecuados.	**Mitigación:** • Ordenamiento territorial. **Adaptación:** • Estrategias en recursos hídricos y biodiversidad. • Acciones para producción sostenible de alimentos y seguridad alimentaria. • Educación ambiental.

Fuente: elaboración propia (2024).

Propuesta inicial de monitoreo comunitario participativo como estratregia de adaptación y mitigación frente al cambio climático

La participación comunitaria en la generación de conocimiento es estratégica debido a que esta permite la integración de los conocimientos técnicos y empíricos en función de la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales, lo que hace efectivo el proceso a nivel de costos y durabilidad. Esta colaboración promueve la participación de los usuarios del recurso, despierta interés por el conocimiento de causas y consecuencias de las acciones individuales y colectivas en las que se incide, y ayuda a la interpretación de los contextos reales de los territorios por parte de los cooperantes.

El objetivo de los lineamientos que se presentan en esta sección se centra en integrar estrategias de participación comunitaria en la generación de información y propuestas de manejo para la toma de decisiones que contribuyan a la construcción de herramientas metodológicas para el monitoreo y a la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Definición del Monitoreo Comunitario Participativo (MCP)

Entiéndase como monitoreo un ejercicio basado en la observación, la medición, el registro y el análisis de información, y que busca hallar patrones de cambios para implementar acciones correctivas o prevenir eventos no deseados (Chediack, 2009). En ese orden de ideas, con base en lo propuesto por IDEAM et al. (2021), el MCP se define como una estrategia de participación comunitaria, en la que los actores locales son claves en la generación de información que permita entender los territorios para la toma de decisiones. Esta estrategia incluye el trabajo participativo de todos los actores a partir de diálogos de saberes y del intercambio de conocimientos científicos y tradicionales. Se reconocen tres tipos de MCP, dependiendo del nivel de participación de la comunidad (Shirk et al., 2012):

- **Contributivo:** es diseñado por externos (técnicos), y la comunidad colabora solo con el levantamiento de la información; es ideal cuando en la investigación priman los aspectos técnicos.
- **Colaborativo:** es diseñado por externos y la comunidad, que no solo aporta información, sino que también incide en ajustes estructurales del proceso, analiza la información y ayuda a la divulgación de los resultados.
- **Cocreado:** es diseñado de manera conjunta, en todos los aspectos, entre técnicos y comunidad.

Para el desarrollo de procesos de Monitoreo Comunitario Participativo - MCP se identifican grupos estratégicos, considerados así por las actividades que desarrollan dentro de su comunidad, tales como organizaciones sociales, ambientales, colectivos étnicos, consejos comunitarios, gobiernos indígenas, estructuras organizativas campesinas, asociaciones de pescadores y artesanos, entre otros (IDEAM et al., 2021).

Lineamientos para el Monitoreo Comunitario Participativo (MCP)

- **Fase A:** preparación. Es fundamental, ya que en ella se definen la línea base, los objetivos y el alcance del MCP, según el contexto territorial; también los participantes (actores del territorio), las funciones y la estrategia de trabajo.
- **Fase B:** implementación. Se pone en práctica lo construido en la fase anterior, mediante la evaluación, la prueba y el ajuste de las estrategias metodológicas. Aquí se da continuidad a la toma, el registro de información y el análisis de los datos generados.
- **Fase C:** divulgación y gestión. Se socializan los resultados con los actores involucrados, a fin de generar estrategias de manejo en relación con las necesidades del territorio y de incluir la información generada en repositorios, para cumplir, con los requerimientos definidos por el ente rector correspondiente.

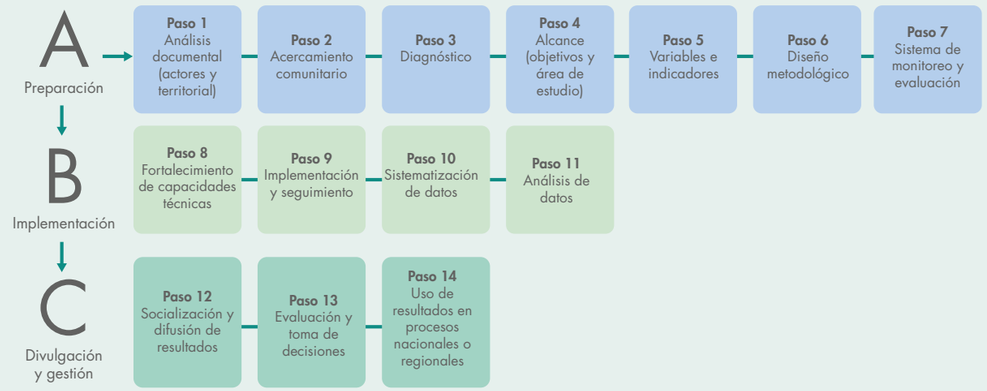


Figura 57. Lineamientos metodológicos para el MCP. Fuente: elaboración propia (2024).

Fase A. Preparación

Paso 1. Análisis documental (actores y territorial)

Se enfoca en la búsqueda de información secundaria que permita documentar el contexto territorial y los actores presentes en el área de interés. Su valoración radica en identificar información biótica, abiótica y socioeconómica del territorio, así como a los actores (instituciones públicas, gremios económicos, entidades académicas, organizaciones no gubernamentales y comunidades) presentes en la zona.

Paso 2. Acercamiento comunitario

Con base en la información obtenida en el Paso 1, se realiza un acercamiento a líderes y líderesas entre los actores identificados, con el fin de conocer mejor el estado actual del territorio; esto incluye determinar actividades diarias y funciones dentro de la organización social. Es la primera oportunidad para hablar de un ejercicio de participación comunitaria.

Paso 3. Diagnóstico

Con base en el análisis de la información obtenida en los pasos anteriores, se genera un diagnóstico. Aquí se identifican problemáticas, limitaciones, ventajas y desventajas del uso del MCP, su viabilidad y el interés comunitario en el proyecto.

Paso 4. Alcance (objetivos y área de estudio)

En este paso se define el objetivo del ejercicio, su alcance y el área donde se desarrollará. Estos aspectos dependen del tipo de participación comunitaria (Shirk et al., 2012); de este modo, pueden ser espacios concertados o no concertados para establecer la pregunta (qué), el espacio (dónde) y la temporalidad (cuándo) del ejercicio.

Paso 5. Definición de variables e indicadores

Con base en el objetivo establecido, se definen las formas para darle respuesta al objetivo del monitoreo comunitario. De esta manera, se proponen las variables, que son aquellos atributos por medio de los cuales se obtiene la información. Se recomienda que sean variables sencillas de medir e interpretar, ya que esto facilita el proceso de aprendizaje y acople dentro del ejercicio. Así mismo, es necesario medir la eficacia del monitoreo. Para esto, se emplean indicadores que describan, por ejemplo, el comportamiento de las variables en el tiempo, la participación de la comunidad, el impacto del ejercicio, entre otras.

Paso 6. Diseño metodológico

En esta instancia se define el grupo de monitores, el papel de cada participante, el protocolo para la toma y registro de datos, los instrumentos, equipos y materiales para las mediciones, los mecanismos para registrar la información, la frecuencia de toma de datos, el tiempo del monitoreo y el cronograma. En este último se establecen espacios de capacitación, intercambio de experiencias, socialización de resultados y el presupuesto destinado para el desarrollo de todas las actividades propuestas.

Paso 7. Sistema de monitoreo y evaluación

Dado que los involucrados no participan necesariamente de la misma manera, es importante indicar las funciones (tomadores de datos, depuradores, analistas y curadores de la información), así como tambien la temporalidad del análisis de los indicadores propuestos y su posterior socialización. Es fundamental que haya claridad sobre la función de cada involucrado, y conformar un comité de monitoreo que sirva como medio de comunicación al interior del equipo.

Fase B. Implementación

Paso 8. Fortalecimiento de capacidades técnicas

Los ejercicios de participación comunitaria acarrean el fortalecimiento de sus participantes en las actividades del monitoreo. Como resultado, la comunidad involucrada experimenta un proceso formativo asociado con el objetivo del proceso y a lo largo de su desarrollo. Por eso, es importante fomentar la comunicación en todos los sentidos, de modo que se puedan resolver dudas, compartir experiencias y enriquecer el ejercicio a partir del intercambio. Así, es un proceso dinámico.

Paso 9. Implementación y seguimiento

Este paso es la puesta en marcha oficial del ejercicio. Puede ser un piloto inicial de calibración o el punto de partida para el registro de la información objeto de interés. Al igual que el Paso 8, en todo momento está sujeto a modificaciones como parte del proceso de seguimiento.

Paso 10. Sistematización de los datos

Con la implementación llega la toma de datos y, por defecto, su inclusión en una base de datos. Este es un proceso transversal y dinámico que, según el alcance, puede estar alineado con el SEN. Por esta razón, siempre se recomienda tener un marco de referencia para la organización del archivo, acción indispensable para la trazabilidad de todo el proceso.

Paso 11. Análisis de los datos

La información se analiza de acuerdo con el alcance del monitoreo y los acuerdos generados con los diferentes actores. Se recomienda revisar los datos según la periodicidad del monitoreo, ya que esto servirá para identificar puntos fuertes, acciones de mejora y correctivos para todo el proceso. Los indicadores se obtienen a partir de este análisis.

Fase C. Divulgación

Paso 12. Socialización y difusión de resultados

Para que haya apropiación social del conocimiento por parte de la comunidad, es fundamental contar con una estrategia de comunicaciones que permita el acceso y entendimiento de la información. De esta manera, se debe tener en cuenta el público al que se dirige la información y su nivel de escolaridad (como una posible barrera para comprender el tema). El acercamiento a la comunidad ayuda a solventar esta y otras posibles dificultades.

Paso 13. Evaluación y toma de decisiones

Los resultados obtenidos son la base del empoderamiento comunitario. A escala local se pueden generar acciones de manejo con base en las observaciones registradas y su interpretación. Se espera que la comunidad incremente su nivel de pertenencia y empoderamiento al tener la capacidad de tomar decisiones basadas en el conocimiento adquirido.

Paso 14. Uso de los resultados en procesos nacionales o regionales

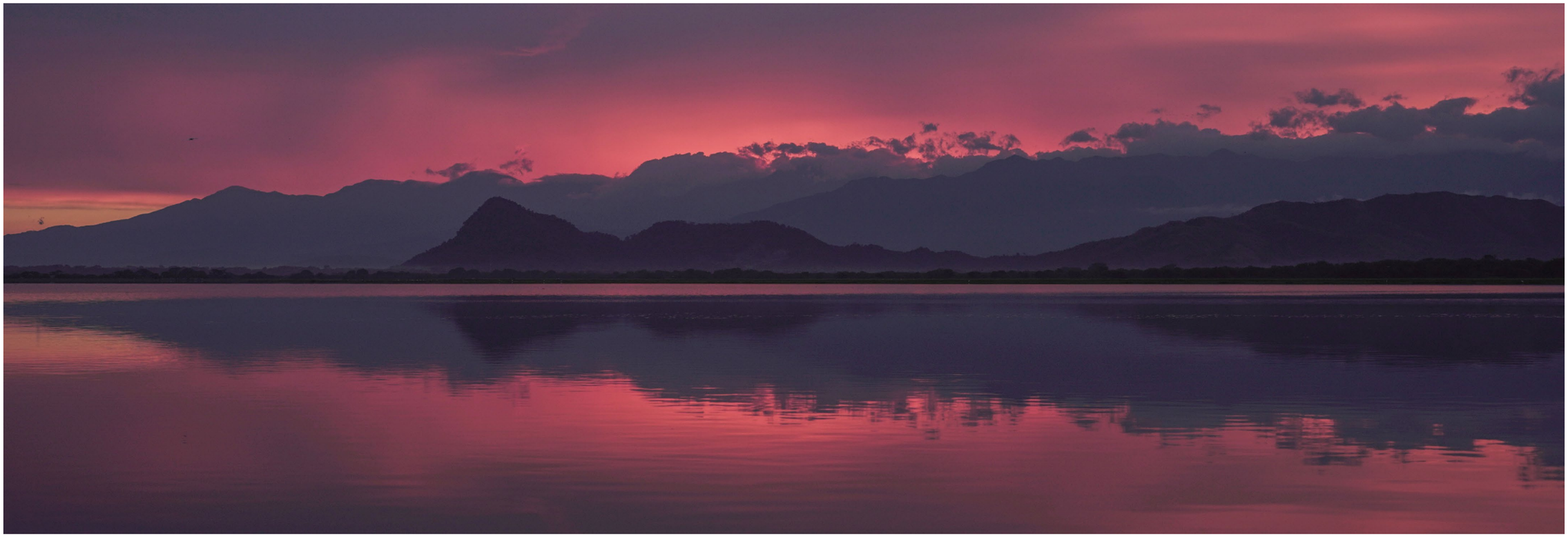
Acorde con la vinculación de actores institucionales, según el objetivo del monitoreo, y con los acuerdos generados desde la formulación, la información puede ser incluida en repositorios oficiales y, a su vez, ser un insumo para la gestión del territorio.

Este es un paso fundamental, ya que fortalece el empoderamiento comunitario, dado que los pobladores perciben que la información generada con su apoyo es una herramienta para generar instrumentos de gestión, uso y manejo de los recursos objeto de interés.

Biomonitores del MCPPe del CCZ. Fotografía: Luis Alfredo Moreno.

4 RECOMENDACIONES TÉCNICAS

PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE PROYECTOS DE ESTIMACIÓN
DE CARBONO EN HUMEDALES



Ventanas de implementación

- Se deben considerar las guías y/o protocolos que desde las autoridades ambientales de orden nacional (IDEAM, Minambiente e INVEMAR, entre otras, según sea el caso) y regional (CAR) se han generado para guiar o delimitar áreas específicas o prioritarias, o ecosistemas particulares en el país. Estos documentos brindan criterios aprobados a nivel nacional y regional bajo los cuales se deben seleccionar y priorizar las áreas de acuerdo con su extensión, función, aspectos físicos, ecológicos y sociales.
- Dependiendo de la naturaleza del proyecto, es importante tener en cuenta la normatividad vigente, expedida por el Gobierno nacional, que aplique para su implementación. Tener claridad sobre esta permite delimitar el tipo de actividades que se pueden o no realizar en un área específica, las restricciones de uso y de aprovechamiento de recursos, y la propiedad de la tierra, entre otros aspectos clave en el momento de seleccionar el área de un proyecto.
- Para proyectos de mitigación, y con la finalidad de generar beneficios relacionados con la captura de carbono, es importante revisar que en el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de GEI (RENARE) no existan proyectos con la misma finalidad en las áreas seleccionadas. Esto tiene el propósito de evitar que haya traslape o duplicación de esfuerzos, así como una doble contabilidad de las emisiones, que se evitan gracias a la implementación de estos proyectos.
- Para la formulación de protocolos de monitoreo de las dinámicas de carbono y GEI en ecosistemas estratégicos, es necesario seleccionar áreas piloto que sean homogéneas en términos de composición de especies, propiedades de los suelos, características climáticas, dinámicas hidrológicas (para ecosistemas acuáticos), biodiversidad, entre otras. De esta manera, son comparables en el momento de determinar datos de actividad y factores de emisión, y pueden tener alcance de aplicación a nivel nacional.
- Es igualmente importante considerar los estudios y las investigaciones que han desarrollado diferentes institutos de investigación de alcance nacional en ecosistemas estratégicos, en relación con propiedades de los suelos, caracterización de la vegetación y estudios hidrológicos, climáticos y geológicos, entre otros, que proporcionan información secundaria y son la base para el diseño de proyectos específicos y la selección de ventanas piloto.

Metodologías de sistemas de información geográfica y sensores remotos

Como se mencionó en la sección de metodologías de procesamiento digital de imágenes, se propone el uso de GEE. A continuación, se exponen algunas recomendaciones y consideraciones al respecto:

- Dado que los códigos se construyen según los objetivos del proyecto, que en este caso es el análisis de cambios de extensión del humedal y el cálculo de índices espectrales, se deben realizar diferentes pruebas para establecer cuál de los conjuntos de datos y qué tipo de algoritmos son los óptimos para la obtención de resultados en cuanto a la separabilidad de la vegetación y otras coberturas de las superficies de agua.
- GEE permite ejecutar diferentes procesos en tiempos relativamente cortos, siempre y cuando se creen códigos que tengan la precisión necesaria para no incurrir en errores al digitar las variables y los criterios de ejecución.
- El acceso libre a la plataforma se destaca como una de las principales ventajas, ya que el usuario no depende de permisos para hacer uso de sus funcionalidades.
- A pesar de ser una plataforma con una interfaz intuitiva y de fácil manejo, existen algunas desventajas, como la resolución espacial de las imágenes pues, al ser gratuitas, para el caso de estudios detallados no es muy útil contar con imágenes Landsat, MODIS o Sentinel.
- Sin embargo, un aspecto a resaltar es que permite cargar otros insumos que hayan sido adquiridos previamente por el usuario.

Para el caso de los cálculos de los Datos de Actividad (DA):

- La definición de la escala, la periodicidad y la temporalidad depende de factores como información con que se cuente para el área de estudio, muestreo de campo, imágenes de satélite obtenidas, recursos económicos del implementador y experiencia de los profesionales de trabajo.
- Se debe identificar muy bien la información con que se va a trabajar y apoyarse en información de fuentes oficiales y de plataformas que puedan brindar soporte al estudio.
- Los programas para la elaboración de la información geográfica deben soportar el manejo de formatos vectoriales y ráster. Para este fin, la utilidad de la plataforma gratuita de GEE, sin la exclusión de otros programas, se convierte en un insumo que fortalece el proceso de clasificación de imágenes y en soporte vectorial y de cálculo de álgebra de mapas, pues se pueden utilizar diferentes programas gratuitos o comerciales.
- Para la identificación de los puntos de entrenamiento se propone hacer un cálculo con distribución multinominal o dejarlo a la experiencia del intérprete; sin embargo, debe existir un mínimo de 200 puntos por clases, que soporten la clasificación supervisada.

Metodologías de estimación de contenidos de carbono

Compartimiento de Biomasa y MOM

- Por lo general, para la estimación de la biomasa para vegetación de tipo no bosque (herbáceas y vegetación acuática), se cosecha todo el material contenido en la subparcela y se estiman los pesos fresco y seco, sin diferenciar entre las especies que se registran en cada subparcela; es decir, se toma una muestra combinada. Sin embargo, en el proceso de validación de la propuesta de este Protocolo se consideró importante tener en cuenta esta diferenciación, o sea, se contemplaron valores asociados con las especies más abundantes o representativas de cada subparcela (se trabajó con las especies con coberturas mayores al 50%). Esto asegura la obtención de datos más detallados que permiten, a mediano y largo plazo, realizar comparaciones entre los contenidos de carbono de las especies más representativas de estos componentes; en otras palabras, estimaciones especie específicas.
- El IPCC ha proporcionado valores de fracción de carbono para bosques tropicales y subtropicales. Por su parte, la metodología para la cuantificación de emisiones y remociones de GEI en humedales continentales de Proclima define una fracción de la materia seca de 0,47. Estos valores se obtienen a partir del análisis del componente arbóreo; sin embargo, no se cuenta con datos de esta fracción para elementos como herbáceas terrestres y acuáticas, significativas en este tipo de ecosistemas. Para la materia orgánica muerta tampoco se tienen valores de referencia al estimar esta fracción, aunque varios estudios mencionan contenidos de carbono que oscilan entre 20% y 40%. Durante el proceso de validación de esta propuesta de Protocolo se obtuvieron valores de contenidos de carbono y, por tanto, se definió la fracción de carbono propia para estos elementos, así: 0,42 para el componente herbáceo; 0,44 para la vegetación acuática; y 0,33 para la MOM; valores que se deben considerar para generar las estimaciones de biomasa y carbono correspondientes.
- Durante el ejercicio de validación, la estimación de la biomasa se realizó a partir de métodos indirectos, es decir, a través del empleo de ecuaciones alométricas de aplicación general, como las propuestas por Chave et al. (2015) para elementos arbóreos y Hughes et al. (1999) para palmas. Adicionalmente, se aplicaron ecuaciones especie o género específicas. De esta forma, se obtuvieron rangos de valores similares, con excepción de algunas especies (*Guazuma ulmifolia*, *Inga acuminata*, *I. nobilis* y *Xylopia aromatica*) y de las palmas, en las que el modelo general parece subestimar los valores de biomasa. En este sentido se recomienda, siempre que sea posible, utilizar ecuaciones especie o género específicas que consideren variaciones en los factores de expansión asociados a rasgos taxonómicos.
- Relacionado con el ítem anterior, una actividad relevante para la implementación de esta propuesta de Protocolo es

la correcta identificación del material botánico, con el fin de estimar adecuadamente los contenidos de biomasa.

- Como los reportes generados se realizan a partir de la nomenclatura del IPCC, es necesario hacer la homologación desde la capa de CLC. Sin embargo, esto hace que algunos usos de la tierra sean agrupados, lo que podría reducir la resolución entre una capa y otra. De acuerdo con las características propias de la vegetación presente en el área de implementación, los contenidos de carbono podrían expresarse a nivel de cada uso de suelo y unificarse en el momento de hacer el reporte. Esta información es útil no solo para el INGEI dentro del sector AFOLU, sino tambien para entender las dinámicas de cada ecosistema evaluado.

Compartimiento de suelos y sedimentos

- El proceso de homologación de suelos USDA-IPCC integra estos dos métodos de clasificación; sin embargo, se pierde el detalle de la caracterización de suelos hecha bajo el sistema taxonómico de la USDA. Por eso, se sugiere en lo posible usar este sistema de clasificación para definir las unidades de monitoreo o, en su defecto, incluir variables como textura, pH y fertilidad, que permitan afinar la homologación.
- De acuerdo con el comentario anterior, y al igual que en el compartimiento de Biomasa, se recomienda expresar los resultados para cada una de las unidades cartográficas de suelo identificadas en el área de estudio, agrupando los valores cuando se haga el reporte ante el INGEI.
- En relación con la producción de GEI por parte de los suelos, se propone realizar una evaluación de la producción de CO_2 en laboratorio, de tal manera que se puedan establecer las tasas de producción de este gas, exclusivamente asociadas a los organismos del suelo.
- El IPCC establece en 30 cm la profundidad mínima de estimación de contenido de carbono en suelos. Según la metodología propuesta en este Protocolo, se sugiere una evaluación a profundidades entre 0-25 cm y 25-50 cm. En caso de contar con recursos, se propone aplicar la metodología en cada uno de los horizontes identificados en la descripción total del perfil de suelos hasta una profundidad de 1 m, para estimar el contenido total de carbono almacenado en los suelos de la zona estudiada.
- Se establece una periodicidad bianual o trienal para el monitoreo y seguimiento de los contenidos de carbono en suelos, siempre que no se presente algún tipo de gestión o intervención del terreno (cambio de uso), en cuyo caso se recomienda realizar mediciones anuales a partir del momento de la intervención.

Metodologías para los análisis de biodiversidad

- Teniendo en cuenta que la selección de zonas de muestreo tiene en la información secundaria uno de sus principales insumos, su ausencia no debe considerarse una barrera. Para ello es posible apoyarse en entidades que hagan presencia en el área de interés y en las comunidades locales. El uso de encuestas, los talleres y los espacios de reunión pueden aportar información relevante que ayude a seleccionar los lugares donde se realizarán las jornadas de campo.
- Debido a las dinámicas hidroclimáticas y principalmente a sus importantes efectos en las planicies de inundación, es muy factible que, al menos para los grupos de hidrobiota, las características estructurales y ecológicas sean variables entre periodos de muestreo, por lo que es necesario garantizar su monitoreo en los humedales seleccionados como ventanas de implementación.
- El análisis de redes tróficas acuáticas podría constituir un excelente indicador de los flujos de carbono al interior del cuerpo de agua, de su contribución al ciclo terrestre y de las posibles emisiones o retenciones que cumpla el ecosistema de humedal en su totalidad.
- En cuanto a las principales presiones que se puedan identificar en los humedales y que afectan al ecosistema, los hábitats y/o las especies, es necesario tener presente que para contrarrestarlas se requieren estrategias de educación y concienciación urgentes entre las poblaciones que habitan estos ecosistemas, así como el planteamiento de iniciativas que las beneficien económicamente. Sin estas iniciativas, las demás acciones de conservación que se planteen resultarían inútiles o muy poco efectivas.
- La zonificación basada en los AVC es una herramienta importante para la gestión sostenible de recursos naturales y la protección del medio ambiente. Las autoridades ambientales, según su jurisdicción, deben definir sus propios criterios para identificar y delimitar los polígonos de alto valor de conservación en su zona

y, a partir de la zonificación, proteger y preservar dichas áreas. En ellas es posible que se restrinjan o prohíban ciertas actividades o desarrollos, según la legislación ambiental de Colombia. Por el contrario, las áreas que no se consideran como AVC pueden estar sujetas a regulaciones menos estrictas en términos de conservación. Para esto, se recomienda iniciar con la revisión y evaluación exhaustiva del humedal de interés, de manera que se identifiquen primero los AVC que pueden ser representados a nivel espacial, con el fin de preparar los insumos geográficos necesarios para el proceso.

- Se garantiza que los AVC identificados sean los indicados, trabajando con un grupo de expertos que incluya profesionales en ciencias ambientales y de otras disciplinas, con el fin de determinar las mejores prácticas de conservación.
- Respecto a la preparación de los insumos geográficos de los AVC, se deben usar herramientas de geoprocesamiento para capas vectoriales y ráster, ya que los insumos primarios y secundarios proceden de diferentes fuentes. Así mismo, se debe tener en cuenta que los valores de cada capa geográfica se revisan previamente de forma que se reclasifiquen según las necesidades para identificar los AVC de cada categoría. Por esto, los profesionales SIG que se encarguen de implementar la metodología propuesta en este documento deben contar con la experiencia suficiente en las ciencias biológicas y el análisis espacial.
- A partir de los resultados obtenidos en el proceso de zonificación de los AVC en humedales, se plantean regulaciones claras por cada ventana de implementación de esta propuesta de Protocolo. En ellas se especifican las actividades permitidas con base en las perspectivas y problemáticas de la comunidad local, las partes interesadas y la sociedad civil. Para esto, es fundamental la participación comunitaria, la cual garantiza que se incluyan los conocimientos tradicionales y se consideren las necesidades y preocupaciones locales.
- Así mismo, se plantea la posibilidad de construir un sistema de monitoreo para asegurar que las regulaciones se cumplan y que los AVC se conserven de manera efectiva. Para esto, también se debe considerar la planificación a largo plazo de estrategias de adaptación al cambio climático cuando se diseñe la zonificación de AVC, ya que las condiciones ambientales pueden cambiar con el tiempo.
- Los ejercicios de participación comunitaria son alternativas estratégicas que pueden incidir en el relacionamiento con los actores locales, además de ser una herramienta costo-efectiva para la generación de información. En caso de considerar esta metodología, tenga en cuenta que el esquema de acompañamiento y seguimiento es una de las bases de su efectividad.
- De acuerdo con lo anterior y con el alcance del proyecto, se recomienda plantear un esquema de participación co-creado (Shirk et al., 2012), que parta del interés propio de la comunidad y que reduce la deserción sobre la marcha al no plantear un estímulo como contrapartida. Mediante este esquema se definen en conjunto los objetivos, las variables, los métodos y las formas de obtener la información. Este es en un ejercicio de mediano y largo plazo, donde la curva de aprendizaje dinamiza la inclusión de más variables en el tiempo, así como también el uso de los datos para la gestión del territorio, en articulación con las entidades y autoridades competentes.

Reportes y gestión de la información

- A la hora de realizar los reportes de GEI generados, y según las características del humedal donde se aplicó la metodología, hay que tener en cuenta que dentro del INGEI, y específicamente en el sector AFOLU, la categoría de humedales (3B4) presenta a su vez diferentes subcategorías asociadas con la condición del humedal, producto del cambio en el uso del suelo; además, su interpretación es ambigua. Se recomienda establecer un canal de comunicación con el IDEAM, ente rector y encargado de generar los reportes de GEI en el país, pues su orientación ayudará cuando se elabore el reporte para el área de estudio.
- En lo posible, utilice programas o *software* de libre acceso y de fácil uso, salvo para aquellas actividades que demanden la necesidad de paquetes puntuales, como es el caso de los SIG en las rutinas que requieren los códigos sugeridos dentro del documento.
- La generación de información biológica necesita para su divulgación y almacenamiento en los sistemas de información nacional cumplir con los requerimientos establecidos por cada repositorio. Esto incluye los permisos a los que haya lugar para el muestreo, depósito del material y entrega de las bases de datos que soporten los resultados.
- La información complementaria a los datos de las comunidades biológicas objeto de análisis, como la calidad del agua, por ejemplo, debe muestrearse y analizarse por medio de entidades debidamente acreditadas, que a su vez cuenten con profesionales expertos que soporten los resultados. Cerciórese de que el tercero encargado de esta parte del proceso cuente con todos los requerimientos necesarios, pues la validez de la información dependerá de esto.

Anexos técnicos

Se entregan ocho anexos técnicos que responden al proceso completo de validación de esta propuesta metodológica, puesta a prueba durante los meses de marzo y septiembre-octubre de 2023, correspondientes a la temporada seca (aguas bajas) y temporada de lluvia (aguas altas) del Complejo Cenagoso de Zapatosa, primera ventana de implementación de la presente propuesta de Protocolo. Estos anexos contienen los resultados más relevantes del piloto, sus análisis comparativos y los ajustes identificados para el proceso de implementación como producto de esta actividad. Además, en los anexos se presentan los resultados, desde marzo de 2023 hasta febrero de 2024, del levantamiento de información para identificar áreas y momentos de reproducción de la comunidad íctica, producto del trabajo del Monitoreo Comunitario Participativo Pesquero (MCPPe) llevado a cabo con los biomotores (pescadores y pescadoras) del CCZ. Para su consulta y descarga, por favor escanear el código QR de esta página.

- **ANEXO 1.** Lineamientos estadísticos y de gestión de información para la creación e inclusión de indicadores en el proceso de estimación de contenidos de carbono en el Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 2.** Resultados de análisis geoespaciales y de teledetección para la ventana piloto del Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 3.** Estimación de contenidos de carbono asociados a la vegetación hidrófita de humedales del Magdalena Medio y Bajo: el Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 4.** Resultados del contenido y almacenamiento de carbono orgánico en suelos y sedimentos del Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 5.** Análisis de la biodiversidad como estrategia complementaria a la estimación de contenidos de carbono y al diseño de iniciativas de conservación del ecosistema, mitigación y adaptación al cambio climático en el Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 6.** Identificación de áreas y momentos importantes del ciclo reproductivo de peces para la pesca artesanal del Complejo Cenagoso de Zapatosa, un ejercicio comunitario
- **ANEXO 7.** Resultados bianuales (2016 a 2022 y 2023) de los datos de actividad del Complejo Cenagoso de Zapatosa
- **ANEXO 8.** Recomendaciones desde del área de seguridad y salud en el trabajo (HSEQ) para procesos de muestreo en campo, en ejercicios de implementación del protocolo

Bibliografía

A

Acevedo-Rincón, A. A., Lampo, M. y Cipriani, R. (2016). The cane or marine toad, *Rhinella marina* (Anura, Bufonidae): two genetically and morphologically distinct species. *Zootaxa, 4103*(6), 574–586. https://doi.org/10.11646/zootaxa.4103.6.7

Acosta Mireles, M., Vargas Hernández, J., Velázquez Martínez, A. y Etchevers Barra, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia, 36*(6), 725–736.

Aldave, T. y Aponte, H. (2019). Estudio comparativo del porcentaje de carbono entre especies de flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa, 26*(2), 751-760. http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26216

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de Las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S. y Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and management, 267*, 297-308. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013

Álvarez, L. F. (2005). *Desarrollo de una metodología para la evaluación de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de los recursos hidrobiológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

AmphibiaWeb. (2023). *Amphibian News*. Https://Amphibiaweb.Org.

Anderson-Teixeira, K. J., Smith, F.A. y Morgan-Ernest, S. K. (2012). Climate change. En R. M. Sibly, J. H. Brown y A. Kodric-Brown (Eds.). *Metabolic Ecology. A Scaling Approach* (pp. 280-292). Wiley-Blackwell.

Andrade, G. I. (2014). Prólogo. En C. A. Lasso, F de P. Gutiérrez y D. Morales (Eds.), *X. Humedales interiores de Colombia: identificación, caracterización y establecimiento de límites según criterios biológicos y ecológicos* (pp. 15-16). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Angarita, H., Santos-Fleischmann, A., Rogeliz, C., Campo, F., Narváez-Campo, G., Delgado, J., Santos, T., Santos, A., Herrera, G. y Jiménez-Segura, L. (2020). Modificación del habitat para los peces para la cuenca del rio Magdalena, Colombia. En L. Jiménez-Segura y C. A. Lasso (Eds.), *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 265-293). Instituto de Investigación de Recursos Biologicos Alexander von Humboldt. https://doi.org/10.21068/B2020RRHHXIX07

Angiosperm Phylogeny Group. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society, 181*(1), 1–20. https://doi.org/10.1111/boj.12385

Aristizábal-García, H. (2017). *Hemípteros acuáticos y semiacuáticos del Neotrópico. Colección Jorge Álvarez Lleras.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Arroyo Sánchez, S. B., Chaves Portilla, G., Rada, M. y Rivera Correa, M. (2019). *Sistemática y taxonomía de anfibios.* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Avnimelech, Y., Ritvo, G., Meijer, L. E. y Kochba, M. (2001). Water content, organic carbon and dry bulk density in flooded sediments. *Aquacultural engineering, 25*(1), 25-33. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00068-1

B

Benítez, J., Delgado-Galván, X., Gutiérrez, J. A. y Izquierdo, J. (2011). Balancing consistency and expert judgment in AHP. *Mathematical and Computer Modelling, 54*(7–8), 1785–1790. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.12.023

Bernal, R., Gradstein, S. R. y Celis, M. (2019). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

Berumen, S. A. y Llamazares Redondo, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administración, 20*(34), 65-87.

Bicudo, C. y Bicudo, R. (1970). *Algas de águas continentais brasileiras chave ilustrada para identificação de gêneros.* Editora da Universidade Federal.

Bicudo, C. y Menezes, M. (2017). *Gêneros de algas de águas vontinentais do Brasil: chave para identificação e descrições.* (3 ed.). Rima. http://documents.worldbank.org/curated/en/615711468340177971/Methodology-for-estimating-reductions-of-GHG-emissions-from-mosaic-deforestation

Bottrell, H., Duncan, A., Gliwicz, Z., Grygierek, E., Herzig, A., Hillbricht-Ilkowska, A., Kurasawa, H., Larsson, P. y Weglenska, T. (1976). Are view of some problems in zooplankton production studies. *Norwegian Journal of Zoology, 24*, 419–456.

Bourgeau-Chavez, L. L., Grelik, S. L., Battaglia, M. J., Leisman, D. J., Chimner, R. A., Hribljan, J. A., Lilleskov, E. A., Draper, F. C., Zutta, B. R., Hergoualc'h, K., Bhomia, R. K. y Lähteenoja, O. (2021). Advances in Amazonian peatland discrimination with multi-temporal PALSAR refines estimates of peatland distribution, c stocks and deforestation. *Frontiers in Earth Science, 9*, 676748. https://doi.org/10.3389/feart.2021.676748

Brahma, B., Nath, A. J., Deb, C., Sileshi, G. W., Sahoo, U. K. y Das, A. K. (2021). A critical review of forest biomass estimation equations in India. *Trees, Forests and People, 5,* 100098. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100098

Brown, E. y Senior, M. J. M. (2014). *Common Guidance for the Management and Monitoring of High Conservation Values.* High Conservation Value Network.

Butterbach-Bahl, K., Kiese, R. y Liu, C. (2011). Measurements of biosphere–atmosphere exchange of CH4 in terrestrial ecosystems. *Methods in enzymology, 495*, 271-287. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386905-0.00018-8

C

Centre for Agricultural Bioscience International. (2023). *Improving lives worldwide.* https://www.cabi.org/

Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H. y Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia, 111*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s004420050201

Calera, A., Campos, I. y Garrido, J. (2016). *Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Sección de Teledetección y SIG.* Universidad Castilla La Mancha.

Carpenter, S. R., Bennett, E. M. y Peterson, G. D. (2006). Scenarios for ecosystem services: an overview. *Ecology and Society, 11*(1).

Carvajal-Cogollo, J. E. (2019). Taxonomía, sistemática y zoogeografía de reptiles. En F. Vargas-Salinas, J. A. Muñoz-Ávila y M. E. Morales-Puentes (Eds.), *Biología de los anfibios y reptiles en el bosque seco tropical del norte de Colombia*. (pp. 97–162). Editorial UPTC.

Carvajal-Cogollo, J. E., Cárdenas-Arévalo, G. y Castaño-Mora, O. (2012). Reptiles de la región caribe de Colombia. En J. O. Rangel Ch. (Ed.), *Colombia diversidad biótica XII. La región Caribe de Colombia*. (pp. 791–812). Instituto de Ciencias Naturales.

Chame, M. (2003). Terrestrial mammal feces; A morphometric summary and description. *Mem. Ins. Oswaldo Cruz, 98*(Suppl. 1), 71-94.

Chaparro-Herrera, S., Echeverry-Galvis, M. A., Cordoba-Cordoba, S. y Sua-Becerra, A. (2012). Listado actualizado de las aves endémicas y casi-endémicas de Colombia. *Biota Colombiana, 14*(2), 235–272.

Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global change biology, 20(10), 3177-3190. https://doi.org/10.1111/gcb.12629

Chediack, S. E. (2009). *Monitoreo de biodiversidad y recursos naturales: ¿para qué?* Consultado el 12 de abril de 2018. http://www.oikos.unam.mx/LECT/images/Libros/mmrjrgj_2009.pdf

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental.* https://books.google.com.ec/books?id=aKsNXCVCtcQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio.* Ariel.

Cisneros-de la Cruz, D. J., Herrera Silveira, J. A., Teutli-Hernández, C., Ramírez García, S. A., Moreno Martínez, A., Mendoza Martínez, J., Montero-Muñoz, F., Paz-Pellat, R. M. y Román-Cuesta, R. M. (2021). Manual para la Medición, Monitoreo y Reporte del Carbono y Gases de Efecto Invernadero en Manglares en Restauración. Proyecto, Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A multi-level approach.

Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., Duarte, C. M., Kortelainen, P., Downing, J. A., Middelburg, J. J. y Melack, J. (2007). Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems, 10*, 172-185. https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8

ColPlantA. (2022). Useful Plants of Colombia. Royal Botanic Gardens. https://colplanta.org/

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. Una revisión general. CEPAL.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2023). *Biodiversidad mexicana*. https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribesp

Congreso de Colombia. (1997, 21 de enero). Ley 357 de 1997. por medio de la cual se aprueba la "Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas", suscrita en Ramsar el dos (2) de febrero de mil novecientos setenta y uno (1971). Diario Oficial n.° 42968. https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1658710#:~:text=El%20Congreso%20de%20Colombia&text=Reconociendo%20la%20interdependencia%20del%20hombre,caracter%C3%ADsticas%2C%20especialmente%20de%20aves%20acu%C3%A1ticas.

Contreras-Medina, R. (2006). Los métodos de análisis biogeográfico y su aplicación a la distribución de las gimnospermas en México. *Interciencia, 31*(3), 176-182.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2010). *Calculation of the number of sample plots for measurements within A/R CDM project activities*. https://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-03-v2.1.0.pdf/history_view

Convenio sobre la Diversidad Biológica. (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Organización de las Naciones Unidas. https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf

Cook, C. D. K. (1990). *Aquatic Plants Book*. SPB Academic Publishing.

Cortés-Castillo, D. V., Quijano-Abril, M. A., Salazar-Suaza, D., Posada-García, J. A. y Martínez-Torres, A. M. (2022). *Lista de flora acuática continental de Colombia. v2.0*. Grupo de Estudios en Vegetación Acuática–GEVA. https://doi.org/10.15472/vzde3s

Crow, G. E. (2002). *Plantas acuáticas del Parque Nacional Palo Verde y el Valle del río Tempisque*. INBio.

D

Da Silva, C. J. y Cardozo, O. D. (2015). Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina*). GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (16), 23-40.

Davidson, E. A., Savage, K., Bolstad, P., Clark, D. A., Curtis, P. S., Ellsworth, D. S., ... Zak, D. (2002). Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology, 113*(1-4), 39-51. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00101-6

de Paggi, S. J. y Paggi, J. C. (1995). Determinación de la abundancia y biomasa zooplanctónica. En E. C. Lopretto y G. Tell (Eds.), *Ecosistemas de aguas continentales: Metodologías para su estudio*. Ediciones Sur.

de Santis, A. y Vaughan, P. (2009). Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais, 5*, 93–100. https://doi.org/10.15304/rr.id5305

de Smet, W. H. y Pourriot, R. (1997). *The Dicranophoridae (Monogononta) and the Ituridae (Monogononta). Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world*. SPB Academic Publishing.

Defler, T. (2003). *Primates de Colombia: Serie de guías tropicales de campo (Vol. IV)*. Conservación Internacional.

Díaz-Vasconcellos, M. A. (2018). *Flujos de CO2 y CH4 en suelos de matorrales y bosques esclerófilos en la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha, Región Metropolitana* [tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile.

Domínguez, E. y Fernández, H. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología*. Fundación Miguel Lillo.

Do Nascimiento, C., Herrera-Collazos, E. E., Herrera, G. A., Ortega-Lara, A., Villa-Navarro, F. A., Oviedo, J. S. U. y Maldonado-Ocampo, J. A. (2017). Checklist of the freshwater fishes of Colombia: A Darwin core alternative to the updating problem. *ZooKeys, 2017*(708), 25–138. https://doi.org/10.3897/zookeys.708.13897

Donohue, R. J., Roderick, M. L. y McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology, 436*, 35-50. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.033

Dubois, A. (2017). The nomenclatural status of Hysaplesia, Hylaplesia, Dendrobates and related nomina (Amphibia, Anura), with general comments on zoological nomenclature and its governance, as well as on taxonomic databases and websites. *Bionomina, 11*(1), 1–48. https://doi.org/10.11646/bionomina.11.1.1

Dumont, H. J., van de Velde, I. y Dumont, S. (1975). The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda and Rotifera from the plankton, periphyton and benthos of continental waters. *Oecologia, 19*(1), 75–97. https://doi.org/10.1007/BF00377592

E

Eggleston, H. S., Buendia L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe K. (Eds). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Elmoor-Loureiro, L. M. A., Mendonça-Galvão, L. y Padovesi-Fonseca, C. (2004). New cladoceran records from Lake Paranoá, Central Brazil. *Brazilian Journal of Biology, 64*(3a), 415–422. https://doi.org/10.1590/S1519-69842004000300006

Escalona, M., Marca, E. L. A., Castellanos, M., Fouquet, A., Crawford, A. J., Rojas-Runjaic, F. J. M., Giaretta, A. A., Señaris, J. C. y Castroviejo-Fisher, S. (2021). Integrative taxonomy reveals a new but common Neotropical treefrog, hidden under the name Boana xerophylla. *Zootaxa, 4981*(3). https://doi.org/10.11646/ZOOTAXA.4981.3.1

F

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*. FAO. https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb0353en/

Fricke, R., Eschmeyer, W. N. y van der Laan, R. (2023). *Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species*.http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp.

Frost, D. (2023). *Darrel Frost and the American Museum of Natural History*. Amphibians of the World. https://amphibiansoftheworld.amnh.org/.

Fuenzalida-Díaz, M., Figueroa-Sterquel, R. y Negrete Sepúlveda, J. (2013). Evaluación de la aptitud territorial para el turismo de naturaleza y rural. Reserva de la Biosfera La Campana–Lago Peñuelas, Chile. Estudios y Perspectivas En Turismo, 22(1), 120–137.

Fundación Natura y Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Proyecto GEF Magdalena Cauca Vive.* https://natura.org.co/minisitio-cauca-vive/

Fundación Natura. (2021). *Proyecto manejo sostenible y conservación de la biodiversidad en la cuenca del Río Magdalena – GEF Magdalena-Cauca VIVE. Piloto de monitoreo de aplicación de indicadores bióticos acuáticos, Componente Monitoreo y Evaluación de Ecosistemas Dulceacuícolas.* Fundación Natura.

G

Gaarder, T. y Gran, H. H. (1927). Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord. *Rapp. et Proc. Verb., Cons. Internat. Explor. Mer., 42*, 1-48.

García, J. L. y Martínez, M. J. (2014). *Biomasa y Biotecnología*. Sociedad Española de Microbiología.

García, R. D. (2019). *La materia orgánica disuelta en los ambientes dulceacuícolas: Efectos en los ecosistemas, transferencia y transformación*. Universidad de Buenos Aires.

García-Alzate, C., Do Nascimiento, C., Villa-Navarro, F. A., García-Melo, J. E. y Herrera-R., G. (2021). Diversidad de peces de la cuenca del río Magdalena. En *Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 85–114). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

García-Alzate. C.A. y Morales. J. (2022). Peces de planicies de inundación tropical de la cuenca baja del río Magdalena, Colombia. *Intropica, 17*(2), 218-231. https://doi.org/10.21676/23897864.4570

García, Y. y Andramunio-Acero, C. (2024a). *Fracciones de carbono para herbáceas, vegetación acuática y materia orgánica muerta, para la estimación de contenidos de carbono en humedales continentales: El Complejo Cenagoso de Zapatosa* [manuscrito enviado para publicación]

García, Y. y Andramunio-Acero, C. (2024b). *Revisión sobre ecuaciones alométricas de biomasa aérea para estimar contenidos de Carbono en humedales continentales: la vegetación del Complejo Cenagoso de Zapatosa (Colombia)* [manuscrito enviado para publicación]

Garzón Yepes, N. V. y Gutiérrez Camargo, J. C. (2017). *Deterioro de humedales en el Magdalena medio: un llamado para su conservación*. Fundación Alma, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Gentry, A. H. (1993). *A field guide to the families and genera of woody plants of northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru): with supplementary notes on herbaceous taxa*. The University of Chicago Press.

Gitelson, A. A., Vina, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G. y Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters, 30*(5).

Gómez-Delgado, M. y Barredo-Cano, J. I. (2006). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Ra-Ma.

Guiry, M. D. y Guiry, G. M. (2023). *World-wide electronic publication*. University of Galway.

Gutiérrez Campo, R. y Escobar Jiménez, K. (2021). Territorio anfibio y despojo en una zona de humedales protegida del Caribe colombiano. *Revista de Estudios Sociales*, (76), 75-92. https://doi.org/10.7440/res76.2021.06.

Gutiérrez-Moreno, L.C. y De la Parra-Guerra, A. C. (2020). Contaminación en la cuenca del rio Magdalena (Colombia) y su relación con los peces. En L. Jiménez-Segura y C. A. Lasso (Eds.), *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 239-263). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

H

Hamada, N., Nessimian, J. L. y Querino, R. B. (2014). *Insetos aquáticos na Amazônia brasileira: taxonomia, biologia e ecología*. Editora do INPA.

Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana, 28(*2), 139-147.

Herrera-Collazos, E. E., Galindo-Cuervo, A. M., Maldonado-Ocampo, J. A. y Rincón-Sandoval, M. (2020). Three new species of the *Eigenmannia trilineata* species group (Gymnotiformes: Sternopygidae) from Northwestern South America. *Neotropical Ichthyology, 18*(1). https://doi.org/10.1590/10.1590/1982-0224-2018-0085

Heyer, R., Donnelly, M. A., Foster, M. y Mcdiarmid, R. (Eds.). (2014). *Measuring and monitoring biological diversity: standard methods for amphibians*. Smithsonian Institution.

Higgins, J. V., Bryer, M. T., Khoury, M. L. y Fitzhugh, T. W. (2005). A freshwater classification approach for biodiversity conservation planning. *Conservation Biology, 19*(2), 432-445. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00504.x

Hilker, T., Coops, N. C., Nesic, Z., Wulder, M. A. y Black, A. T. (2007). Instrumentation and approach for unattended year round tower based measurements of spectral reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture, 56*(1), 72–84. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.003

Hillebrand, H., Dürselen, C. D., Kirschtel, D., Pollingher, U. y Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology, 35*, 403–424. https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E. y Telszewski, M. (2018). *Carbono Azul: Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos*. The Blue Carbon Initiative.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudia Ambientales–Ideam. (2023). *Protocolo de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos de Colombia (Promsea). Fenómenos de transformación: carga contaminante, fragmentación y cambio climático (inédito)*. Ideam.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Protocolo para la estimación de Gases de Efecto Invernadero – Sector AFOLU en ecosistemas de alta montaña*. Ideam.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Fundación Natura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación y Cancillería de Colombia. (2021). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). *Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1:100.000*. https://www.andi.com.co/Uploads/MapaEcosistemas2017.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Desertificación*. http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/24976/Protocolo-desertificacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018*). Estudio Nacional del Agua – ENA*. http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia–MEC.*

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación y Cancillería de Colombia. (2016). *Tercera comunicación nacional de cambio climático., "Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático"*. http://www.cambioclimatico.gov.co/resultados

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Fondo de Adapatación. (2014). *Mapa Potencial de Humedales de Colombia escala 1:100.000. Memoria Técnica*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Instituto Geográfico Agustín Codazzi e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2018). *Análisis de resultados del contenido de carbono orgánico en los suelos de ecosistemas de páramos y humedales de Colombia*. https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/2f9882ae-6cde-4333-9824-043e8b12adf8

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). *Capa geográfica de geopedología. Subdirección de Agrología. Formato shapefile*. https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Estudio general del suelos y zonificación de tierras del departamento del Cesar:* escala 1:100.000. IGAC.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2009). *Historical Overview of Climate Change Science: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/

J

Jabbar, F. K., Grote, K. y Tucker, R. E. (2019). A novel approach for assessing watershed susceptibility using weighted overlay and analytical hierarchy process (AHP) methodology: a case study in Eagle Creek Watershed, USA. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(31), 31981–31997. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06355-9

Jiménez-Segura, L., Herrera-Pérez, J., Valencia-Rodríguez, D., Castaño-Tenorio, I., López-Casas, S., Ríos, M. I., Rondón-Martínez, Y. F., Rivera-Coley, K., Morales, J., Arboleda, M., Muñoz-Duque, S., Atencio, V., Galeano-Moreno, A. F., Valbuena, R., Escobar, J., Ospina-Pabón, J., García-Melo, L., Gualtero, D., Alonso, J. C. y Restrepo-Santamaría, D. (2020). Ecología e historias de vida de los peces en la cuenca del río Magdalena, Colombia. En: L. Jiménez-Segura y C. A. Lasso. (Eds.). *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible*, pp. 159-203. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

K

Kauffman, J. B., Arifanti, V. B., Basuki, I., Kurnianto, S., Novita, N., Murdiyarso, D., Donato, D. y Warren, M. W. (2016*). Protocols for the measurement, monitoring, and reporting of structure, biomass, carbon stocks and greenhouse gas emissions in tropical peat swamp forests*. CIFOR. https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/WPapers/WP221Kauffman.pdf

Kauffman, J. B., Donato, D. y Adame, M. F. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los man glares*. CIFOR.

Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A. y Hedmark, Å. (2010). Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands, 30*, 111-124. https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4

Kempen, B., Brus, D. J., Stoorvogel, J. J., Heuvelink, G. B. y de Vries, F. (2012). Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Science Society of America Journal, 76*(6), 2097-2115. https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0424

Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D. y Knoke, T. (2013). Land Use/Land Cover Change Analysis Using Object-Based Classification Approach in Munessa-Shashemene Landscape of the Ethiopian Highlands, *Environmental monitoring and assessment, 187,* 1-17. https://doi.org/10.3390/rs5052411

King, C. R. y Greenwood, J. G. (1992). The productivity and carbon budget of a natural population of *Daphnia lumholtzi* Sars. *Hydrobiologia, 231*(3), 197–207. https://doi.org/10.1007/BF00018203

Koste, W. (1978). *Rotatoria, die Rädertiere Mitteleuropas*. Gebrüder Borntraeger Verlag.

Koste, W. y Shiel, R. (1989a). Rotifera from Australian inland waters. III. Euchlanidae, Mytilinidae and Trichotriidae (Rotífera: Monogononta*). Transactions of the Royal Society of South Australia, 113*, 85–114.

Koste, W. y Shiel, R. (1989b). Rotifera from Australian inland waters. IV. Colurellidae (Rotífera: Monogononta). *Transactions of the Royal Society of South Australia, 113*(3), 119–143.

Koste, W. y Shiel, R. (1989c). *Classical taxonomy and modern methodology.* Rotifer Symposium V.

Kotov, A. (2013). *Morphology and phylogeny of the Anomopoda (Crustacea: Cladócera).* KMK Scientific Publishers.

Kyalo, D. K. (2017). *Sentinel-2 and MODIS land surface temperature-based evapotranspiration for irrigation efficiency calculations* [tesis de maestría, Univerisdad de Twente]. Universidad de Twente.

Kumar, S. y Jain, K. (2020). A multi-temporal Landsat data analysis for land-use/land-cover change in Haridwar Region using remote sensing techniques. *Procedia Computer Science, 171*, 1184-1193. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.127

L

Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M. y Díaz, L. J. (2019). Construcción de una Estrategia para el Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia. *Biodiversidad en la Práctica, 4*, 150-172.

Lohse, K. A., Brooks, P. D., McIntosh, J. C., Meixner, T. y Huxman, T. E. (2009). Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems. *Annual Review of Environment and Resources, 34*, 65-96. https://doi.org/10.1146/annurev.environ.33.031207.111141

Long, J., Nelson, T. y Wulder, M. (2010). Regionalization of landscape pattern indices using multivariate cluster analysis. *Environmental management, 46*, 134-142. https://doi.org/10.1007/s00267-010-9510-6

López-Casas, S., Rondón-Martínez, Y. F., Gutiérrez-Cortés, Á., Escobar-Cardona, J. L., Muñoz-Duque, S., Valencia-Rodríguez, D., Petry, P., Batista-Morales, A. M., Rincón, C., Casas, L. F., Ospina-Pabón, J. G., Atencio-García, V., Valderrama-Barco, M., Lasso, C. A. y Jiménez-Segura, L. (2021). Diagnóstico del grado de amenaza, medidas de manejo y conservación para los peces del río Magdalena, Colombia. En *Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible*, pp. 391–430. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Lovelock, C. E., Ruess, R. W. y Feller, I. C. (2011). CO2 efflux from cleared mangrove peat. *PloS one, 6*(6), e21279. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021279

Lovich, R., Hayes, W., Mushinsky, H. y Rodda, G. (2012). Transect surveys, including line distance. En R. W. McDiarmid, M. S. Foster, C. Guyer, J. W. Gibbons y N. Chernoff (Eds.), *Reptile biodiversity, standard methods for inventory and monitoring*, pp. 227-234. University of California Press.

M

Madriñán, S., Rial, A., Bedoya, A. M. y Fernández-Lucero, M. (2017). *Plantas acuáticas de la Orinoquia colombiana*. Ediciones Uniandes.

Mahecha-Vega, G. E. (1997). *Fundamentos y metodología para la identificación de plantas*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega-Lara, A., Usma, J. S., Galvis, G., Villa-Navarro, F. A., Vásquez, L., Prada-Pedreros, S. y Ardila., C. (2005). *Peces de los Andes de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

McCafferty, W. P. (1981). *Aquatic Entomology*. Science Books International.

McCauley, E. (1984). The estimation of the abundance and biomass of zooplankton in samples. En J. A. Downing y F. H. Rigler (Eds.), *A manual on Methods for the Assessment of Secondary Productivity in Freshwater,* pp. 228–265. Blackwell.

McDiarmid, R. W. (Ed.). (2012). *Reptile biodiversity: standard methods for inventory and monitoring*. University of California Press.

McFeeters, S. K. (2013). Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. *Remote Sensing, 5*(7), 3544–3561. https://doi.org/10.3390/rs5073544

Medina-Rangel, G. F. (2007). Herpetofauna. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Estudio de inventario de fauna, flora, descripción biofísica y socioeconómica y línea base ambiental ciénaga de Zapatosa. Informe final de actividades*, pp. 118–140. Convenio interadministrativo, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.

Medina-Rangel, G.F. (2009). Estructura de la comunidad de reptiles en los alrededores del complejo cenagoso de Zapatosa. departamento del Cesar-Colombia. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Medrano, R., Yanqui, R. M., Chupan Minaya, L. y Vila Balbín, M. (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes De Ciencia & Sociedad, 2*(2). https://doi.org/10.18259/acs.2012013

Megonigal, J. P. y Schlesinger, W. H. (2002). Methanevlimited methanotrophy in tidal freshwater swamps. *Global Biogeochemical Cycles, 16*(4), 35-1 35-10. https://doi.org/10.1029/2001GB001594

Menden-Deuer S. y Lessard, E. (2020). Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protest plankton. Limnol Oceanogr 45(3), 569-579. https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0569

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2019). *Iniciativas de conservación en Colombia: reconocimiento a los esfuerzos a nivel local, regional y nacional*. https://www.asocars.org/wp-content/uploads/2020/09/Iniciativas-conservacion-Colombia.pdf

Missouri Botanical Garden. (2023). Tropicos.org. https://www.missouribotanicalgarden.org/media/fact-pages/tropicos

Mojica, J. I., Usma Oviedo, J. S., Álvarez León, R. y Lasso, C. A. (Eds.). (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Montoya-Moreno, Y. y Aguirre-Ramírez, N. (2008). Asociación de algas perifíticas en raíces de macrófitas en una ciénaga tropical colombiana. *Hidrobiológica, 18*(3), 189-197.

Moore, J. C., Berlow, E. L., Coleman, D. C., de Ruiter, P. C., Dong, Q., Hastings, A., Nancy Collins Johnson, N., McCann, K., Melville, K., Morin, P. J., Nadelhoffer, K., Rosemond, A., Post, D. M., Sabo, J. L., Scow, K. M., Vanni, M. J. y Wall, D. H. (2004). Detritus, trophic dynamics and biodiversity. Ecology letters, *7*(7), 584-600. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00606.x

Morales, A., Sánchez, F., Poveda, K. y Cadena, A. (2004). *Mamíferos terrestres y voladores de Colombia: Guía de campo*. Ramos López Editorial.

Morales-Betancourt, M. A., Lasso, C. A., Páez, V. P. y Bock, B. C. (2015). *Libro rojo de reptiles de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Mullin, M. M., Sloan, P. R. y Eppley, R. W. (1996). Relationship between carbon content, cell volume, and area in phytoplankton. *Limnology and Oceanography, 11*, 307–311.

N

Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., DeFries, R., Dietz, T., Dobermann, A., Dobson, A., Janetos, A., Levy, M., Marco, D., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Norgaard, R., Petschel-Held, G., Ojima, D., Pingali, P., Watson, R. y Zurek, M. (2006). Anthropogenic drivers of ecosystem change: an overview. *Ecology and Society, 11*(2).

Ng, R. T. y Han, J. (2002). CLARANS: A method for clustering objects for spatial data mining. *IEEE transactions on knowledge and data engineering, 14*(5), 1003-1016. https://doi.org/10.1109/TKDE.2002.1033770

Noble, B (2004). Strategic environmental assessment quality assurance: evaluating and improving the consistency of judgments in assessment panels. *Environmental Impact Assessment Review, 24*(1), 3-25. https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00118-5

Nogrady, T. y Pourriot, R. (1995*). Rotifera. The Notommatidae and the Scaridiidae. Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world*. SPB Academic Publishing.

Nogrady, T. y Segers, H. (2002). Rotifera 6: Asplanchnidae, Gastropodidae, Lindiidae, Microcodidae, Synchaetidae, Trochosphaeridae and Filinia. En H. J. Dumont (Ed.), *Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World*. p. 264. Backhuys.

Nogrady, T., Wallace, R. L. y Snell, T. W. (1993). Rotífera: Biology, Ecology and Sistematics. En H. J. Dumont (Ed.), *Guides to the identification of the microinvertebrates of the Continental Waters of the World*. SPB Academic Publishing.

O

Organización Meteorológica Mundial. (2021). *Reglamento Técnico. Documentos fundamentales N° 2 Volumen I – Normas meteorológicas de carácter general y prácticas recomendadas.*

Ozesmi, S. L. y Bauer, M. E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and management, 10*, 381-402. https://doi.org/10.1023/A:1020908432489

P

Pace, M. L. y Orcutt, J. D. (1981). The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community. *Limnology and Oceanography, 26*(5), 822–830.

Palomino, D. y Cabrera-Carranza, C. (2008). Estimación del servicio ambiental de captura del CO2 en la flora de Los Humedales de Puerto Viejo. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 10*(20), 49–59. https://doi.org/10.4319/lo.1981.26.5.0822

Parra-Sánchez, L. N. (2005). *Análisis facial de alta resolución de sedimentos del Holoceno tardío en el Páramo de Frontino, Antioquia* [tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia.

Pedroni, L. (2008). *Methodology for estimating reductions of GHG emissions from mosaic deforestation*. Banco Mundial.

Perbiche-Neves, G., Boxshall, G. A., Previattelli, D., Nogueira, M. G. y da Rocha, C. E. F. (2015). Identification guide to some Diaptomid species (Crustacea, Copepoda, Calanoida, Diaptomidae) of "de la Plata" River Basin (South America). *ZooKeys, 497*, 1–111. http://dx.doi.org/10.3897/zookeys.497.8091

Planas-Clarke, A. M., Chimner, R. A., Hribljan, J. A., Lilleskov, E. A. y Fuentealba, B. (2020). The effect of water table levels and short-term ditch restoration on mountain peatland carbon cycling in the Cordillera Blanca, Peru. *Wetlands Ecology and Management, 28*(1), 51-69. https://doi.org/10.1007/s11273-019-09694-z

Posada-García, J. A. y López-Muñoz, M. T. (2011). *Plantas acuáticas del altiplano del Oriente Antioqueño, Colombia*. Universidad Católica de Oriente.

Posada-García, J. A. y Roldán-Pérez, G. (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el Nor-occidente de Colombia. *Caldasia, 25*(1), 169–192.

Pozo, J., Elosegi, A., Diez, J. y Molinero, J. E. (2009). Dinámica y relevancia de la materia orgánica. En A. Elosegi y S. Sabater (Eds.). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (pp. 141-148). Fundación BBVA.

Proclima. (2021*). Documento metodológico sector Afolu. Cuantificación de la Reducción de Emisiones y Remociones de GEI. Actividades que evitan el cambio de uso del suelo en Humedales Continentales*. http://www.proclima.net.co.

Q

Quiroga Martínez, R., United Nations y Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. CEPAL.

R

Ramos, F. J., Quiroz, A. D. J., Ramírez, J. P. y Lot, A. (2004). *Manual de hidrobotánica. Muestreo y análisis de la vegetación acuática*. AGT.

Ramsar. (2022). *Día Internacional de la Diversidad Biológica: Declaración de Martha Rojas Urrego*. Secretaria General de la Convención sobre los Humedales. https://ramsar.org/es/nuevas/dia-internacional-de-la-diversidad-biologica-declaracion-de-martha-rojas-urrego-secretaria

Rangel-Ch, J. O. y Velázquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En *Colombia diversidad biótica II: Tipos de vegetación en Colombia*, pp. 59-82. Universidad Nacional de Colombia.

Rangel-Ch, O. y Lozano, G. (1986). Un perfil de vegetación entre La Plata (Huila) y el volcán del Puracé. *Caldasia, 14*, 503-547.

Reid, J. W. (1985). Chave de identificação e lista de referências bibliográficas para as espécies continentais sulamericanas de vida livre da ordem Cyclopoida (Crustacea, Copepoda). *Boletim de Zoologia, 9*(9), 17. https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1985.122293

Remsen, J. V. J., Areta, J. I., Bonaccorso, E., Claramunt, S., Jaramillo, A., Pacheco, J. F., Ribas, C., Robbins, M. B., Stiles, F. G., Stotz, D. F. y Zimmer, K. J. (2023*). A classification of the bird species of South America*. American Ornithological Society.

Reyes-González, A., Trooien, T., Kjaersgaard, J., Hay, C. y Reta-Sánchez, D. G. (2016). Development of crop coefficients using remote sensing-based vegetation index and growing degree days. En *ASABE Annual International Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Rial, A. (2003). El concepto de planta acuática en un humedal de los Llanos de Venezuela. *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales, 155*, 119-132.

Rojas-Ceballes, K., Rubio-Pérez, C., Lozano-Devia, F. y Rodríguez-Sierra, C. (2013). *Conocimiento local enfocado al uso del recurso hidrobiológico raya (Potamotrygon magdalenae) para las áreas de influencia Neiva, Hobo y Betania frente al aprovechamiento de los productos y subproductos del recurso*. XII Congreso Colombiano de Ictiología y III Encuentro de Ictiólogos Suramericanos.

Rondeaux, G., Steven, M. y Baret, F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment, 55*(2), 95-107. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7

Rondón-Martínez, Y. F. (2022). *Aproximación a un sistema socio ecológico de la pesca artesanal en el Magdalena medio (Colombia) a partir del conocimiento tradicional* [tesis de maestría, Universidad de Barcelona]. Universidad de Barcelona.

Rossa, C. D., Bonecker, C. y Fulone, L. J. (2007). Biomassa de rotíferos em ambientes dulcícolas: revisão de métodos e fatores influentes. *Interciencia, 32*(4), 220–226.

Rueda-Almonacid, J. V., Lynch, J. D. y Amézquita, A. (2004). *Libro rojo de los anfibios de Colombia*. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ruttner-Kolisko, A. (1974). Plankton rotifers biology and taxonomy. *Die Binnergewasser, 26*(1), 146. https://doi.org/10.4319/lo.1976.21.1.0183b

Ruttner-Kolisko, A. (1977). Suggestions for biomass calculations of plankton rotifers. *Archiv Für Hydrobiologie, 8*, 71–76.

S

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences, 1*(1), 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Saha, C., Mahmood, H., Nayan, S. N. S., Siddique, M. R. H., Abdullah, S. M. R., Islam, S. M. Z., Iqbal, M. Z. y Akhter, M. (2021). Allometric biomass models for the most abundant fruit tree species of Bangladesh: A Non-destructive approach. *Environmental Challenges, 3*. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100047

Sánchez, D. A., Pérez Pérez, D. L., Ortiz Guerrero, P., Mercado Díaz, O. A., Moreno Munar, Á. A. y Batista Morales, M. F. (2015). *Caracterización biológica y ecológica de las comunidades de plantas acuáticas, plantas terrestres y macroinvertebrados, y caracterización físico-química de aguas de la ventana piloto de estudio Ciénaga de Zapatosa*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Segers, H. (1995a). Rotífera 2. The Lecanidae (Monogononta). En *Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world*. SPB Academic Publishing BV.

Segers, H. (1995b). *World records of Lecanidae (Rotifera, Monogononta)*. IRSN.

Segers, H. (2002). The nomenclature of the Rotífera: annotated checklist of valid family and genus-group names. *Journal of Natural History, 36*(6), 631–640. https://doi.org/10.1080/00222930231733970 7

Segers, H. (2003). A biogeographical analysis of rotifers of the genus Trichocerca Lamarck, 1801 (Trichocercidae, Monogononta, Rotifera), with notes on taxonomy. *Hydrobiologia, 500*(1–3), 103–114. https://doi.org/10.1023/A:1024624132386

Segers, H. (2007). Annotated checklist of the rotifers (Phylum Rotifera), with notes on nomenclature, taxonomy and distribution. *Zootaxa, 1564*(1). https://doi.org/10.11646/zootaxa.1564.1.1

Senhadji-Navarro, K., Ruiz-Ochoa, M. A. y Rodríguez Miranda, J. P. (2017). Estado ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: Una evaluación prospectiva. *Colombia forestal, 20*(2), 191-200.

Sistema Estadístico Pesquero Colombiano. (2023). *Repositorio en línea del Sistema Estadístico Pesquero Colombiano*. http://sepec.aunap.gov.co/.

Sharma, D. N. y Tare, V. (2018). Evapotranspiration estimation using SSEBop method with sentinel-2 and landsat-8 data set. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42*, 563-566. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-563-2018

Shirk, J. L., Ballard, H. L., Wilderman, C. C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B., Krasny, M. E. y Bonney, R. (2012). Public participation in scientific research: A framework for deliberate design. *Ecology and Society, 17*(2), 29. http://dx.doi.org/10.5751/ES-04705-170229

Smock, L. A. (1980). Relationships between body size and biomass of aquatic insects. *Freshwater Biology, 10*(4), 375–383. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1980.tb01211.x

Soil Survey Staff. (1996). *Soil survey laboratory methods manual. Version No. 3.0*. USDANRCS.

Sokal, R. R. y Rohlf, F. J. (1981). *Biometry*. W. H. Freeman.

Solari, S., Muñoz, Y., Rodríguez, J., Defler, T., Ramírez, H. y Trujillo, F. (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical, 20*(2): 301-365.

Song, C., Dannenberg, M. P. y Hwang, T. (2013). Optical remote sensing of terrestrial ecosystem primary productivity. *Progress in Physical Geography, 37*(6), 834–854. https://doi.org/10.1177/0309133313507944

Sowa, S. P., Annis, G., Morey, M. E. y Diamond, D. D. (2007). A gap analysis and comprehensive conservation strategy for riverine ecosystems of Missouri. Ecological monographs, *77*(3), 301-334. https://doi.org/10.1890/06-1253.1

Springer, M., Ramírez, A. y Hanson, P. (2010). Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical, 58*(4), 1–214.

Stanford University. (2023). *InVEST Water Yield*. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Stein, W. E. y Mizzi, P. J. (2007). The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research, 177*(1), 488–497. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.057

Strathmann, R. R. (1967). Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volumen or plasma volume. Limnology and Oceanography, 12(3), 411–418. https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.3.0411

Sudzuki, M. y Haberman, J. (1998). Some notes on Brachionus rotundiformis (Tschugunoff) in Lake Palaeostomi. *Hydrobiologia, 387*, 333–340. https://doi.org/10.1023/A:1017052023691

T

Taylor, J. C., Archibald, C. y Harding, W. R. (2010). *An Illustrated Guide to Some Common Diatom Species from South Africa*. Water Research Commission.

Téllez, P., Petry, P., Walschburger, T., Higgins, J. y Apse, C. (2011). Portafolio de Conservación de Agua Dulce para la Cuenca del Magdalena -Cauca. The Nature Conservancy (TNC), Cormagdalena.

Terán, G. E., Benitez, M. F. y Mirande, J. M. (2020). Opening the Trojan horse: phylogeny of Astyanax, two new genera and resurrection of Psalidodon (Teleostei: Characidae). *Zoological Journal of the Linnean Society, 190*(4), 1217–1234. https://academic.oup.com/zoolinnean/article/190/4/1217/5819054

Thieme, M., Lehner, B., Abell, R., Hamilton, S. K., Kellndorfer, J., Powell, G. y Riveros, J. C. (2007). Freshwater conservation planning in data-poor areas: an example from a remote Amazonian de Dios River, Peru and Bolivia). *Biological conservation, 135*(4), 484-501. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.10.054

Tirira, D. (2008). *Mamíferos de los bosques húmedos del noroccidente de Ecuador*. Ediciones Murciélago Blanco y proyecto PRIMENET.

Tucker, C. J. y Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing, 7*(11), 1395–1416. https://doi.org/10.1080/01431168608948944

U

Uetz, P., Freed, P., Aguilar, R. y Hošek, J. (2023). *The Reptile Database*.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y World Commission on Protected Areas. (2017). *Guidelines for recognising and reporting other effective area-based conservation measures*. IUCN.

United States Agency for International Development. (2022). *Protocolo para la medición de flujos de GEI, Versión 1.0*. Chemonics International Inc., Ecological Carbon Offset Partners. USAID.

United States Department of Agriculture y Agricultural Research Service. (2023). *SPAW Hidrology 6.02.74*. Washington State University. https://spaw-hydrology.software.informer.com/6.0/

V

Velásquez, J. (1994). *Plantas Acuáticas Vasculares de Venezuela*. Universidad Central de Venezuela.

Venema, V., Trewin, B., Wang, X., Szentimrey, T., Lakatos, M., Aguilar, E., Auer, I., Guijaro, J. A., Menne, M. y Oria, C. (2018). *Guidance on the homogenization of climate station data*. EarthArXiv. https://eartharxiv.org/repository/view/1158/

Vide, J. M. (2009). Conceptos previos y conceptos nuevos en el estudio del cambio climático reciente. *Investigaciones Geográficas,* (49), 51-63. https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.03

W

Wallace, R. L., Snell, T. W., Ricci, C. y Thomas, N. (2006). *Rotífera: biology, ecology and systematics. Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world*. Backhuys Publishers.

Wetzel, R. G. y Likens, G. (2000). *Limnological analyses*. Springer Science y Business Media.

X

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing, 27*(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Y

Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Duque, A. J., Phillips, J. F., Cabrera, K. R., Álvarez, E., García, M. C. y Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.

Z

Zunino, M. y Palestrini, C. (1991). El concepto de especie y la biogeografía. *Anales de biología, 17*(6), 85-88. https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/2068/1/AB17%20%281991%29%20p%2085-88.pdf.