



---

# Modelación Ecohidrológica

estrategia para la gestión integral de la macrocuenca  
Magdalena - Cauca

---



MINISTERIO DE AMBIENTE Y  
DESARROLLO SOSTENIBLE





#### **Banco Interamericano de Desarrollo (BID)**

Fernando Balcázar  
Especialista Senior de Sostenibilidad División de Recursos Naturales- Colombia, 2017- 2020

Carlos Salazar  
Especialista Senior de Sostenibilidad División de Recursos Naturales- Colombia, 2020- 2022

Josué Ávila Murillo  
Especialista GEF, 2017- 2019

Olga Lucía Bautista Martínez  
Especialista GEF, 2019- 2022



#### **Fundación Natura Colombia**

Clara Ligia Solano Gutiérrez  
Directora ejecutiva

Nancy Vargas Tovar  
Subdirectora técnica

Claudia Lorena Franco  
Subdirectora técnica

Sandra Galán  
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas  
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres  
Jefe administrativa y de gestión humana

Eliana Garzón  
Jefe de comunicaciones

Juan Carlos Alonso González  
Coordinador proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive, 2017-2021

Carlos Vieira Betancourt  
Coordinador proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive, 2022

Carolina Rincón Villafrade  
Coordinadora Áreas Prioritarias de Conservación, 2019-2021

Beatriz E. Hernández Castillo  
Coordinadora Gestión de la Salud de los Ecosistemas, 2017-2021

Ana Cevalyn León Rincón  
Coordinadora Monitoreo y Evaluación, 2020-2021

#### **Equipo técnico Gestión de la Salud de los Ecosistemas Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH)**

Beatriz E. Hernández Castillo  
Coordinadora componente Gestión de la Salud de los Ecosistemas

Martha Cecilia Díaz Barrios  
Coordinadora equipo PMEHE

Nelson Obregón Neira  
Asesor científico general

Adriana Meneses Suárez  
Profesional cartografía

#### **Especialistas hidrobiológico y laboratorio**

Luísa Fernanda Mendoza Vargas  
María Carolina Reyes Motavita  
Luis Carlos Porto Peralta  
Jennifer Guagua Toloza  
María del Ángel Martínez Rodríguez  
Yesid Fernando Rondón Martínez  
Claudia Ávila Laverde  
Juan David Osorio Sánchez (auxiliar laboratorio)  
Daniel Orlando García Cárdenas (auxiliar laboratorio)

#### **Modeladores tróficos**

Ángela Liliana Gutiérrez Cortés  
Javier Fernando Poloche Hernández  
Luis Orlado Duarte Casares (Universidad del Magdalena. Asesor científico trófico)

#### **Modeladores sociales**

Iván Hernando Reina Mora  
Jhonatan Rodríguez Chaves

#### **Modeladores hidrodinámica**

Carlos Alberto Fuentes Cabrejo  
Marcelo Barros Vanegas

#### **Modeladores hidrología**

Jeffer Cañón Hernández  
Lina Patricia Bonilla Pérez  
Nicolás Duque Gardezabal

#### **Profesionales de apoyo PMEHE**

Leidy Milena Meneses Suarez  
Juan Carlos Garzón Riveros  
Paola A. D'anello Peralta

#### **Profesionales insumos escenarios**

Juan Fernando Cuervo Arévalo  
Carolina Devia Morato  
Miguel F. Arias Patiño  
Angélica M. Quintana Linares  
Carolina Maldonado Santafé  
John Freddy Caro Soler

#### **Profesionales formulación de lineamientos**

Jormmy Maritza Machado Hernández  
Linda Irene Gómez Fernández  
Wilson Pérez Ascanio  
Yolanda Pineda Cardona  
Luis Ernesto Carrasco Villota

#### **Profesionales transferencia de conocimientos y resultados**

Malory Elizabeth Ariza Arenas  
Jorge Andrés Guataquirá Ramírez  
Pedro León García Reinoso (profesor titular Universidad del Quindío - Coordinador diplomado río La Vieja)  
Magnolia Longo Sánchez (profesora titular Universidad de Bogotá, Jorge Tadeo Lozano)  
Alejandro Zuluaga Gómez (profesor coordinador diplomado ciénagas)

#### **Profesionales Ideam, apoyo PMEHE y transferencia**

Nelson Omar Vargas Martínez  
Fabio Andrés Bernal Quiroga  
Oscar Guillermo Martínez Sarmiento  
Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco  
Nury A. Mesa Buitrago  
Danilo Uasapud García  
Doris Y. Sanabria Suárez  
Jairo Andrés Garzón Hernández  
Germán A. Sopo Castillo  
Erick José Hernández Hernández  
Andrés Leonardo Olaya Ávila



#### **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)**

Yolanda González  
Directora general

Nelson Omar Vargas Martínez  
Subdirector de hidrología

Fabio Bernal Quiroga  
Profesional especializado

Doris Y. Sanabria Suárez  
Danilo Uasapud García  
Profesionales especializados  
Laboratorio de Calidad Ambiental



**MINISTERIO DE AMBIENTE Y  
DESARROLLO SOSTENIBLE**

#### **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

Susana Muhamad González  
Ministra de Ambiente y  
Desarrollo Sostenible

Carlos Eduardo Correa  
Ministro de Ambiente y  
Desarrollo Sostenible, 2020- 2022

Ricardo Lozano Picón  
Ministro de Ambiente y  
Desarrollo Sostenible, 2018- 2020

Luis Gilberto Murillo  
Ministro de Ambiente y  
Desarrollo Sostenible, 2016- 2018



#### **Fondo Adaptación**

Raquel Garavito  
Gerente



#### **Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena)**

Pedro Pablo Jurado  
Director ejecutivo

#### **© Fundación Natura Colombia**

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de esta cartilla para fines educativos u otros 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 obra fue desarrollada en el marco del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive, con base en los resultados obtenidos por el equipo del Programa de Modelación Ecohidrológica-PMEH. El contenido plasmado fue tomado de los documentos técnicos producidos por los profesionales entre los años 2018 y 2021.

#### **Cómo citar:**

Hernández Castillo, B. E. (2023). *Modelación ecohidrológica, estrategia para la gestión integral de la macrocuenca Magdalena- Cauca*. Fundación Natura Colombia.

#### **Autora**

Beatriz E. Hernández Castillo

#### **Coautor**

Juan Carlos Alonso

#### **Corrección de estilo**

Carlos Andrés Jurado Vásquez

#### **Diseño y diagramación**

Juan David González Mojica

#### **Coordinación editorial**

Maura Alejandra C. Callejas

#### **Fotografía**

Maura Alejandra C. Callejas  
Víctor Cangrejo

#### **Revisión técnica**

Olga Lucía Pulido Méndez

#### **Agradecimientos especiales**

Habitantes y procesos comunitarios (juntas comunales, pescadores, artesanos, mujeres, jóvenes, agricultores, ganaderos, adultos mayores, afros, indígenas, mineros, balseros y otros), ONG, académicos, agremiaciones, entidades competentes y autoridades locales y territoriales, de las ventanas de trabajo Río Cesar-ciénaga de Zapatosa, Río San Jorge-ciénaga de Ayapel y Río La Vieja.

1a edición: abril de 2023.  
Bogotá D.C., Colombia

#### **ISBN:**

978-628-7629-04-2

---

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Ecohidrología .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Marco conceptual .....</b>	<b>23</b>
3.1. Ventanas de modelación.....	23
3.2. Modelos: hidrológico, trófico, hidrodinámico y social .....	24
3.2.1. Especificidades del modelo conceptual trófico .....	26
3.3. Modelación social: dinámica de sistemas .....	28
3.3.1. Conceptualización social y cultural del área de cada ventana de estudio ...	28
<b>4. Metodología y desarrollo de la modelación .....</b>	<b>31</b>
4.1. Campañas de muestreo PMEH .....	33
4.1.2. Toma de muestras .....	34
4.1.3. Análisis de laboratorio y posproceso en oficina .....	36
4.2. Modelación trófica ciénagas Zapatosa y Ayapel, Ecopath-Ecosim-EWE.....	37
4.2.1. Objetivos .....	37
4.2.2. Grupos funcionales.....	38
4.2.3. Características generales de los modelos ecotróficos con Ecopath.....	39
4.2.3.1. Complejo cenagoso de Zapatosa .....	39
4.2.3.2. Complejo cenagoso de Ayapel .....	40
4.2.5. Matriz de extracción por pesca ciénagas de Zapatosa y Ayapel.....	41
4.2.6. Configuración y parametrización Ecosim ciénagas de Zapatosa y Ayapel ...	41
4.2.7. Escenarios y simulaciones de la modelación trófica.....	41
4.3. Modelación hidrológica SWAT .....	45
4.3.1. Calibración y refinamiento .....	46
4.3.2. Generación de escenarios.....	48
4.3.3. Simulación de los escenarios para la modelación hidrológica.....	53
4.4. Modelación hidrodinámica – Telemac .....	54
4.4.1. Configuración y calibración del modelo .....	54

4.4.1.1. Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio .....	55
4.4.1.2. Definición de escala temporal y espacial para las dos ventanas cenagosas .....	56
4.4.1.3. Definición de dominio y malla computacional .....	57
4.4.2. Calibración y refinamiento .....	57
4.4.2.1. Acoples .....	59
4.4.3. Simulación de los escenarios para la modelación .....	59
4.5. Modelación social–dinámica de sistemas.....	61
4.5.1. Configuración y calibración del modelo social.....	62
4.5.2. Escenarios y simulaciones de la modelación social .....	69

## **5. Resultados ..... 70**

5.1. Resultados campañas de monitoreo complejo cenagoso de Zapatosa .....	70
5.1.1. Índice de Shannon .....	72
5.2. Resultados modelos tróficos Ecopath – Ecosim Zapatosa y Ayapel.....	74
Resultados escenarios simulados .....	74
5.2.2. Ciénaga de Ayapel .....	79
5.3. Resultados modelos hidrológicos .....	82
5.3.1. Escenarios para la cuenca del río Cesar .....	84
5.3.2. Escenarios para la cuenca del río San Jorge.....	87
5.3.3. Escenarios para la cuenca río La Vieja.....	89
5.4. Resultados modelos hidrodinámicos .....	92
5.4.1. Simulaciones modelación hidrodinámica complejo cenagoso de Zapatosa .....	92
5.4.2. Simulaciones modelación hidrodinámica complejo cenagoso de Ayapel...	100
5.5. Resultados modelo Social.....	105
5.5.1. Escenarios de modelación SSE río Cesar – ciénaga de Zapatosa .....	105
5.5.2. Escenarios de modelación SSE río San Jorge – ciénaga de Ayapel .....	108
5.5.3. Escenarios de modelación SSE río La Vieja.....	111

<b>6. Lineamientos .....</b>	<b>114</b>
6.1. Metodología para consecución y revisión de información .....	115
6.2. Enfoque ecohidrológico para estimar y promover la salud de los ecosistemas .....	116
6.2.1. Línea socioecológica .....	117
6.2.2. Líneas hidrológica e hidrodinámica.....	118
6.2.3. Línea biótica .....	119
6.3. Aportes del PMEH para la capacidad institucional .....	124
6.3.1. Aportes del PMEH para ODS .....	124
6.3.2. Para el fortalecimiento de lineamientos de políticas e instrumentos sectoriales .....	124
6.3.3. Propuestas medidas de gestión hídrica.....	125
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>127</b>
<b>8. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>131</b>

# Tablas

---

<b>Tabla 1.</b> Modelos empleados por el PME H en las ventanas de trabajo. ....	20
<b>Tabla 2.</b> Relaciones entre modelos empleados por el PME H (Hernández y Peña, 2022). ....	21
<b>Tabla 3.</b> Resumen parámetros muestreados y analizados PME H (2020).....	34
<b>Tabla 4.</b> Instructivos Ideam utilizados PME H (2020).....	36
<b>Tabla 5.</b> Análisis grupos funcionales Ciénagas Zapatos a y Ayapel, modelación trófica.....	38
<b>Tabla 6.</b> Sectores de muestreo seleccionados para la modelación ecotrófica del Complejo Cenagoso de Zapatos a (CCZ) (PME H, 2021) .....	39
<b>Tabla 7.</b> Modelos ecotróficos construidos en ciénaga de Ayapel (Poloche PME H, 2021). ....	40
<b>Tabla 8.</b> Parametrización y matrices de entradas modelos tróficos.....	40
<b>Tabla 9.</b> Escenarios simulados modelo trófico complejo cenagoso de Zapatos a. ....	42
<b>Tabla 10.</b> Escenarios simulados modelo trófico ciénaga de Ayapel. ....	44
<b>Tabla 11.</b> Procedimiento calibración y refinamiento modelo hidrológico.....	46
<b>Tabla 12.</b> Descripción y características de los RCP de cambio climático (Ideam <i>et al.</i> , 2015). ....	49
<b>Tabla 13.</b> Resumen de los métodos utilizados para el análisis de cambio climático (PME H, 2021).....	50
<b>Tabla 14.</b> Insumos cálculo escenario cambio climático. ....	50
<b>Tabla 15.</b> Impulsores de cambio utilizados por ventana (PME H, 2021).....	51
<b>Tabla 16.</b> Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio ciénaga de Zapatos a .....	55
<b>Tabla 17.</b> Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio ciénaga de Ayapel. ....	56
<b>Tabla 18.</b> Procedimiento calibración y refinamiento modelación hidrodinámica. ....	58
<b>Tabla 19.</b> Escenarios modelados hidrodinámica ventana Ciénaga de Zapatos a PME H. ....	60
<b>Tabla 20.</b> Escenarios modelados hidrodinámica ventana Ciénaga de Ayapel PME H.....	61
<b>Tabla 21.</b> Porcentajes de manejo por ventana y por escenario PME H.....	69
<b>Tabla 22.</b> Interpretación índice de Shannon campañas ciénaga de Zapatos a.....	73
<b>Tabla 23.</b> Estadísticos serie de tiempo, área y volumen ciénaga de Ayapel (Barros, 2021).....	102
<b>Tabla 24.</b> Lineamientos y recomendaciones propuestos desde el enfoque y análisis de resultados de las líneas de hidrología e hidrodinámica del PME H, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Machado, 2021). ....	118
<b>Tabla 25.</b> Lineamientos y recomendaciones propuestos desde el enfoque y análisis de resultados de línea biótica del PME H, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Machado, 2021). ....	120
<b>Tabla 26.</b> Lineamientos hacia medidas de gestión hídrica con destino al SIAC. ....	125

# Figuras

---

<b>Figura 1.</b> Aplicación de la ecohidrología en las soluciones de problemas (Unesco y Programa Hidrológico Intergubernamental, 2018). .....	18
<b>Figura 2.</b> Esquema programa de modelación ecohidrológica GEF-MCV (Peña y Hernández, 2022). .....	19
<b>Figura 3.</b> Ruta metodológica PMEHE GEF-MCV (PMEH, 2018-2021).....	21
<b>Figura 4.</b> Localización ventanas de trabajo PMEHE. ....	24
<b>Figura 5.</b> Alteraciones e interacciones en el ciclo hidrológico (Cañón PMEHE, 2021). .....	25
<b>Figura 6.</b> Modelo conceptual modelación (Gutiérrez PMEHE, 2020). .....	27
<b>Figura 7.</b> Subsistemas para el análisis de los Sistemas Socioecológicos (Reina PMEHE, 2021). ...	29
<b>Figura 8.</b> Diagrama de la conceptualización del sistema socioecológico de la ciénaga de Ayapel para el PMEHE. Con servicios de aprovisionamiento, de soporte y culturales. (Reina PMEHE, 2020).....	30
<b>Figura 9.</b> Insumos para la modelación PMEHE (Peña, 2022). .....	32
<b>Figura 10.</b> Sitios de muestreo ciénaga de Zapatososa y distribución por campañas (PMEHE 2020). ..	35
<b>Figura 11.</b> Cuencas río La Vieja y río Cesar- Ciénaga de Zapatososa, HRU y estaciones hidrometeorológicas (PMEHE, 2020). .....	47
<b>Figura 12.</b> Cuenca río San Jorge- Ciénaga de Ayapel, HRU y estaciones hidrometeorológicas (PMEHE, 2020). .....	47
<b>Figura 13.</b> Pasos para el desarrollo del modelo de simulación del cambio del uso del suelo con el programa Dinámica EGO V5 (PMEHE 2021). .....	52
<b>Figura 14.</b> Combinaciones de trabajo con escenarios de cambio climático, uso y cobertura de suelos (PMEHE 2021). .....	53
<b>Figura 15.</b> Proceso modelación hidrodinámica (Peña y Hernández, 2022).....	60
<b>Figura 16.</b> Hipótesis dinámica del sistema social, económico y cultural del complejo cenagoso de Zapatososa (Reina, 2021).....	63
<b>Figura 17.</b> Hipótesis dinámica sistema social, económico y cultural de la ciénaga de Ayapel (Reina, 2021). .....	65
<b>Figura 18.</b> Hipótesis dinámica del sistema social, económico y cultural de la cuenca del río La Vieja (Reina, 2021). .....	67
<b>Figura 19.</b> Índice de biodiversidad de Shannon (H') comunidades hidrobiológicas monitoreo ciénaga de Zapatososa: C1 primera campaña (06/2019); C2 segunda campaña (11/2019); C3 tercera campaña (3/2020) (PMEHE, 2020). .....	72
<b>Figura 20.</b> Respuesta de la biomasa relativa por categorías al escenario de incremento del 100% del uso de red de enmalle fijo. a) consumidores cuaternarios, b) consumidores terciarios, c) consumidores secundarios, d) vertebrados consumidores primarios, e) invertebrados consumidores primarios, f) productores primarios (Gutiérrez, 2021). .....	76

<b>Figura 21.</b> Respuesta de la biomasa relativa por categorías a las variaciones del nivel histórico del agua. a) consumidores cuaternarios, b) consumidores terciarios, c) consumidores secundarios, d) vertebrados consumidores primarios, e) invertebrados consumidores primarios, f) productores primarios (Gutiérrez, 2021).....	78
<b>Figura 22.</b> Simulación donde se elimina las artes de pesca en el complejo cenagoso de Ayapel durante un año, proyectado a quince años (Poloche PME, 2021).....	80
<b>Figura 23.</b> Comportamiento de biomasa de grupos funcionales en el escenario de variables forzantes de sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos y oxígeno disuelto, obtenidos del escenario de cambio climático RCP 4.5, en el complejo cenagoso de Ayapel, proyectado a 35 años (Poloche PME, 2021).....	82
<b>Figura 24.</b> Cuenca río Cesar división en dos cuencas menores (PME, 2020).....	84
<b>Figura 25.</b> Resumen resultados escenarios hidrológicos río Cesar-Rancho Claro (Cañón PME, 2021).....	85
<b>Figura 26.</b> Resumen resultados escenarios hidrológicos. Río Cesar-ciénaga El Banco (Cañón PME, 2021).....	86
<b>Figura 27.</b> Caudales anuales m <sup>3</sup> /s salida modelo San Jorge Base (Cañón, 2021).....	87
<b>Figura 28.</b> Caudales anuales m <sup>3</sup> /s salida modelo San Jorge 50Extrac4.5 (Cañón, 2021).....	87
<b>Figura 29.</b> Caudales anuales m <sup>3</sup> /s salida modelo San Jorge 50Tend4.5 (Cañón, 2021).....	87
<b>Figura 30.</b> Carga de sedimentos toneladas anuales salida modelo San Jorge base (Cañón, 2021).....	88
<b>Figura 31.</b> Carga de sedimentos, toneladas anuales salida, modelo San Jorge 50Extrac4.5 (Cañón, 2021).....	88
<b>Figura 32.</b> Carga de sedimentos, toneladas anuales salida, modelo San Jorge 50Tend4.5 (Cañón, 2021).....	88
<b>Figura 33.</b> Escurrimiento multianual (%) por escenario de uso y cobertura del suelo para cada subcuenca en los RCP 4.5 y RCP 8.5. (Bonilla, 2021).....	90
<b>Figura 34.</b> Escorrentía superficial multimensual (mm) para el periodo de referencia (1993-2015) y para los diferentes escenarios de coberturas del suelo y RCP 4.5 para el periodo 2019-2099 (Bonilla, 2021).....	91
<b>Figura 35.</b> Resumen escenario caudal superficial proyectado vs escenario base 2016-2099 La Vieja (Bonilla PME, 2021).....	92
<b>Figura 36.</b> Detalle bifurcación caño Cachaco y río Cesar en Rancho Claro (Fuentes, 2021).....	94
<b>Figura 37.</b> Distribución de caudales caño Cachaco – río Cesar PME (Fuentes, 2021).....	95
<b>Figura 38.</b> Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario base (Fuentes, 2021).....	97
<b>Figura 39.</b> Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario cierre del río Cesar (Fuentes, 2021).....	98

<b>Figura 40</b> Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario cierre caño Cachaco (Fuentes, 2021).....	99
<b>Figura 41.</b> Estadísticos área volumen escenario rompederos ciénaga de Ayapel PMEH (Barros, 2021). .....	101
<b>Figura 42.</b> Periodos de inundación para valores de profundidad (inferior) y de velocidad escalar (superior) en la ciénaga de Ayapel, para la simulación de rompederos (Barros, 2021). .....	102
<b>Figura 43.</b> Comparación mensual área ciénaga Ayapel simulación rompederos y de línea base (Barros, 2021). .....	103
<b>Figura 44. (a y b).</b> Comparación mensual volumen ciénaga de Ayapel, simulación de rompederos y de línea base (Barros, 2021).....	104
<b>Figura 45 (a y b).</b> Diferencia mensual de serie de nivel (línea base y rompederos) (punto 1) (Barros, 2021). .....	105
<b>Figura 46.</b> Población total y dedicada a la pesca, en escenario extractivista (Reina PMEH 2021). .....	106
<b>Figura 47.</b> Población dedicada a ganadería, agricultura y desempleada (Reina PMEH 2021).....	106
<b>Figura 48.</b> Ingresos por actividad de ganadería y pesca (Reina PMEH 2021). .....	107
<b>Figura 49.</b> Ingresos por actividad agrícola (Reina PMEH 2021). .....	107
<b>Figura 50.</b> Población en pesca, ganadería, agricultura y minería (Reina PMEH 2021). .....	108
<b>Figura 51.</b> Población flotante.....	109
<b>Figura 52.</b> Ingresos por ganadería, agrícola y minería (Reina PMEH 2021). .....	109
<b>Figura 53.</b> Ingresos por pesca.....	110
<b>Figura 54.</b> Extracción de oro.....	110
<b>Figura 55.</b> Población rural, cabeceras municipales y tasa de desempleo.....	111
<b>Figura 56.</b> Población de turistas. ....	111
<b>Figura 57.</b> Población total. ....	112
<b>Figura 58.</b> Ingresos por café.....	112
<b>Figura 59.</b> Ingresos por ganadería (Reina PMEH 2021). ....	113
<b>Figura 60.</b> Ingresos por agricultura.....	113
<b>Figura 61.</b> Esquema metodológico, formulación y lineamientos en territorio PMEH (Pineda, 2021). .....	115

## Siglas y acrónimos

---

<b>ADCP</b>	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
<b>Aunap</b>	Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desarrollo
<b>C1</b>	Campaña de muestreo del PMEh, junio de 2019 (época de niveles de transición).
<b>C2</b>	Campaña de muestreo del PMEh, noviembre de 2019 (época de niveles máximos).
<b>C3</b>	Campaña de muestreo del PMEh, marzo 2020 (época de estiaje: niveles mínimos).
<b>CCZ</b>	Complejo Cenagoso de Zapatosa
<b>Cormagdalena</b>	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena
<b>CPUE</b>	Captura por unidad de esfuerzo
<b>DANE</b>	Departamento Nacional de Estadística
<b>DEM</b>	Modelo de elevación digital (siglas en inglés),
<b>DBO</b>	Demanda Biológica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de oxígeno
<b>DOFA</b>	Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas
<b>DS</b>	Dinámica de Sistemas
<b>E1, E2... En.</b>	Estación o sitio de muestreo en campo
<b>ESGF</b>	<i>Earth System Grid Federation</i>
<b>EGO</b>	Environmental for Geoprocessing Objects
<b>EIOA</b>	Explotación ilegal de oro de aluvión
<b>GEF</b>	Fondo del Ambiente Global (por sus siglas en inglés)

<b>GEI</b>	Gases Efecto Invernadero
<b>GIRH</b>	Gestión Integral del Recurso Hídrico
<b>HRU</b>	Unidades de respuesta hidrológica (siglas en inglés)
<b>ICA</b>	Instituto Colombiano Agropecuario
<b>Ideam</b>	Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IGAC</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>LIDAR</b>	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
<b>MADS</b>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
<b>MCV</b>	Magdalena-Cauca Vive
<b>MUSLE</b>	Ecuación universal modificada de pérdida del suelo (siglas en inglés)
<b>MCG</b>	Modelos Climáticos Globales
<b>N, C, P</b>	Nitrógeno, carbono, fósforo
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>PMEH</b>	Programa de Modelación Ecohidrológica, GEF MCV
<b>PNGIRH</b>	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico
<b>POMCA</b>	Plan de ordenación y Manejo de Cuenca
<b>SEPEC</b>	Servicio estadístico pesquero colombiano
<b>SIAC</b>	Sistema de Información Ambiental de Colombia
<b>SSE</b>	Sistema Socioeconómico
<b>PCC</b>	Paisaje Cultural Cafetero
<b>PHI-Unesco</b>	Programa Hidrológico Intergubernamental de la Unesco
<b>RCP</b>	Caminos Representativos de Concentración

<b>SWAT</b>	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
<b>Unesco</b>	Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura (siglas en inglés)
<b>UPRA</b>	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria
<b>USDA</b>	USDA Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (siglas en inglés)
<b>Waqtel</b>	<i>Water quality for Telemac</i>

## Unidades

---

<b>m</b>	Metro
<b>cm</b>	Centímetro
<b>mm</b>	Milímetros
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado
<b>km<sup>3</sup></b>	Kilómetro cúbico
<b>hm<sup>3</sup></b>	Hectómetro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metros cúbicos por segundo
<b>t</b>	Tonelada
<b>t/ha</b>	Tonelada por hectárea
<b>kt</b>	Kilo tonelada
<b>°C</b>	Grado centígrado
<b>l</b>	Litro

# 1. Introducción

La Fundación Natura, ejecutora del proyecto GEF CO-T1412 “Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad en la Cuenca del Río Magdalena”, a través de sus tres componentes técnicos de trabajo, propone: i) mejorar la representatividad e integridad ecológica de los ecosistemas dulceacuícolas en la cuenca, ii) contribuir al mantenimiento y salud de los ecosistemas dulceacuícolas en la cuenca y iii) aportar en fortalecer el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) con el diseño del sistema de monitoreo de ecosistemas de agua dulce y su biodiversidad asociada.

Desde las responsabilidades del componente 2 del proyecto, “gestión de la salud de los ecosistemas”, se conformó el Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH), compuesto por un equipo de profesionales de alta calidad, por su experticia y preparación en diversas disciplinas de las ciencias naturales, sociales, de la ingeniería y administrativas. Para el logro de sus objetivos, se implementaron metodologías integradoras de varias disciplinas del conocimiento y se desarrolló una estrategia de estudio de ecosistemas de importancia territorial y nacional, a través de herramientas de modelación, ante la carencia de suficiente información (aportada por estaciones hidroclimáticas bióticas o similares) para conocer el estado de deterioro o conservación de los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados, cuyos beneficios aportan experiencia y resultados a las comunidades usuarias, que se pueden utilizar en ecosistemas similares del país, para conocer su estado, amenazas y apoyar la toma de decisiones informada, además de aportar tanto en seguridad hídrica y alimentaria, como ciencia, al país y al mundo.

A través del modelamiento se cuantificaron y analizaron variables hidrobiológicas que: determinan la salud de los cuerpos de agua; evalúan las amenazas vinculadas con procesos de sedimentación, alteración del régimen hídrico, cambio climático, uso de

suelo y otras presiones sobre el recurso hídrico; ayudan a comprender aspectos de la dinámica de los ecosistemas acuáticos y de las cuencas. Todo esto para orientar y fortalecer la gobernanza y capacidades locales en la gestión de ecosistemas dulceacuícolas, particularmente en la incorporación de la salud de los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad en los procesos de toma de decisiones en la planeación ambiental y del territorio, incorporando los principios y metodologías de la **ecohidrología** como ciencia integradora (hidrología, hidrodinámica, sedimentología, biótico y social) e innovadora, aún incipiente en el país, que se implementó en las tres ventanas de trabajo, definidas por el proyecto como de interés para la nación y como sitios representativos de diferentes sectores de la macrocuenca.

Asimismo, se presenta de manera sintética la ruta metodológica definida para cumplir con los propósitos del proyecto, de responsabilidad del componente 2, su implementación y puesta en marcha, como los resultados más destacados.

Este documento se elaboró con base en el material producido por el equipo del PMEH a lo largo de cuatro años de trabajo. Los enfoques y resultados del PMEH se sustentan de manera detallada y explícita en los documentos producidos –de libre



Estación automática Barrancones. Aguas altas. Ciénaga de Zapatos.

consulta en los enlaces o códigos QR que se encuentran a lo largo del documento y que se van relacionando en cada tema—.

Se trata de información actualizada, relevante e integral, enfocada en el recurso hídrico y con dinámicas ecosistémicas, conductas y acciones sociales, a partir de bases técnicas y científicas consistentes en la gestión de ecosistemas dulceacuícolas, en la planificación ambiental y territorial, que pueden brindar o complementar fundamentos, tanto a instituciones públicas, como a otros actores sectoriales y de la sociedad en general, fundamentando análisis y directrices/lineamientos más efectivos para una gestión ambiental y territorial que trace una gobernanza efectiva.

El proceso fue acompañado por los socios del proyecto: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fondo Adaptación, Cormagdalena y particularmente por el Ideam, autoridad hidrológica nacional que brindó acompañamiento y aporte técnico-científico, a través de su infraestructura física, informática, laboratorios, equipos humanos y físicos de medición de las

condiciones de los cuerpos de agua, la red de estaciones, áreas operativas, protocolos de recolección y análisis de muestras, en específico de la modelación ecohidrológica.

La calidad científica del proceso fue respaldada por la academia a través de las universidades del Magdalena, Quindío, Córdoba, Nacional (sede Bogotá y Facultad de minas de Medellín), Jorge Tadeo Lozano de Bogotá y Javeriana (Instituto Javeriano del Agua y maestría en hidrosistemas) con intercambio de experiencias, conocimientos, reflexiones y consultas sobre metodologías, resultados, información disponible, entre otras. También se compartieron metodologías, avances, resultados y recibieron aportes desde el Programa Hidrológico Intergubernamental de la Unesco (PHI-Unesco).

Los territorios aportaron con entidades aliadas como la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap), las autoridades ambientales, gobernaciones, alcaldías municipales, procesos comunitarios locales y territoriales de las ventanas de trabajo (mesas del agua, concejos de

cuencas, asociaciones de pescadores, mujeres, artesanas, juntas comunales), por medio de comunicación, acompañamiento e intercambios presenciales y virtuales, apoyo en el trabajo en territorio y entrega de los resultados y metodologías utilizadas por el equipo, a través de talleres, reuniones, transferencia de conocimiento, diplomados virtuales, por ventana de trabajo y con actores de los territorios, tanto de entidades, como de comunidades y sus procesos.

Se considera importante avanzar y mantener la gestión de estos desarrollos metodológicos en el país, que aportan información del estado y tendencias de los recursos naturales y los ecosistemas propiamente, así como su consulta, acceso y uso responsable (apropiación); esta información de interés general permite identificar necesidades concretas actuales y tendenciales en los territorios, así como estimar aspectos de la efectividad de la aplicación de las políticas públicas, orientar en procesos de actualización y ajuste de lineamientos de políticas e instrumentos de planeación y gestión, para, finalmente, aportar en la toma de decisiones acertadas y estratégicas hacia la sostenibilidad ambiental y el desarrollo socioeconómico, en múltiples contextos políticos, sectoriales y sociales.

El documento es un aporte y una invitación al trabajo articulado, multidisciplinario, interinstitucional y armónico de los estudiosos y beneficiarios de la información aquí consignada. Será grato recibir los aportes de los lectores. El equipo responsable de esta información agradece la acogida y rigor con que se consulte.

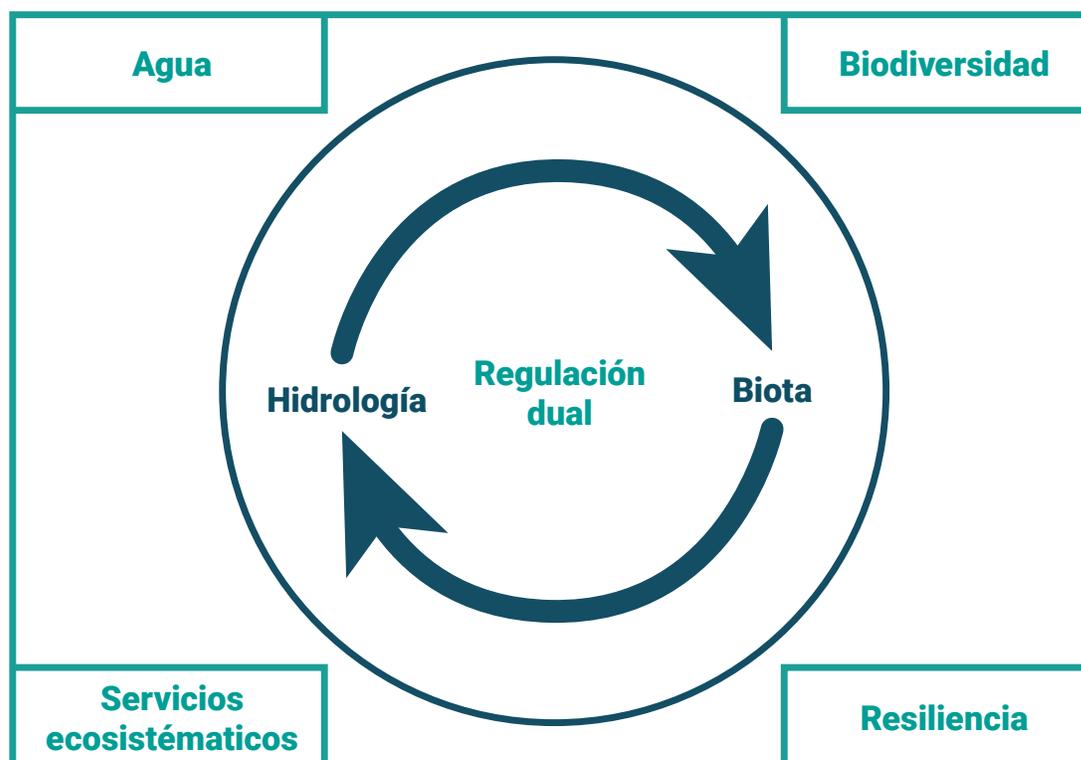
## 2. Ecohidrología



Aguas bajas en la ciénaga de Zapatos.

La ecohidrología es una ciencia integradora del conocimiento, que parte del principio de regulación dual de los ecosistemas, en la cual la hidrología brinda insumos para regular la biota, incluidos los seres humanos y las sociedades, constituyendo un instrumento para la regulación de procesos hidrológicos. Esta relación de doble vía establece un abordaje que brinda bases para la gestión sostenible de los recursos hídricos y promueve el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, la disponibilidad y calidad de agua, la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas ante diferentes escenarios, como las proyecciones de cambio climático (Unesco y Programa Hidrológico Internacional, 2018; Unesco, 2010) (Figura 1).

Su enfoque metodológico se basa en los cuatro pasos u objetivos: i) monitoreo de amenazas, ii) evaluación de la relación causa-efecto, iii) elaboración de métodos y iv) desarrollo de soluciones de sistemas.



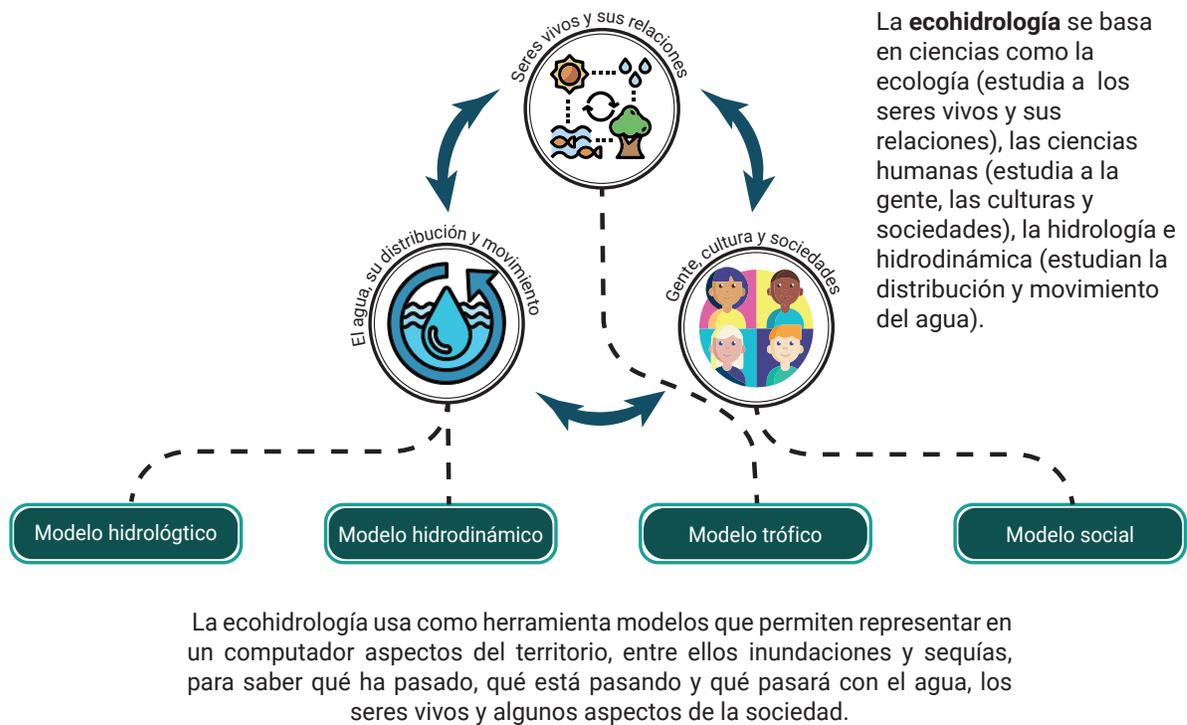
**Figura 1.** Aplicación de la ecohidrología en las soluciones de problemas (Unesco y Programa Hidrológico Intergubernamental, 2018).

Estos cuatro objetivos o pasos deben contribuir a la aplicación de métodos para integrar los habitantes de los diferentes territorios de cada ventana de estudio, sensibilizando en educación ambiental y manejo de riesgos a las diferentes comunidades, fortalecimiento de capacidades sociales y comunitarias, donde se pueda construir un espacio de concertación y comunicación. Así se genera un ambiente propicio para acceder y aprovechar los servicios ecosistémicos de cada hidrosistema. Esto contribuye a un esquema con enfoque ecohidrológico para la toma de decisiones en la reglamentación o iniciativas enmarcadas en la PNGIRH.

Basado en lo anterior, el Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH) del proyecto Magdalena-Cauca Vive, aborda el desarrollo del trabajo a partir de la integración de información de ecosistemas (relaciones tróficas), el recurso hídrico (distribución y movimiento del agua) y las comunidades locales.

Para ello, desarrolla modelos hidrológicos, hidrodinámicos, tróficos y sociales que permiten entender y representar procesos específicos, así como realizar la prospección de cambios en el territorio ante diferentes tipos de escenarios futuros (cambio climático, uso y cobertura del suelo), para proporcionar a los tomadores de decisiones bases concretas de uso, manejo y conservación de los ecosistemas. Relacionamiento que se describe en la Figura 2.

## ¿Qué es ecohidrología?



**Figura 2.** Esquema programa de modelación ecohidrológica GEF-MCV (Peña y Hernández, 2022).

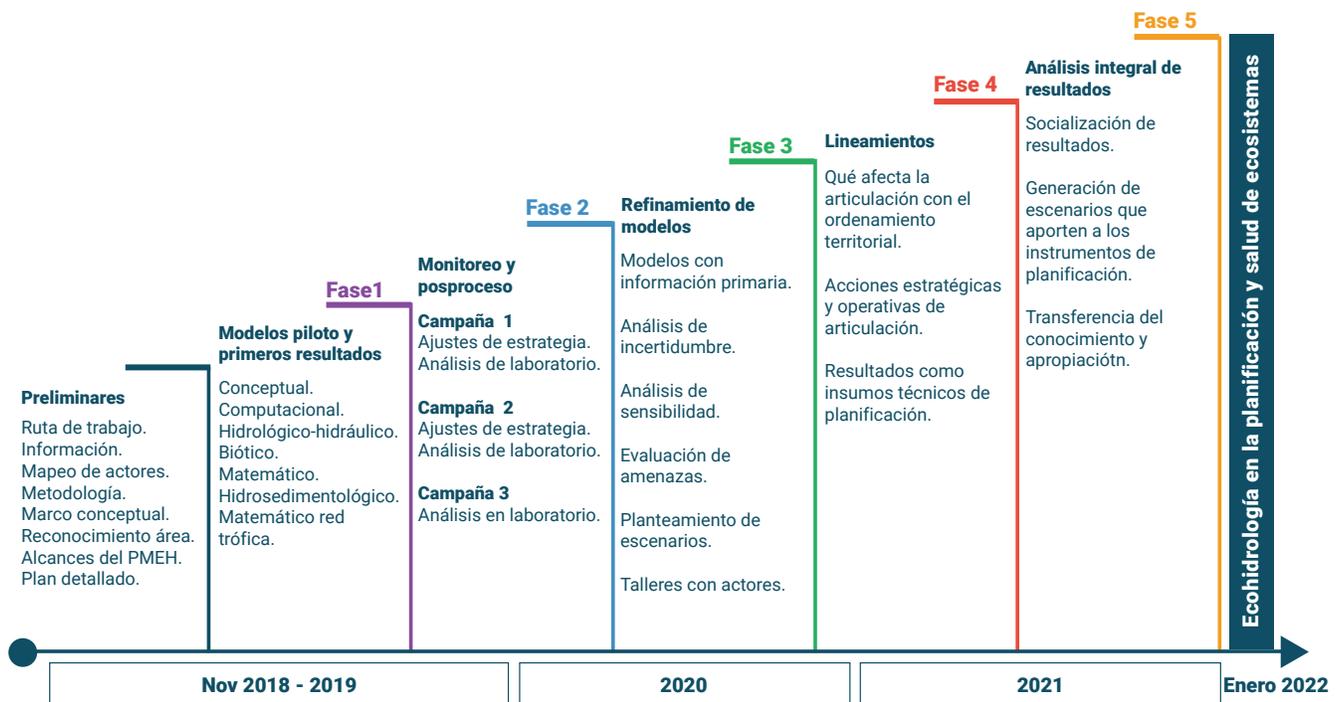
La ecohidrología integra el conocimiento que tenemos acerca de la distribución y forma en la que el agua circula en el planeta y su relación con los seres vivos, incluidos seres humanos y sociedades.

El PMEH del proyecto GEF-MCV, se implementó atendiendo cinco fases y una etapa preliminar, en el marco de la ruta metodológica que se muestra en la Figura 3, fases que se desarrollaron con diferente alcance, de acuerdo con las características propias de las tres ventanas de trabajo analizadas.

Los resultados y avances obtenidos en la etapa de preliminares, permitió determinar que en el hidrosistema de la ciénaga de Zapatosa no existen suficientes estudios detallados de su dinámica pesquera, hidrología, hidrodinámica, ni su parte biótica, lo que requirió que se iniciaran actividades de monitoreo y modelamiento, convirtiéndose así en el **proyecto piloto de modelación ecohidráulica** para el medio colombiano, en el cual se desarrollaron todas las fases del esquema metodológico. A partir de los modelos que se relacionan en la Tabla 1, se produce información y análisis desde diferentes perspectivas y abordajes disciplinares. En este contexto, la ecohidrología toma insumos de cada uno de estos abordajes y realiza un análisis integrado del territorio, que reconoce la estructura y dinámica del recurso hídrico y de los socioecosistemas.

**Tabla 1.** Modelos empleados por el PMEH en las ventanas de trabajo.

Tipo de modelo	Descripción	Información que brinda
<b>Hidrológico</b>	Es la representación de la cuenca y el ciclo del agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudales, escorrentía y otras variables del ciclo hidrológico.</li> <li>- Analiza el efecto de la variabilidad y cambio climático sobre el comportamiento del agua en una cuenca.</li> <li>- Permite entender y proyectar las consecuencias de eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones.</li> <li>- Permite saber qué pasa con el ciclo hidrológico cuando hay cambios en las coberturas vegetales.</li> </ul>
<b>Hidrodinámico</b>	Es la representación de la forma en la que se mueve el agua, nutrientes y sedimentos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brinda información de cómo se mueve el agua y los compuestos que están en ella: nutrientes, contaminantes y sedimentos.</li> <li>- Estima las posibles consecuencias sobre la calidad del agua ante contingencias y cambios en el territorio, como derrames, rompimiento de barreras, inundaciones extremas, etc.</li> </ul>
<b>Trófico</b>	Es la representación de la transferencia de materia y energía entre un organismo y otro, mediante la alimentación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite predecir los cambios en la biomasa (cantidad de materia viva) o abundancia de organismos, en función de las condiciones ambientales, sociales y económicas.</li> <li>- Proyecta escenarios de simulación que permiten, por ejemplo, evaluar los efectos de la pesca sobre las poblaciones de peces y sus impactos en el ecosistema.</li> </ul>
<b>Social</b>	Es la representación de la información social, demográfica, económica y cultural.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brinda información respecto al sistema social, la relación entre aspectos económicos y los servicios ecosistémicos.</li> <li>- Proyecta escenarios de simulación que permiten comprender las consecuencias sociales y económicas ante afectaciones en los ecosistemas.</li> </ul>



**Figura 3.** Ruta metodológica PMEHE GEF-MCV (PMEH, 2018-2021).

En el marco del nuevo paradigma de trabajo, los modelos se apoyan unos a otros. Para comprender mejor cómo se relacionan entre sí, en la Tabla 2 se presenta un resumen de los aportes que brindan y reciben cada uno de los modelos descritos.

**Tabla 2.** Relaciones entre modelos empleados por el PMEHE (Hernández y Peña, 2022).

Modelos	Hidrológico	Hidrodinámico	Tráfico	Social
<b>Hidrológico</b>		El modelo hidrodinámico le define al modelo hidrológico el alcance espacial o cobertura de la modelación, así como su nivel de detalle.	El modelo tráfico brinda requerimientos para generar las series de tiempo para la ejecución de simulaciones en los modelos Ecosim o Ecospace.	El modelo social aporta información de la población, a tener en cuenta en el cálculo de los escenarios de demanda, uso y cobertura del suelo. Apoya la identificación de los motores de cambio en cada territorio.  Aporta información de transformación del territorio, que conlleva a que se modifique la hidrología.

Modelos	Hidrológico	Hidrodinámico	Trófico	Social
<b>Hidrodinámico</b>	El modelo hidrológico define la condición de frontera o entrada del modelo hidrodinámico, proporciona caudales, sedimentos y calidad del agua que ingresa a la ciénaga, incorporando escenarios futuros de cambio climático, demanda, uso y cobertura del suelo.		El modelo trófico brinda aportes de cálculo de biovolúmenes de las comunidades de fitoplancton que son modeladas en hidrodinámica. Aporta información de cómo se comportan las comunidades bióticas, para poder incorporarlas en la modelación hidrodinámica.	El modelo social aporta información de la población y el territorio; útil en la selección de los supuestos escenarios a simular. También aporta información de transformación del territorio, por parte de los humanos, que conlleva a que se modifique la hidrología.
<b>Trófico</b>	El modelo hidrológico brinda proyecciones de los niveles y condiciones de la calidad del agua, nutrientes y sedimentos de las cuencas, como base para estimar la productividad del ecosistema, la respuesta de los grupos funcionales en los diversos niveles de la cadena trófica y en las diferentes etapas del pulso de inundación.	El modelo hidrodinámico aporta información de líneas de flujo, velocidades y profundidad en las ciénagas, tiempo de residencia, frecuencias de inundación. Adicionalmente permite simular los niveles de transparencia.		El modelo social brinda información sobre el crecimiento poblacional, las actividades de las comunidades locales y otro tipo de información de variables sociales para construir las matrices de entrada a los modelos tróficos.
<b>Social</b>	El modelo hidrológico aporta a la simulación social de los resultados en escenarios de cambio climático, uso y cobertura del suelo.	El modelo hidrodinámico brinda información de simulaciones de escenarios de cambio en el flujo y movimiento del agua. Puede interpretarse en los modelos sociales, de acuerdo con los impactos positivos o negativos que pueda tener sobre el bienestar de la población.	El modelo trófico aporta información con base en la simulación de aspectos pesqueros y las proyecciones en escenarios futuros, para promover una base para la toma de decisiones de la gestión y manejo pesquero, en un contexto de sostenibilidad.	

# 3. Marco conceptual



Acciones de visión integrada del territorio para el Programa de Modelación Ecohidrológica- PMEH.

## 3.1. Ventanas de modelación

La modelación ecohidrológica se desarrolló para tres ventanas de estudio en Colombia, previamente definidas por el equipo GEF-BID que formuló el proyecto: cuenca río Cesar (ecosistema lótico)-ciénaga de Zapatosa (ecosistema léntico); cuenca del río San Jorge (ecosistema lótico)-ciénaga de Ayapel (ecosistema léntico); y cuenca del río La Vieja (ecosistema lótico) (Figura 4).

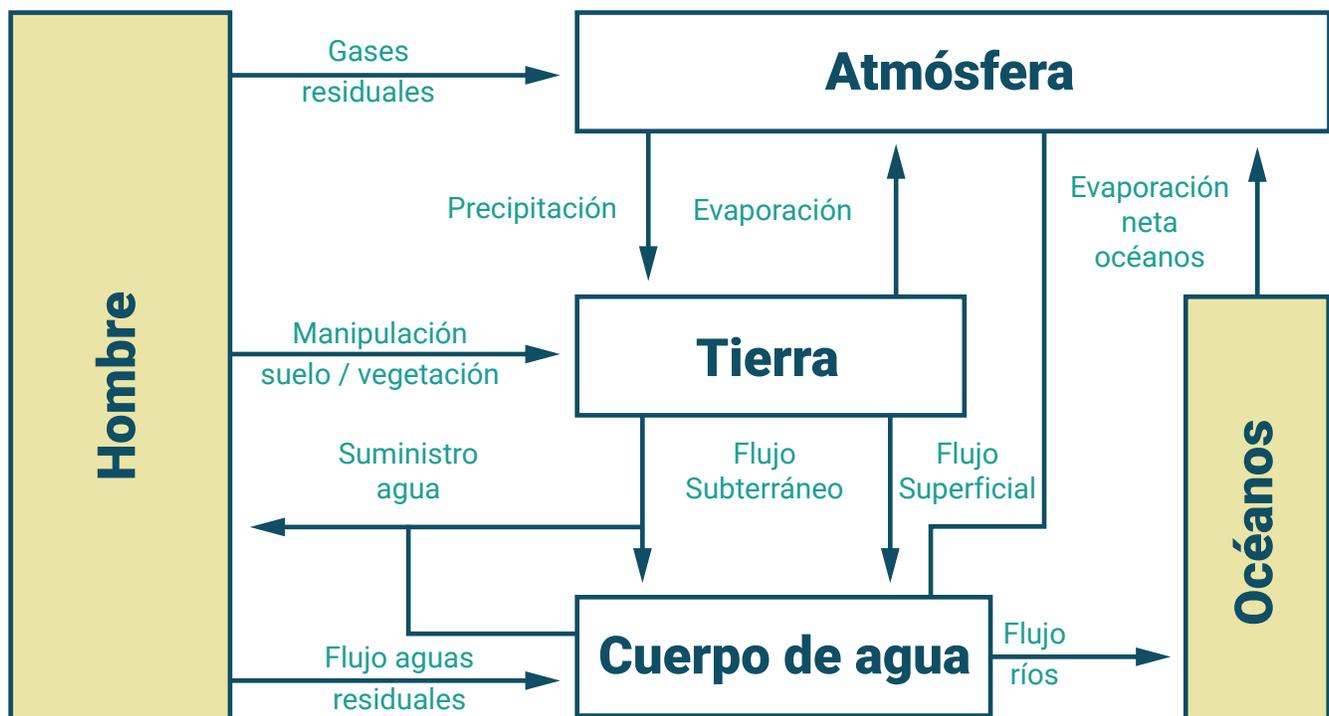
Para cada uno de los ecosistemas lóticos se construyó un modelo hidrológico, y para cada uno de los ecosistemas lénticos, un modelo trófico y uno hidrodinámico. Finalmente, para cada una de las ventanas se elaboró un modelo socioeconómico.



**Figura 4.** Localización ventanas de trabajo PMEH.

### 3.2. Modelos: hidrológico, trófico, hidrodinámico y social

En el esquema básico del ciclo hidrológico (Chow et al., 1994), el agua fluye a través de los mares, pasando por la atmosfera, precipitándose a la tierra, escurriendo en la superficie (almacenándose en algunos casos), y termina fluyendo de nuevo a la atmosfera, a los mares o infiltrándose en el suelo, como esquemáticamente se muestra en la Figura 5. Sin embargo, esta representación ignora la influencia e interacciones que pueden llegar a tener sustancias químicas, la biota y la humanidad, sobre el ciclo hidrológico. Las extracciones para industria y, sobre todo, para irrigación, alteran en gran medida el ciclo hidrológico, por lo que hay que incluirlas en el modelo conceptual del sistema ecohidrológico a trabajar. La falta de información sobre el consumo de agua de estas extracciones hace que su implementación no sea sencilla.



**Figura 5.** Alteraciones e interacciones en el ciclo hidrológico (Cañón PME, 2021).

Para las tres ventanas de análisis del proyecto se cuantificó la cantidad de agua que llega a las regiones, mediante una modelación en la que los flujos de agua y nutrientes dependen de la hidrodinámica del agua. Esta, en su paso por la superficie y la subsuperficie, arrastra sedimentos y nutrientes que se transportan principalmente siguiendo la red de drenaje. Los ciclos con mayor masa circulada y que se consideran más relevantes son: parte del ciclo del agua, el del carbono, el nitrógeno, el fósforo y el del oxígeno.

Estas sustancias transportadas son depositadas y aprovechadas por organismos de diversos tamaños, que las retornan, en muchos casos transformadas, para que sean nuevamente trasladadas o usadas por otros organismos.

Para los objetivos del PME, los ciclos del nitrógeno, fósforo y carbono son bastante importantes, ya que influyen sobre la disponibilidad de nutrientes para la biota. Su acumulación excesiva o escasez puede traer consecuencias sobre la biodiversidad. En ese sentido, es fundamental incluir su conceptualización, estudio de sus flujos y concentraciones, en los modelos conceptuales de las ventanas de trabajo estudiadas.

Pueden ser estimadas a nivel de cuenca y transportadas hasta ciertos puntos de concentración ubicados en la red de drenaje, por ejemplo, puntos de almacenamiento como ciénagas. De esta manera, y debido a la complejidad de estas interacciones, se conceptualiza una modelación hidrodinámica, biótica, hidrológica e inclusive social, porque los flujos del agua no se conciben sin la participación del hombre.

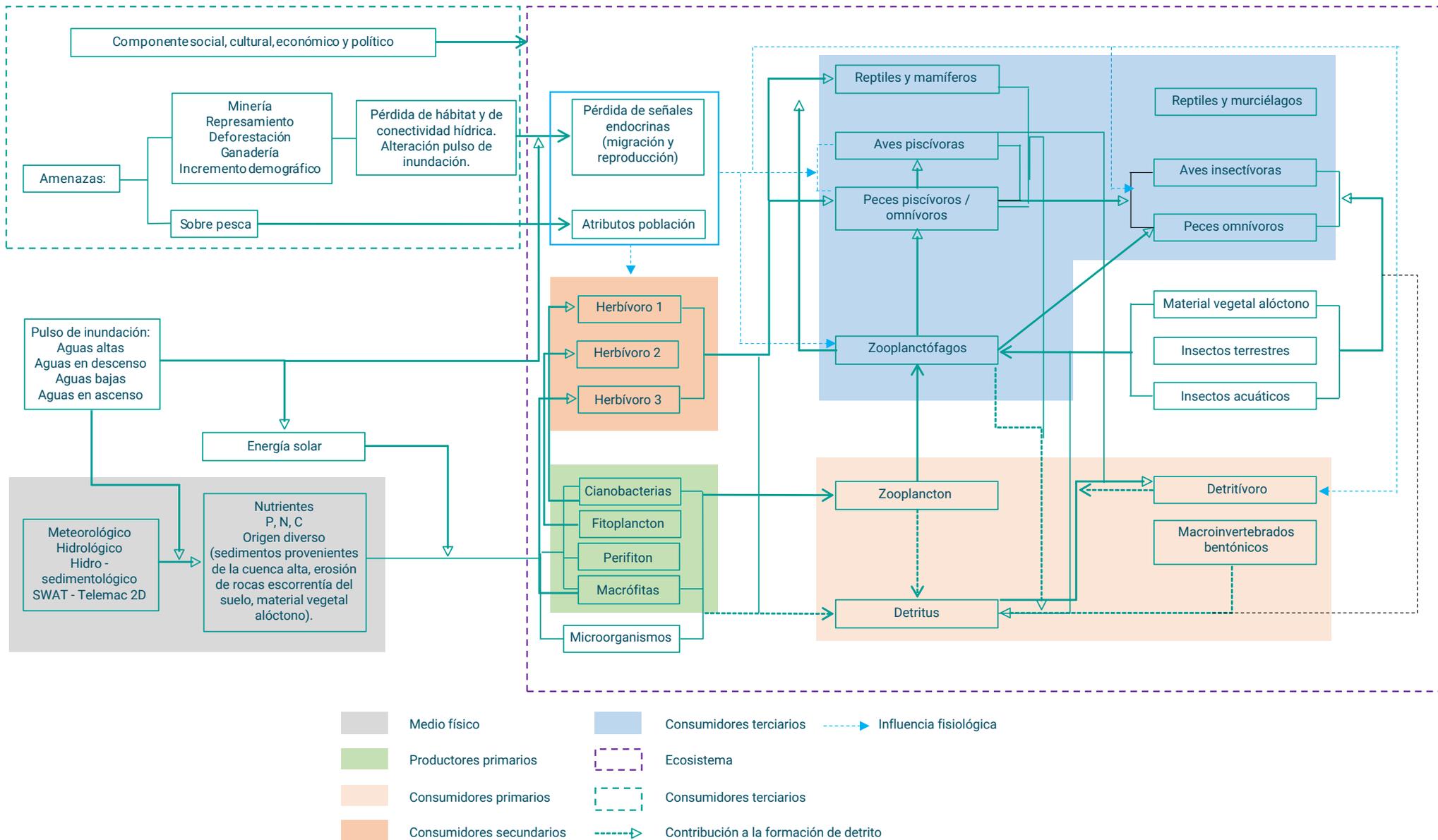
### 3.2.1. Especificidades del modelo conceptual trófico

Los modelos ecológicos son una herramienta de análisis, por cuanto realizan interpretaciones de los ecosistemas. A pesar de ciertos inconvenientes asociados a su implementación, como limitaciones en la disponibilidad de datos o la imposibilidad de predecir eventualidades ambientales, permiten predecir escenarios o formular respuestas frente a alteraciones ambientales (naturales o por el efecto de la actividad antrópica), de manera que se puedan proponer políticas de manejo eficientes. Teniendo en cuenta la rápida transformación actual de los ambientes naturales, los modelos permiten estimar el grado de amenaza que sufren la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Existen dos grandes ventajas en la modelación asociadas a la capacidad de predecir cambios en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: una, el resultado de las fluctuaciones de aspectos ambientales y socioeconómicos; otra, la evaluación de múltiples escalas espaciales y temporales que facilitan analizar fenómenos de cambio climático (Angelini y Gomes, 2005; Jacomina *et al.*, 2016).

Comprender el modelo conceptual que explique el funcionamiento de las ciénagas parte del concepto del pulso de inundación: fenómeno estacional de alternancia entre periodos secos y de inundación, que genera condiciones ambientales particulares. Durante la inundación ocurren dos procesos importantes: i) el flujo lateral del agua transporta nutrientes y materia orgánica que fertilizan el suelo de la planicie y ii) los cuerpos de agua de la planicie se conectan temporalmente, favoreciendo la dispersión de organismos. El periodo de sequía, por el contrario, se caracteriza porque los cuerpos de agua se desconectan y los organismos quedan confinados a lugares con condiciones ambientales más rigurosas. Una de las principales características de este fenómeno es el hecho de que la alternancia entre periodos de inundación (flujo lateral) y sequía (flujo vertical que favorece la resuspensión de sedimentos), moldean la fauna y la flora que habita el sistema, influenciando directamente su reproducción y alimentación (Álvarez, 2007; Ardila y Ardila, 2007; Galvis *et al.*, 2007). El pulso de inundación también influye en la productividad primaria (Álvarez, 2007; Cortés-Castillo y Rangel, 2007), ya que, debido a la variación en las condiciones fisicoquímicas del agua, se altera la tasa fotosintética de los productores primarios. Asimismo, hay cambios en la tasa de producción y acumulación de detritos, lo cual afecta la ruta de entrada de nutrientes a renglones superiores de la cadena trófica (Galvis *et al.*, 2007).

Por otra parte, es importante relacionar los componentes fisicoquímicos y biológicos que la integran, junto con los efectos causados por el hombre, quien ejerce presión sobre dichos componentes. Ocurren cuatro eventos clave del ciclo hidrológico cada año (aguas en ascenso, aguas altas, aguas en descenso, aguas bajas), donde se observan fuertes cambios, tanto en la composición de la calidad del agua, como las comunidades hidrobiológicas.

Para el desarrollo de la modelación ecotrófica en Ecopath, el modelo conceptual formulado establece las principales asociaciones entre diferentes organismos que habitan los ecosistemas de estudio, así como sus interacciones con el medio natural. Se divide en tres componentes principales: el primero de ellos el componente abiótico, relacionado con variables ambientales y climáticas, como la radiación solar, el efecto del pulso de inundación y la entrada de nutrientes al sistema; el segundo está relacionado con las actividades antrópicas y las amenazas derivadas de su realización; el tercero, el componente biótico, reúne los grupos funcionales considerados en el modelo. La Figura 6 reúne conceptualmente todo lo descrito.



**Figura 6.** Modelo conceptual modelación (Gutiérrez PME, 2020).

Dados los flujos identificados en la conceptualización (modelo conceptual), se identificó y seleccionó el software adecuado para el desarrollo de cada uno de los modelos (en el numeral 4 de este documento se pueden consultar en detalle):

- Modelación hidrológica de los tres cuerpos lóticos: *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT).
- Modelación hidrodinámica de los dos cuerpos lénticos: *Open Telemac-Mascaret* (Hervouet y Haren, 1994).
- Modelación ecotrófica de los dos cuerpos lénticos: *Ecopath-Ecosim*.

### 3.3. Modelación social: dinámica de sistemas

#### 3.3.1. Conceptualización social y cultural del área de cada ventana de estudio

La conceptualización parte del enfoque socioecológico, el cual tiene como objeto de estudio los Sistemas Socioecológicos (SSE) presentes en las áreas del PMEH. El sistema social, económico y cultural de la ciénaga de Zapatosa, ciénaga de Ayapel y cuenca del río La Vieja está compuesto por subsistemas, definidos por marcos de análisis seleccionados a partir de la aplicación de tres criterios clave en el proyecto: gobernanza y gobernabilidad, toma de decisiones e interacción entre sistema ecológico y social; y del enfoque socioecológico. Estos subsistemas que interactúan entre sí, son: a) Gobernanza y gobernabilidad, b) Activos de la población y c) Servicios ecosistémicos (Figura 7).



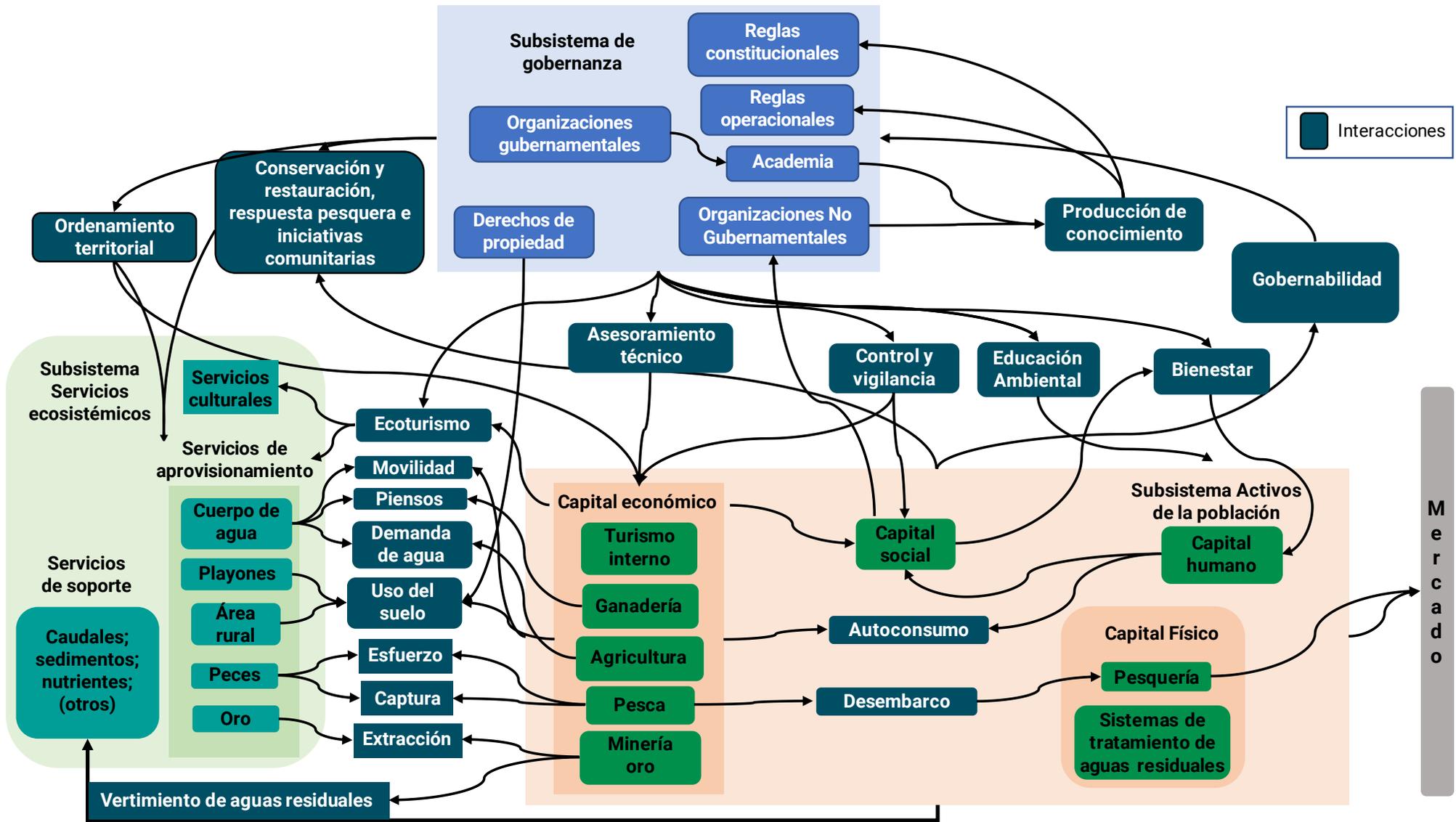
**Figura 7.** Subsistemas para el análisis de los Sistemas Socioecológicos (Reina PME, 2021).

Siguiendo a Whittingham (2011), la **gobernanza** son “las interacciones entre los distintos actores políticos, y sus intereses, ... reflejando la calidad de un régimen político, e impactando la calidad de vida del sistema como un todo y de los individuos que lo conforman” (p. 219-223). La gobernabilidad se refiere “a la capacidad del gobierno para cumplir sus funciones, para ejercer su autoridad y controlar las acciones de sus gobernados.”

El subsistema **Activos de la población** son los capitales que la población tiene para mejorar su calidad de vida. Término proveniente de la teoría de los medios de vida, al mejorar los recursos sociales, materiales y actividades económicas (capitales) de una población (ya sea por autogestión o por la acción del gobierno). La población “soporta tensiones y choques y se recupera de ellos, mantiene y mejora sus posibilidades y activos, sin dañar los recursos naturales existentes” (DFID, 1999). Los capitales son cinco: a) humano, b) social, c) económico, d) físico y e) natural.

El subsistema de **Servicios ecosistémicos** representa “los beneficios que obtienen los humanos de los ecosistemas que soportan directa o indirectamente su supervivencia y calidad de vida” (Díaz, *et al.*, 2011). Se proponen cuatro tipos de servicios: a) de soporte, b) de aprovisionamiento, c) de regulación y d) culturales (Camacho y Ruiz, 2011).

La conceptualización produjo un gráfico de flujos y dependencias entre variables, que representa la dinámica del SSE, e identifica interacciones. Según la teoría de Ostrom (2009), estas suceden en variables que representan el estado del SSE y su transformación en el tiempo. Incluyen los índices sociales pertinentes identificados de las variables a integrar al modelamiento computacional, diferentes para cada socioecosistema. Solo se muestra el modelo de la ventana Río San Jorge-ciénaga de Ayapel, figura 8.



**Figura 8.** Diagrama de la conceptualización del sistema socioecológico de la ciénaga de Ayapel para el PMEH. Con servicios de aprovisionamiento, de soporte y culturales. (Reina PMEH, 2020).

## 4. Metodología y desarrollo de la modelación

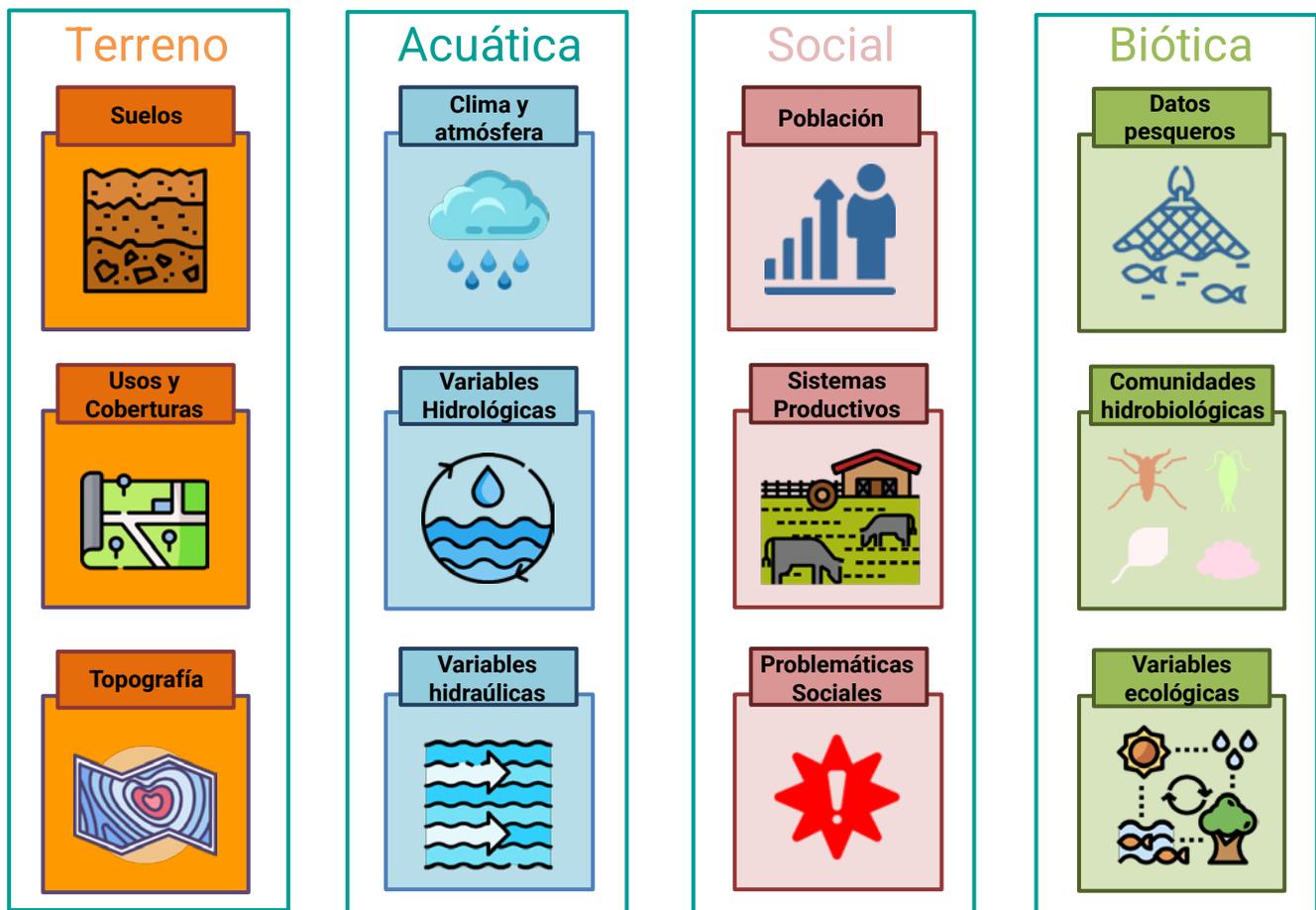


Planeación de actividades en articulación con la comunidad de la ciénaga de Zapato. Tamalameque, Cesar, junio de 2019.

El proyecto contempla el estudio de las dinámicas y tendencias (años 2030, 2040, 2050, 2100) de los servicios ecosistémicos de las áreas seleccionadas a partir de la caracterización y modelación ecohidrológica. Se requiere tener una visión de futuro de los servicios ecosistémicos, lo cual, a su vez, establece la necesidad de construir y calibrar herramientas de modelación matemático/computacional.

Como ya se indicó en el numeral 2 se establecieron cinco etapas que hacen parte del esquema general para el abordaje de la modelación ecohidrológica (Figura 3). A continuación, se describen las actividades relevantes en cada fase, para cada ventana de análisis. Se advierte que la metodología se ajustó para cada uno de los sitios, de acuerdo con la información existente y sus características específicas.

Por las complejidades que se puedan dar en cada ventana de trabajo, el software seleccionado, debe poderse modificar. Los insumos utilizados para los modelos se muestran en la Figura 9 y fueron obtenidos y procesados por el equipo del PME.



**Figura 9.** Insumos para la modelación PMEH (Peña, 2022).

De acuerdo con los objetivos de corte ecohidrológico, se plantea que los modelos a seguir consideren las dinámicas hídricas, a partir de modelos hidrodinámicos que incluyan sedimentos, calidad y transporte, así como la dinámica biótica y el estudio de las redes tróficas.

En Colombia se han tenido exitosas experiencias en modelación de cada uno de estos componentes por separado, pero el acople de este tipo de modelos es el reto de modelación.

La modelación implementada es de enfoque positivista con base físicobiológica y química (primera generación de modelos). Los pasos y descriptores involucrados se contextualizan para los tres hidrosistemas seleccionados en la cuenca Magdalena-Cauca y se enmarcan en el protocolo establecido por el Ideam. Se encuentran incorporados y resultan coherentes con la metodología de los cuatro pasos para la implementación de los principios de la ecohidrología en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y el desarrollo de soluciones para los hidrosistemas, que no solo aplica a socioecosistemas tipo cuenca hidrográfica, sino también a humedales y otros ecosistemas acuícolas.

## 4.1. Campañas de muestreo PMEH

El objetivo del muestreo fue compilar datos que permitan responder las preguntas de manejo del ecosistema y sobre el estado de afectación del mismo, a través de los modelos ecohidrológicos, que sean concluyentes de la salud de los ecosistemas y que faciliten análisis robustos, definición de rutas de uso y conservación, y alimentar los modelos.

En el numeral 3, se explicó que la ventana Ciénaga de Zapatosa fue objeto de la recolección de información primaria (muestreos en campo), proceso cuyos resultados completos, desde su planeación, hasta el análisis integral de resultados, se pueden consultar en el documento *Análisis integral de resultados muestreos Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH) en Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ)* que contiene las explicaciones detalladas de procedimientos de recolección y análisis. Consulta el documento en el siguiente link:



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

### 4.1.1. Generalidades

Se llevó a cabo un monitoreo en función de las variaciones del ciclo hidrológico de la ciénaga de Zapatosa, mediante tres campañas de muestreo que cubrieran las condiciones de aguas en ascenso, aguas en descenso, aguas altas y aguas bajas, en las que, además, se caracterizaron las comunidades hidrobiológicas (fitoplancton, zooplancton, perifiton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos, macroinvertebrados asociados a macrófitas, ictiofauna e ictioplancton), la calidad del agua (iones, cationes principales y algunos metales y pesticidas) y los biogeoelementos (nitrógeno, carbono y fósforo) en matrices de tejido animal, vegetal y sedimentos, de tal forma que se contara con datos de entrada para el balance de estos elementos en la modelación. La Tabla 3 muestra los parámetros que se muestrearon y analizaron.

El periodo de muestreo para cada una de estas condiciones se determinó con base en la serie histórica de niveles mensuales multianuales de la estación Belén, ubicada dentro de la ciénaga de Zapatosa, con una serie de más de veinte años. Con esta información se identificó que noviembre es cuando se presentan los niveles más altos en la ciénaga, y febrero-marzo, los más bajos. Los niveles tienen un comportamiento bimodal: a finales de mayo e inicios de junio se incrementan (etapa de transición); en septiembre, disminuyen.

**Tabla 3.** Resumen parámetros muestreados y analizados PME (2020).

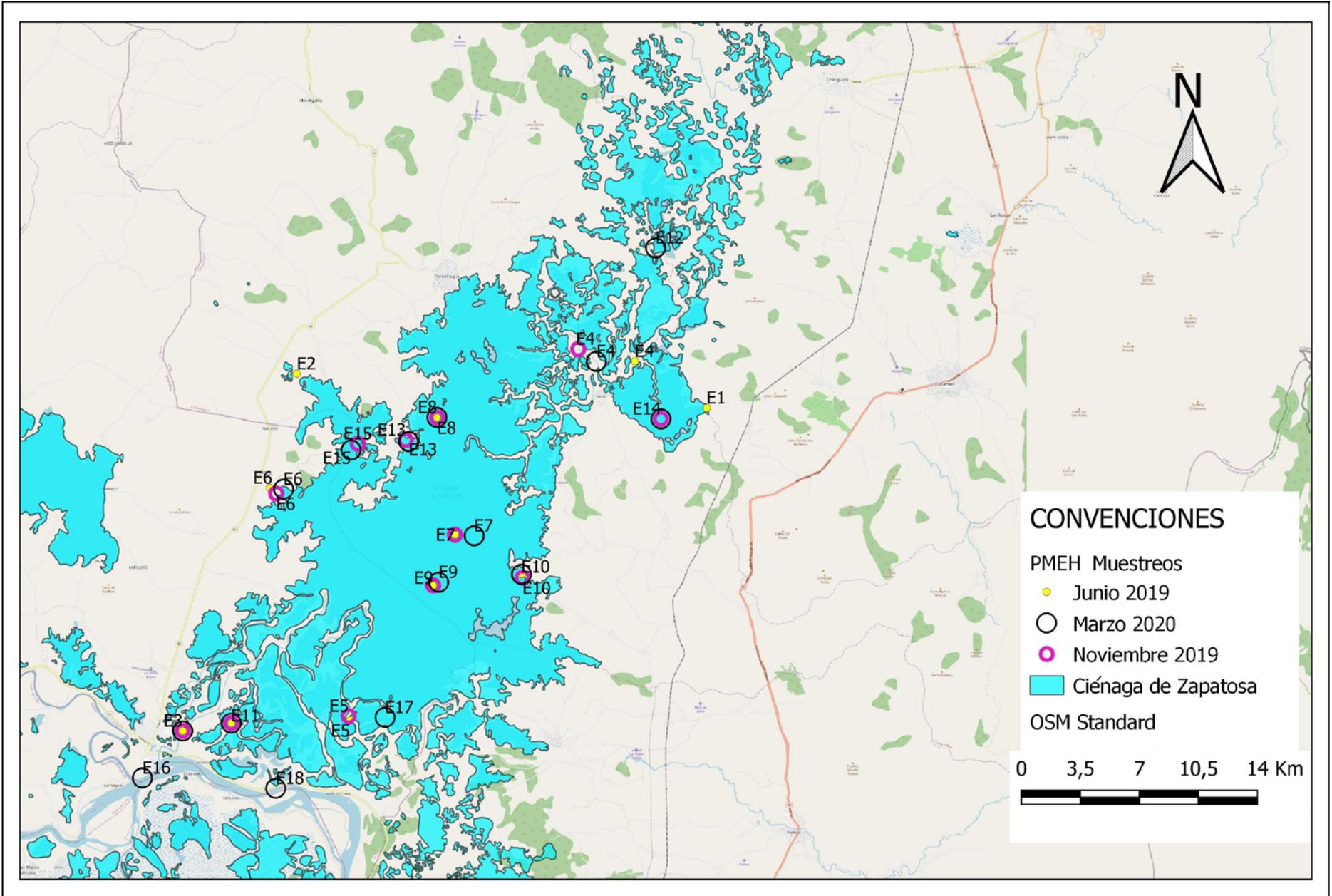
Hidrobiología	Biogeoelementos	Físicas	Calidad de agua
<ul style="list-style-type: none"> <li>Productividad Primaria.</li> <li>Clorofila.</li> <li>Fitoplancton.</li> <li>Zooplancton.</li> <li>Perifiton.</li> <li>Macroinvertebrados asociados a fondos blandos.</li> <li>Macroinvertebrados asociados a Macrófitas.</li> <li>Ictioplancton.</li> <li>Fauna íctica.</li> <li>Macrófitas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>N, C, P en sedimentos.</li> <li>N, C, P en tejido animal.</li> <li>N, C, P en tejido vegetal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profundidad.</li> <li>Velocidad.</li> <li>Caudal.</li> <li>Sedimentos en suspensión.</li> <li>Sedimentos de fondo.</li> <li>Distribución tamaño de grano (Granulométricas).</li> </ul>	<p>Parámetros <i>in situ</i> (pH, Temperatura del agua, turbiedad, sólidos totales disueltos, conductividad, iones principales y sales).</p> <p>Microbiológicos (e-coli, DBO, DQO, oxígeno disuelto), metales, metales pesados, pesticidas organofosforados y organoclorados.</p>

## 4.1.2. Toma de muestras

En la Figura 10 se señalan los sitios de muestreo donde el PME estudió las comunidades hidrobiológicas (fitoplancton, zooplancton, perifiton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos, y a macrófitas, ictiofauna e ictioplancton), caudales, batimetrías, calidad de agua y sedimentos y biogeoelementos en diversas matrices (tejido animal, vegetal y sedimentos).

- La primera campaña de muestreo del PME se realizó del 16 al 30 de junio de 2019. Periodo de transición lluvias-seco (aguas en descenso), luego de que la ciénaga recibe aguas de los ríos Magdalena y Cesar. Se colectaron en total once muestras.
- La segunda campaña de muestreo del PME se realizó del 7 al 13 de noviembre de 2019, periodo de niveles máximos (aguas altas). Se colectaron en total doce muestras.
- La tercera campaña se realizó del 3 al 14 de marzo de 2020 durante el período de estiaje de la ciénaga (aguas bajas). Se colectaron en total quince muestras.

Para cada uno de los parámetros se estableció un protocolo que garantice el adecuado manejo en cada etapa del muestreo y análisis (Tabla 4). Como parte del fortalecimiento del Ideam, se propusieron instructivos de colecta, manejo, preservación y análisis de muestras.



**Figura 10.** Sitios de muestreo ciénaga de Zapatos y distribución por campañas (PMEH 2020).

**Tabla 4.** Instructivos Ideam utilizados PMEHE (2020).

Instructivo para colecta y manejo	Instructivo para colecta, manejo y análisis
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras de macrófitas.</li> <li>• Muestras de sedimento para N, C, P.</li> <li>• Muestras de tejido vegetal para N, C, P</li> <li>• Muestras de tejido animal -peces para N, C, P.</li> <li>• Productividad primaria–ensayo en campo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras y resultados de muestras de peces.</li> <li>• Muestras de clorofila en agua.</li> <li>• Muestras y resultados de muestras de macroinvertebrados bénticos y asociados a macrófitas.</li> <li>• Muestras y resultados de zooplancton</li> <li>• Muestras y resultados de fitoplancton.</li> <li>• Muestras y resultados de perifiton.</li> <li>• Muestras y resultados de ictioplancton.</li> <li>• Muestras de vegetación inundable.</li> </ul>

Las batimetrías complementarias a las ya existentes tomadas por el Ideam se realizaron con una Ecosonda Garmin (Echomap PLUS 40/60/70/90 series), por el equipo PMEHE.

A través de una sonda multiparamétrica Hidrolab 7 se realizaron mediciones de profundidad, pH, clorofila, turbidez, conductividad, temperatura del agua, para diversos puntos de la ciénaga, durante las tres campañas de muestreo. Igualmente se muestreó *in situ*, con el laboratorio móvil de colorimetría de Merck, en diversos sitios de la ciénaga, parámetros, como pH, amoníaco, nitratos, nitritos, oxígeno, entre otros.

### 4.1.3. Análisis de laboratorio y posproceso en oficina

Se emplearon metodologías de análisis bajo procedimientos establecidos por el Laboratorio de Calidad Ambiental del Ideam para las muestras tomadas de parámetros de calidad de agua y de las comunidades hidrobiológicas, descritas en la Tabla 4, arriba presentada.

Estos protocolos fueron utilizados por el equipo de profesionales del PMEHE en las instalaciones y con los equipos del laboratorio del Ideam, para analizar el material colectado hidrobiológico, microbiológico, de biogeoelementos, en las tres campañas.

Las muestras de calidad de agua las analizó el personal del Laboratorio de Calidad del Ideam; así como de la toma de muestras de sedimentos y su respectivo análisis de granulometrías, concentración y transporte e interpretación de las mediciones de velocidad y caudales, realizadas con el equipo ADCP y por el personal especializado del Ideam, como las verificaciones topobatimétricas complementarias.

Los datos obtenidos de los parámetros de calidad del agua y de las comunidades hidrobiológicas fueron analizados y sometidos a pruebas estadísticas para encontrar correlaciones entre los componentes abióticos y bióticos.

## 4.2. Modelación trófica ciénagas Zapatosa y Ayapel, Ecopath-Ecosim-EWE

Los documentos con el desarrollo detallado de la modelación y toda la información procesada y disponible para cada una de las dos ventanas de análisis se pueden consultar en los siguientes enlaces:



Para mayor información descarga los documentos adjuntos. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

La herramienta seleccionada para la modelación de las dos ciénagas es el modelo Ecopath con Ecosim (EWE), que permite el uso de información obtenida empíricamente o de la literatura. Este modelo ya se implementó en la ciénaga de Ayapel (Marín, 2012).

### 4.2.1. Objetivos

- Aportar una línea de base para el manejo de los ecosistemas.
- Contribuir al conocimiento de las dinámicas ecológicas de las ciénagas de Zapatosa y Ayapel y su relación con el medio físico y sociocultural, con miras al establecimiento de políticas de manejo y conservación en el marco de la sostenibilidad.
- Analizar cómo cambian las dinámicas ecológicas dentro del ecosistema en función del ciclo hidrológico, y establecer el ensamblaje de las comunidades hidrobiológicas, a través de las interacciones tróficas y los flujos de materia y energía entre los diferentes grupos funcionales que conforman cada sistema.

## 4.2.2. Grupos funcionales

La Tabla 5 describe el proceso de análisis.

**Tabla 5.** Análisis grupos funcionales Ciénagas Zapatosa y Ayapel, modelación trófica.

Ventana de trabajo	Grupos funcionales
<p><b>Ciénaga de Zapatosa</b> Información proveniente de los muestreos de las tres campañas.</p>	<p>Se conformaron 40 grupos funcionales: 1 grupo de detritus, 3 de productores primarios (fitoplancton, perifiton y macrófitas) y 36 consumidores. Este grupo el más amplio y diverso, incluye organismos microscópicos como el zooplancton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos y a colchones de macrófitas, y consumidores de mayor rango, como diferentes especies de peces. En este caso, algunos grupos funcionales están conformados por una sola especie, y otros, por conjuntos de especies que comparten el mismo hábito trófico. El criterio utilizado para asignar una especie a un grupo funcional único: que su biomasa no sea muy baja o sea de importancia pesquera. Por su efecto ecológico en la comunidad nativa, las especies introducidas se consideraron aparte, independiente de su biomasa e importancia pesquera.</p>
<p><b>Ciénaga de Ayapel</b> Información tomada de bibliografía.</p>	<p>Extraídos del trabajo de tesis doctoral de Marín (2012); del plan de manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel (2007); del Sepec (Servicio Estadístico Pesquero Colombiano) (2013 – 2019); datos de desembarcos y estaciones ubicadas dentro del complejo cenagoso o relacionadas.</p> <p>Por el objetivo planteado con el modelo, los grupos funcionales de los productores y consumidores, no peces, incluyeron todas sus especies. Los 45 grupos de consumidores peces están a nivel de especie, pues se quiere establecer la importancia de estos organismos para la sostenibilidad de la red alimentaria en el ecosistema y su importancia pesquera en la región.</p>

## 4.2.3. Características generales de los modelos ecotróficos con Ecopath

### 4.2.3.1. Complejo cenagoso de Zapatosa

Se implementaron cuatro modelos utilizando los datos del proyecto GEF Magdalena- Cauca- Vive, recolectados en las campañas 1 (junio 2019), 2 (noviembre del 2019) y 3 (marzo de 2020), correspondientes a época de niveles en ascenso, niveles altos y niveles bajos, respectivamente. Se seleccionaron nueve sectores de muestreo comunes a las tres campañas, para estandarizar la información; uno para cada campaña (3), en los cuales se tuvieron en cuenta las condiciones ambientales y bióticas particulares de cada época y un cuarto modelo que reflejó las condiciones medias de junio y noviembre de 2019, y marzo de 2020, en las cuales se recogieron las características del medio físico, área de la ciénaga, profundidades totales y de la zona eufótica, así como para los cálculos de densidad de los grupos hidrobiológicos.

#### *Escala espacial*

Se tomaron nueve estaciones con diferentes tipos de ambientes presentes dentro de la ciénaga: tres ambientes lénticos, tres lóticos y tres de aguas abiertas, mantenidas durante la ejecución del PMEH (Tabla 6, Figura 10).

**Tabla 6.** Sectores de muestreo seleccionados para la modelación ecotrófica del Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) (PMEH, 2021)

Sector de muestreo	Sigla	Coordenadas	Agua abierta	Litoral	Lóticos
Río Cesar aguas abajo CCZ	E3	9,01263889 N/ -73,9549722 W			X
Río Cesar aguas arriba CCZ	E4	9,21177778 N/ -73,7111389 W			X
Caño Patón	E5	9,01836111 N/ -73,8648056 W			X
Occidental sector Candelaria	E6	9,14347222 N/ -73,9079722		X	
Occidental sector Sempegua	E7	9,11830556 N/ -73,8081944 W	X		
Influencia Cesar	E8	9,18147222 N/ -73,8178889 W	X		
Oriental sector caño Cañagunal	E9	9,09097222 N/ -73,8199167 W	X		
Oriental sector Último Caso	E10	9,09702778 N/ -73,7722778 W		X	
Influencia Magdalena	E11	9,01680556 N/ -73,9288056 W		X	

## 4.2.3.2. Complejo cenagoso de Ayapel

Se construyeron cinco modelos ecotróficos finales en Ecopath, correspondientes a cada periodo hidrológico que ocurre en el complejo cenagoso de Ayapel, descritos en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Modelos ecotróficos construidos en ciénaga de Ayapel (Poloche PME, 2021).

Temporada	Descripción
<b>Aguas bajas</b>	Información de enero, febrero y marzo, meses de mínimos niveles de agua en la ciénaga.
<b>Aguas en ascenso</b>	Los meses considerados fueron abril, mayo y junio, cuando ocurre el llenado de la ciénaga, por las primeras precipitaciones que ocurren en la región.
<b>Aguas en transición y altas</b>	Se utilizó la información de julio, agosto, septiembre y octubre, que presentan las mayores precipitaciones durante todo el ciclo hidrológico.
<b>Aguas en descenso</b>	Se consideraron noviembre y diciembre, cuando se presenta el vaciado de la ciénaga.
<b>Condiciones medias</b>	Corresponde al promedio obtenido de cada variable de entrada de los cuatro modelos de cada período hidrológico (aguas bajas, aguas en ascenso, aguas altas, aguas en descenso).

## 4.2.4. Parametrización y matrices de entrada

**Tabla 8.** Parametrización y matrices de entradas modelos tróficos.

Ventana de trabajo	Parametrización y matrices de entrada modelo trófico Ecopath.
<b>Complejo cenagoso de Zapatosa</b> <b>Biomásas</b>	A partir de las muestras obtenidas en campo se cuantificaron las biomásas de las 7 comunidades hidrobiológicas ya mencionadas, considerando las particularidades metodológicas de cada una de ellas, obteniendo un valor de biomasa en t/km <sup>2</sup> para cada estación, en cada campaña y que fueron usados como insumo de los 4 modelos ecotróficos.
<b>Complejo cenagoso de Zapatosa</b> <b>Matriz de dieta</b>	A partir del análisis de las muestras de peces logradas en las 3 campañas de campo, se obtuvieron las matrices de dietas para las diversas especies de peces capturados, considerando las particularidades metodológicas determinadas para este análisis y que fueron usados como insumo de los 4 modelos ecotróficos.
<b>Ciénaga de Ayapel</b> <b>Biomásas</b>	Se conformaron y modelaron 56 grupos funcionales, distribuidos en 11 grupos no peces y 45 grupos de peces, donde se incluyen 7 especies ícticas adicionales, que fueron capturadas y reportadas por la CVS. Otros grupos funcionales fueron reportados por el Sepec en años recientes (2015 – 2020). De información de Marín se desagregaron algunos, por conseguir información de sus biomásas para periodos hidrológicos y por su importancia económica en la región.
<b>Ciénaga de Ayapel</b> <b>Matriz de dieta</b>	Apoyada en bibliografía especializada en ecología de las especies ícticas modeladas. La matriz de dietas elaborada se incluye para cada periodo hidrológico, a fin de ser ajustada según los requerimientos y calibración del modelo. Otros casos utilizaron los análisis de contenidos estomacales de peces capturados en el complejo cenagoso de Zapatosa, para conocer la proporción de las presas para un grupo funcional determinado.

### 4.2.5. Matriz de extracción por pesca ciénagas de Zapatosa y Ayapel

Contiene información detallada de tipo de puerto, embarcación, arte de pesca, composición de la pesca, entre otros, y corresponde a la biomasa de peces capturada por los artes de pesca en un lugar y un tiempo determinado. Los valores utilizados son los del censo pesquero de los sitios de desembarco monitoreados por el Sepec y de las zonas de pesca artesanal de cada una de las dos ciénagas, año 2019, por ser el de información más completo.

Se calculó la cantidad de días efectivos de pesca, la actividad diaria, el censo pesquero, la captura y el esfuerzo de pesca, el valor de la pesca efectiva en toneladas para cada especie, con cada una de las artes de pesca utilizada para cada ciénaga, y se extrapoló al área total, para obtener la biomasa ( $t/km^2$ ) capturada por especie y por arte de pesca para cada mes. Se utilizaron siete artes de pesca: red enmalle fija continental, red de enmalle de deriva continental, palangre calandrio, nasa, chinchorro continental, chinchorra y atarraya. Se realizaron las matrices de desembarcos, una para cada campaña o periodo hidrológico, y una matriz que reunió la información para todo el año, modelo de condiciones medias.

### 4.2.6. Configuración y parametrización Ecosim ciénagas de Zapatosa y Ayapel

Ecosim es la representación dinámica del tiempo de lo modelado en Ecopath. Incluye los impactos de la pesca y el efecto de las perturbaciones ambientales (Christensen y Walters, 2004, Akoglu *et al.*, 2015), requiere los datos de salida generados por Ecopath y las series de tiempo con información pesquera y de las condiciones ambientales relevantes en el funcionamiento del ecosistema. Se utilizó el modelo de condiciones medias simulado en Ecopath.

Con la inclusión de series de tiempo de diferentes variables se analizó el efecto en las biomásas de los grupos funcionales en escalas temporales, para cada ciénaga. Se utilizó la matriz de pesca del Sepec, explicada en el numeral anterior, para cada ciénaga. Incluyó número del registro de cada faena, sus fechas y horarios, el número de ejemplares y su peso por especie; se calculó la biomasa de cada especie, discriminando por arte de pesca, captura por mes y año, en unidades de captura por unidad de esfuerzo (CPUE).

### 4.2.7. Escenarios y simulaciones de la modelación trófica

Como esta modelación apoya la propuesta de políticas de manejo que promuevan el rendimiento pesquero a pesar de la extracción, se formularon siete escenarios que permitan implementar un uso sostenible de los recursos, sin comprometer la salud del ecosistema, para evaluar los posibles efectos generados por la implementación de acciones de manejo del ecosistema, relacionados, principalmente, con el uso de artes de pesca o la cantidad de biomasa extraída de determinadas especies. Se tuvo en cuenta la evaluación de la representatividad de las artes de pesca realizada durante el proceso de elaboración de las series de tiempo de extracción pesquera, así como la consideración de la pesca como bien

inmaterial, en el caso de la atarraya. Por lo anterior, se evaluó el efecto de la disminución de extracción por pesca de biomasa de cuatro especies emblemáticas de la región y de la cuenca en general por i) su importancia comercial, ii) sus características ecológicas, ya que todas ellas son de hábitos migratorios y requieren el acceso a diversos ambientes de la cuenca y iii) el grado de amenaza de cada una de ellas, así como de la regulación y disminución del uso de la red de enmalle fija en dichas especies.

Estos escenarios ilustran la respuesta de las redes tróficas en las ciénagas, frente al manejo pesquero y eventos ambientales extremos, permitiendo evaluar la respuesta de la biomasa de los grupos funcionales. También se adelantaron escenarios de evaluación de condiciones ambientales que analizaron el impacto de variables ambientales sobre la estructura de la red trófica. Para estas simulaciones fueron consideradas diferentes variables: niveles medios mensuales históricos del agua, profundidad, temperatura, series simuladas de la concentración total de sedimentos y concentración de nitrógeno y fósforo orgánicos.

Las tablas 9 y 10 muestran los escenarios simulados, por ciénaga. Algunos resultados se presentan en el numeral 5 de este documento.

**Tabla 9.** Escenarios simulados modelo trófico complejo cenagoso de Zapatosa.

Nombre del escenario: ciénaga de Zapatosa	Periodo	Descripción	Utilidad
<b>Modelos Ecopath -Ecosim</b>	2013 a 2019	Consiste en la simulación del ecosistema estático Ecopath y en tiempo Ecosim.	Herramienta de trabajo calibrada. Ecosistema caracterizado.
<b>Efecto de la temperatura y la profundidad en la estructura de la red trófica</b>	2014 - 2018	Incluyen series de tiempo de algunas variables físicas como la profundidad y la temperatura entre 2014 y 2018.	Incidencia de estas variables en la columna de agua, los procesos que se suceden y la respuesta de los grupos funcionales.
<b>Restricción total de la pesca</b>	2019 - 2034	Se configura Ecosim con la restricción total del uso de todas las artes de pesca en un horizonte de 15 años. En el año 0 y 1 el uso de las artes es igual a las condiciones medias estimadas para 2019. A partir del segundo año se restringe totalmente la captura de peces en el sistema y el uso de todas las artes de pesca; acción que se mantiene por 13 años.	Evaluar el efecto del uso de las artes de pesca sobre las biomásas de los grupos funcionales; y sobre la red trófica en general, que tienen los cambios en las biomásas, ocasionadas por la captura de peces con interés comercial. El impacto de no pescar se mide a través del cambio en la biomasa relativa de los grupos funcionales considerados en el modelo.
<b>Incremento del 100%, seguido de disminuciones graduales de uso de red de enmalle fijo</b>	2019 - 2034	En un horizonte de 15 años de cambio progresivo, que consiste en simular un incremento del uso de red de enmalle fijo, seguido de una disminución gradual a lo largo del periodo de modelación hasta su eliminación.	El efecto sobre las biomásas a lo largo del tiempo de implementación.

Nombre del escenario: ciénaga de Zapatos	Periodo	Descripción	Utilidad
<b>Incremento del 75% de uso de red de enmalle fijo y aparte incremento del 25% de uso de red de enmalle fijo</b>	2019 - 2034	La red de enmalle fijo es el arte de pesca más utilizado en la ciénaga. Se planteó un escenario horizonte de tiempo de 15 años. A partir del tercer año de modelación involucra un incremento en la intensidad de uso del 75% o del 25%, respecto a las condiciones originales, y permanecen constantes las intensidades de uso de los demás artes de pesca.	Evaluar el impacto de un incremento del 75% en la biomasa de los grupos funcionales y cuál es su tendencia de recuperación, de manera que se establezca qué tanto se podría incrementar el uso, sin que se vean perjuicios a largo plazo en las especies.
<b>Niveles medios históricos del agua</b>	2016-06-01 al 2018-12-31	Se utilizó una serie de tiempo de 45 años de valores históricos para el periodo comprendido entre los años 1972 y 2017. Se analizó independiente para productores primarios y luego el efecto indirecto sobre los demás grupos funcionales.	Conocer cómo el nivel del agua afecta a los diversos grupos funcionales de la ciénaga y cuál es la respuesta de ellos a estos cambios.
<b>Efecto de los sedimentos y nutrientes en la estructura de la red trófica</b>	2020 - 2055	Basada en una serie de tiempo simulada para 35 años, que mide la concentración de entrada de: sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos totales.	Medir el efecto sobre los grupos funcionales, con énfasis en los productores primarios, base de la cadena trófica, y cómo afecta el ecosistema.

**Tabla 10.** Escenarios simulados modelo trófico ciénaga de Ayapel.

<b>Nombre del escenario: ciénaga de Ayapel</b>	<b>Periodo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Utilidad</b>
<b>Modelos Ecopath -Ecosim</b>	2012 a 2019	Consiste en la simulación del ecosistema estático y en tiempo.	Herramienta de trabajo calibrada. Ecosistema caracterizado.
<b>Aumento de la actividad pesquera con redes de enmalle fija continental y de deriva continental por 1 y 10 años de esfuerzo pesquero</b>	2016-06-01 al 2031-12-31	Simulación de los grupos funcionales cuando aumenta la actividad pesquera de las redes de enmalle de deriva continental y de enmalle fija continental en 25%, 50%, 75% y 100%.	Ver cómo es la respuesta del sistema y sus grupos funcionales a la práctica pesquera a través del tiempo (15 años).
<b>Disminución de la actividad pesquera con redes de enmalle fija continental y de deriva continental, 1y 10 años de esfuerzo pesquero</b>	2016 -06-01 al 2031-12-31	Se plantearon escenarios en donde se observa la disminución de su uso en un 25, 50, 75 y 100% durante el lapso de un año intenso de esfuerzo pesquero y proyectado a 15 años de simulación.	Ver cómo es la respuesta del sistema y sus grupos funcionales a la práctica pesquera a través del tiempo (15 años).
<b>Aumento de la mortalidad por pesca de las especies ícticas de interés comercial, sencilla y al doble</b>	2016-06-01 al 2031-12-31	Escenarios de un año en donde aumenta la mortalidad pesquera al doble de las condiciones iniciales de cuatro especies comerciales.	Ver cómo es la respuesta del sistema y sus grupos funcionales.
<b>Eliminación artes de pesca simuladas (atarraya, palangre calandrio, redes de enmalle fija continental y de deriva continental), por 1 y 10 años de esfuerzo pesquero</b>	2016-06-01 al 2031-12-31	Se eliminan gradualmente las artes de pesca en el lapso de 10 años y se observa la respuesta del sistema a estos cambios: cuál es la que menos afecta la productividad.	Ver cómo es la respuesta del sistema y sus grupos funcionales.
<b>Variable forzante del nivel de agua en el complejo cenagoso de Ayapel</b>	2005 a 2019	Ingresa la serie de tiempo niveles de agua reportados estación de monitoreo de Beirut de la modelación hidrológica, proyectando un tiempo de simulación de 15 años.	Comportamiento grupos funcionales, condición ocurrida años 2010 a 2012, rompimiento en zonas Nuevo Mundo y San Anita.
<b>Variables fisicoquímicas forzantes de nitrógeno, fósforo, sedimentos y oxígeno disuelto en el complejo cenagoso de Ayapel</b>	2020 al 2050	Variables forzantes concentraciones de sedimentos, fósforo, nitrógeno orgánico y oxígeno disuelto. Datos de salida obtenidos del escenario de cambio climático RCP 4.5. Series de tiempo utilizadas en la simulación en Ecosim.	El comportamiento de los grupos funcionales bajo la condición forzante.

### 4.3. Modelación hidrológica SWAT

Se utilizó el modelo a escala de cuenca, espacialmente distribuido y semifísicamente basado SWAT (*Soil & Water Assessment Tool* por sus siglas en inglés) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la Universidad de Texas, que simula procesos como: cambios (clima, uso y coberturas, prácticas de manejo), cantidad y calidad de agua (nutrientes, sedimentos, pesticidas, bacterias (algas y oxígeno), entre otros (Unesco, 2012). Además, predice y evalúa los impactos del uso del suelo en la cuenca; simula la producción de agua y sedimentos, así como su calidad, según las actividades desarrolladas en una unidad hidrológica y calcula diferentes indicadores.

Al utilizar la ecuación del cálculo del balance hídrico, genera resultados de variables como precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, como de los cambios generados en la producción de caudal y sedimentos en la unidad hidrológica, que aportan a identificar subcuencas con potencialidad hídrica.

Utiliza datos diarios u horarios según disponibilidad; mejora el análisis de los resultados dividiendo la zona en subáreas; define zonas de características físicas, cobertura de tierra, suelo, pendiente y climatológicas homogéneas, HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica); útil si hay áreas desiguales afectadas por el uso del suelo que impacten la hidrología.

Determinadas las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas por el canal principal, las dirige a la corriente, usando una estructura semejante a la HYMO (William y Hann, 1972), que es la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico; hace el seguimiento del flujo en el canal y modela la transformación de sustancias químicas en la corriente.

Estima la producción de sedimentos, con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada Musle (Williams y Berndt, 1975) que combina la escorrentía, tipo de suelo, uso y cobertura, pendiente y prácticas de manejo agrícola; hace el enrutamiento de esta carga en función de la velocidad del flujo, con la ecuación de Bagnold (1977).

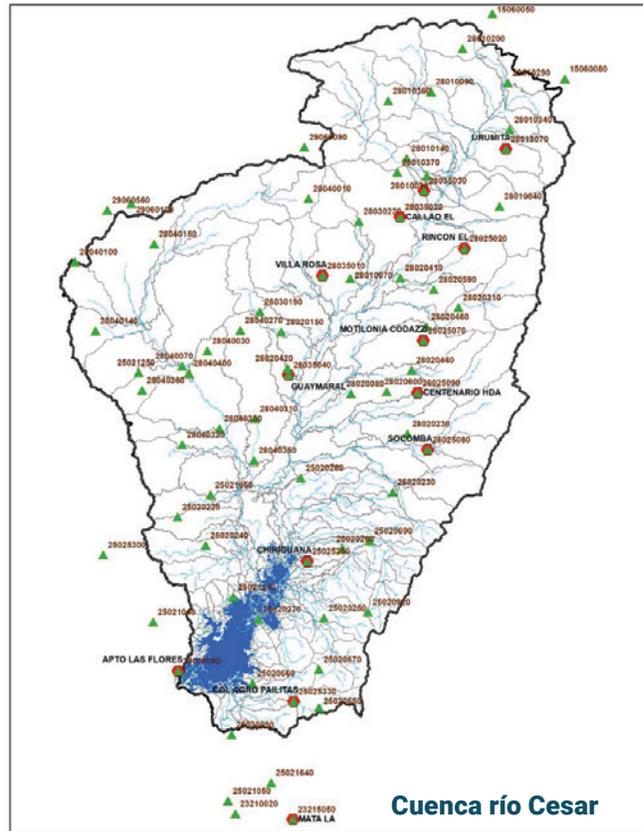
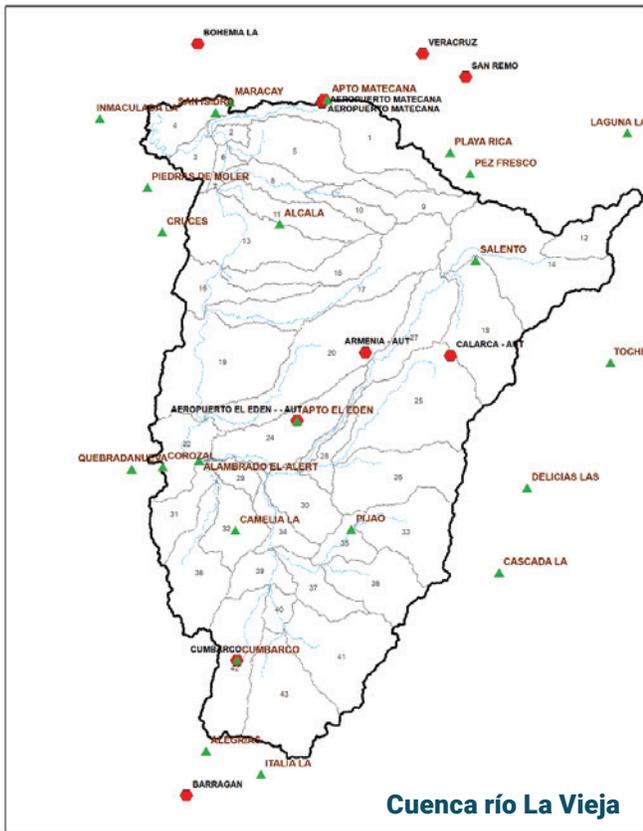
### 4.3.1. Calibración y refinamiento

En la Tabla 11 se describe el procedimiento utilizado para las tres ventanas.

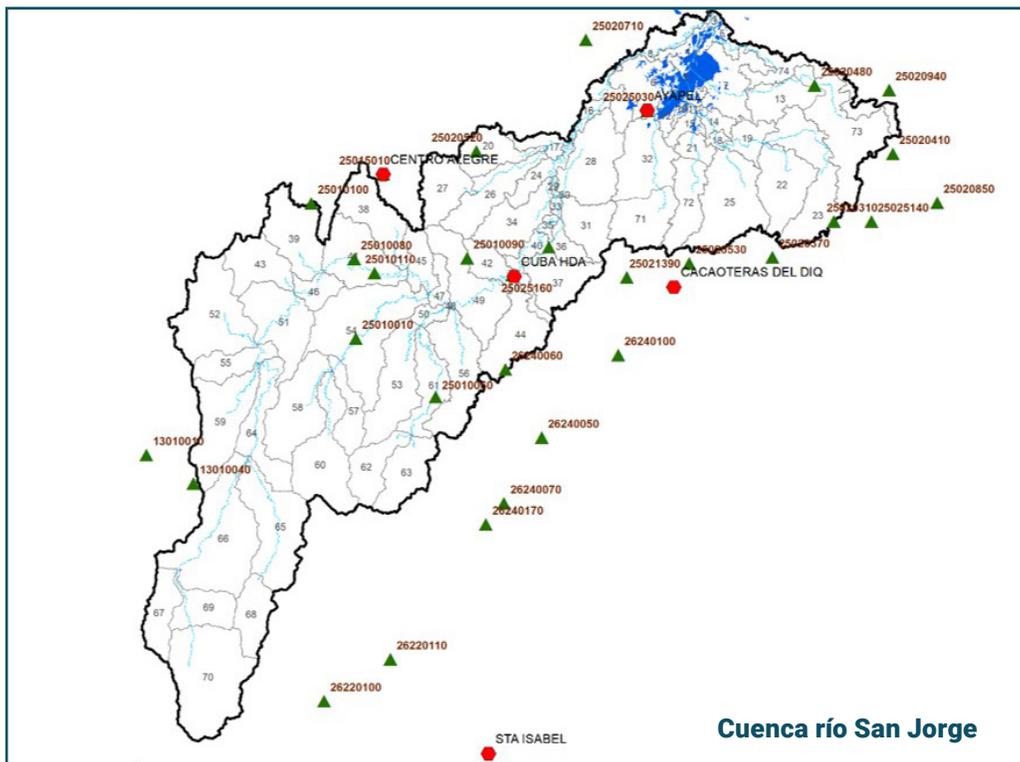
**Tabla 11.** Procedimiento calibración y refinamiento modelo hidrológico.

Ventana de trabajo	Modelo Hidrológico - Calibración y refinamiento
<p><b>Río Cesar</b> Calentamiento de 1985 – 1986, calibración de 1987-2002, validación de 2003-2018.</p>	<p>Por su extensión, se dividió en dos cuencas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rancho Claro, que cubre el sector alto y medio de la cuenca con 108 subcuencas (17460 km<sup>2</sup>), pendientes entre 0-6, 6-37 y 37 - 99,9 %, 57 posibles tipos de suelo y 16 usos de suelo y coberturas con 1347 HRU asignadas, modelo de elevación digital-DEM resolución 25 m. Calibradas 17 estaciones.</li> <li>Ciénaga–El Banco, abarca el sector bajo de la cuenca, donde se ubica la ciénaga, sitio piloto de estudio ecohidrológico.</li> </ul> <p>Se definieron 48 sitios aferentes a la ciénaga y se ubica la estación de nivel Belén; con 205 subcuencas (4834 km<sup>2</sup>), pendientes entre 0-6, 6-37 y 37 - 99,9 %, 36 posibles tipos de suelo y 13 usos de suelo y coberturas con 2050 HRU asignadas. DEM resolución 2.5 a 25 m. Calibradas 7 corrientes incluido el río Cesar y 48 afluentes directos. Se calibró manual a nivel diario y mensual de cantidad y calidad de agua, cantidad de sedimentos a escala diaria y mensual para cada sector. Para cada estación hidrométrica se calculó el balance hídrico y se cuenta con hidrógrafas, curvas de masa, curvas duración de caudales y diagramas de dispersión de los diferentes cambios en los parámetros de calibración.</p>
<p><b>Río San Jorge</b> Calentamiento de 1985 – 1986, calibración de 1987-2002, validación de 2003-2018.</p>	<p>Área hasta la ciénaga de Ayapel, de 7032 km<sup>2</sup>, que es la tercera parte del área total hasta la entrega al río Magdalena; fue dividida en 74 subcuencas, 3 rangos de pendiente entre 6–37 %, 42 tipos de suelo y 15 usos de suelo o coberturas, que generaron 2050 HRU. Con un DEM a una resolución de 12.5 m.</p> <p>El modelo fue corrido a escala diaria y calibrado a escala mensual. Cuenta con cuatro estaciones de control y tiene 6 quebradas afluentes.</p> <p>Luego de calibrada la calidad de agua, se calibraron los sedimentos con información proveniente de las estaciones de Montelíbano y San Pedro. Se calculó el balance hídrico para las estaciones de control y las quebradas aferentes.</p>
<p><b>Río La Vieja</b> Calentamiento de 1989 – 1992, calibración de 1993-2007, validación de 2008-2015.</p>	<p>Esta corriente cubre un área de 2829 km<sup>2</sup>. Fue dividida en 43 subcuencas; las pendientes varían entre 0 y 50 %, 39 tipos de suelo y 16 usos de suelo o coberturas, que generaron 3306 HRU. Con un DEM a una resolución de 12.5 m.</p> <p>La calibración del modelo hidrológico en cantidad de agua se realizó en 2 bloques de calibración, en las estaciones El Alambrado [26127010] y Cartago [26127040]. Para el caso de calidad de agua, en la serie de 1993-2015 hay datos de 1998-2015, donde Nitrógeno=2 datos/año, Fosforo=1-2 datos/año y Oxígeno Disuelto =1-2 dato/año.</p>

Las figuras 11 y 12 muestran para cada ventana las estaciones utilizadas por el PME, para adelantar el proceso de estudio ecohidrológico.



**Figura 11.** Cuencas río La Vieja y río Cesar- Ciénaga de Zapatosá, HRU y estaciones hidrometeorológicas (PMEH, 2020).



**Figura 12.** Cuenca río San Jorge- Ciénaga de Ayapel, HRU y estaciones hidrometeorológicas (PMEH, 2020).

## 4.3.2. Generación de escenarios

Se trabajaron los escenarios de cambio climático, uso y cobertura del suelo y demanda de agua, para las tres ventanas de análisis.

El objetivo es la generación de las series de información de las variables hidrometeorológicas (precipitación y temperatura), uso y cobertura de los suelos y demanda de agua, entre 2021 y 2100, bajo los parámetros de entrada que exige el modelo hidrológico en SWAT.

Para esto se utilizaron las metodologías disponibles para la obtención de los escenarios en las temáticas expuestas, basados en el tercer comunicado nacional de cambio climático (2015), emitido por el Ideam, encargado del manejo de esta información; en lo nacional y regional proveniente del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), donde, en términos generales, analizaron los diferentes modelos mundiales para el caso del país con el CMIP5, principal fuente de información vigente.

Los procedimientos, metodologías y resultados obtenidos de manera detallada, se pueden consultar en los tres enlaces dispuestos para la modelación de cada ventana.

### **Cambio climático**

Variables hidrometeorológicas:

- i) Precipitación total diaria (mm) – P
- ii) Temperatura máxima diaria (°C) – Tmáx
- iii) Temperatura mínima diaria (°C) – Tmín

### **Actividades desarrolladas:**

1. Selección de tres Modelos Climáticos Globales (MCG) con resolución temporal diaria para las variables Precipitación total (P), Temperatura máxima (Tmáx.) y Temperatura mínima (Tmín.).

Estos modelos (MGC), que cubren todo el planeta, tienen una resolución entre 100 km a 500 km; por lo tanto, se aplicó la metodología de *downscaling* para reducirlos a una escala de 10 a 50 km. Se eligió el modelo de cambio climático que mejor representa a Colombia en las áreas climáticas de trabajo del PMEh.

2. Elección de dos Caminos Representativos de Concentración (RCP) o escenarios de cambio climático a trabajar.

Los RCP son las diferentes trayectorias que pudiesen ocurrir en la temperatura con diversa concentración de gases efecto invernadero. El comité de CMPI5 definió cuatro trayectorias posibles: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 y RCP2.6, como se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Descripción y características de los RCP de cambio climático (Ideam et al., 2015).

	Escenario	Forzamiento Radiamiento (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> eq atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
Condición pesimista creciente →	<b>RCP8.5</b>	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
	<b>RCP6.0</b>	6.0	850	3	Estabilización después del 2100	SRES B2
Condición estable →	<b>RCP4.5</b>	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
	<b>RCP2.6</b>	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Escenarios seleccionados

Se eligieron los dos caminos señalados en la tabla en mención, para los tres sistemas analizados: (RCP) 4.5 y 8.5. Estos se caracterizan por estar en:

- Condición pesimista No mitigación, RCP 8.5 al año 2100, en aumento. Anomalía de temperatura 4.9 °C.
- Condición intermedia- estable, RCP 4.5 Estabilización después de 2100. Anomalía de temperatura 2.4 °C.

3. Obtención de información de los tres MCG y para los dos RCP seleccionados. Descarga de archivos netCDF (.nc) de la Earth System Grid Federation (ESGF).

4. Extracción y downscaling de las series de P, T<sub>máx.</sub> y T<sub>mín.</sub> de los MCG. Debido a que los modelos de cambio climático son a escala global y las zonas de estudio son de pocos kilómetros, se utilizó una técnica en se que disminuye la escala para utilizar los datos de cambio climático en la zona de estudio: *DownScaling*. En la Tabla 13 se muestra el método que mejor ajuste dio al territorio para precipitación y temperatura.

5. Elección del MCG que mejor representa el comportamiento climático de la cuenca ante las variables en estudio (Tabla 13).

6. Generación de series futuras de cambio climático para variables P, T<sub>máx.</sub> y T<sub>mín.</sub> a nivel diario (hasta el año 2100), del MCG seleccionado para la ventana.

**Tabla 13.** Resumen de los métodos utilizados para el análisis de cambio climático (PMEH, 2021)

Cuenca	Precipitación		Temperatura	
	Modelo Global	Método downscaling	Modelo Global	Método downscaling
<b>Cesar</b>	MIROC5	Linear scaling	MIROC5	Distribution Mapping
<b>San Jorge</b>	MPI-ESM-LR	Linear scaling	FGOALS G2	Distribution Mapping
<b>La Vieja</b>	MPI-ESM-LR	Distribution Mapping	MIROC5	Delta-Change

Los insumos que se utilizaron se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Insumos cálculo escenario cambio climático.

Ventana de trabajo	Insumos cálculo escenarios cambio climático
<b>Río Cesar</b>	Localización y series históricas de 39 estaciones de precipitación para la ventana Río Cesar periodo 1985–2018. Se trabajó con los centroides de 103 subcuencas.
<b>Río San Jorge</b>	Se utilizaron valores históricos de 1985 a 2018. Se realizó una interpolación hacia los centroides de las 74 subcuencas en que se dividió la cuenca.
<b>Río La Vieja</b>	Localización y series históricas de 36 estaciones en tierra de precipitación-P, preseleccionadas (1989-2015). Localización y series históricas de 11 estaciones en tierra de temperatura-T, preseleccionadas (1989-2015). Localización y series históricas de temperatura y precipitación para 43 estaciones virtuales generadas con la modelación hidrológica en SWAT (1989-2015).

## Uso y cobertura del suelo

Las cuencas hidrográficas son modificadas constantemente por el hombre y la naturaleza. El uso y cobertura de la tierra es un factor importante en su estudio, pues cambia y afecta su comportamiento, interviene en la recarga, regulación hídrica y protege o afecta las laderas. Los modelos predictivos establecen cómo puede llegar a ser la cuenca a futuro si se sigue manejando igual y qué efectos puede tener en el mediano y largo plazo.

Se analizaron las coberturas base años 2000, 2009, 2012 y 2020 y sus cambios, para definir los impulsores, utilizando factores económicos, históricos, territoriales y sociales, que los ocasionaron, apoyando la caracterización de las causas y agentes de dichos cambios.

La caracterización de cada ventana se apoyó en los documentos de ordenación ambiental, sus diagnósticos, la caracterización sociocultural hecha por el equipo del PMEh, así como en

los lineamientos conceptuales y metodológicos para la caracterización de causas y agentes de la deforestación en Colombia (González et al., 2018).

Se homologó a coberturas generales, basado en la caracterización y dinámica de las cuencas, para bajar el número de transiciones y errores por diferencias en interpretación y el nivel de detalle. Los impulsores de cambio propuestos consideraron la caracterización de las áreas de estudio y el análisis de coberturas; se realizó el procesamiento espacial para adecuarlos a los formatos utilizados en la metodología escogida Dinámica EGO, (*EGO-Environmental for Geoprocessing Objects*), software libre que genera modelos espaciales simples o complejos para análisis espacio-temporales, enfocados en fenómenos ambientales (Soares-Filho et al., 2002) e integra la información de variables y transiciones para generar un mapa que determina la probabilidad de que una unidad espacial cambie de una cobertura a otra en un determinado periodo de tiempo (Soares-Filho et al., 2009). La Tabla 15 muestra los impulsores de cambio propuestos para las tres áreas de estudio.

**Tabla 15.** Impulsores de cambio utilizados por ventana (PMEH, 2021).

<b>Impulsores de cambio – drivers Ayapel</b>	<b>impulsores de cambio – Zapatosa</b>	<b>Impulsor de cambio La Vieja</b>	<b>Fuente</b>
<b>1. Vías de acceso</b>	1. Vías de acceso	Distancia a vías y drenajes (se espera que, a menor distancia, mayor deforestación). Su presencia favorece el cambio.	Base oficial del IGAC 1:100.000.
<b>2. Pendientes</b>	2. Pendientes	Pendiente. Fuente: DEM 12,5 (correlación negativa entre la pendiente y la deforestación).	DEM 30 de la NASA.
<b>3. Río, quebradas, lagunas y ciénaga</b>	3. Río, quebradas, lagunas y ciénaga		Oficial del IGAC escala 1:100.000.
<b>4. Densidad poblacional por casco urbano</b>	4. Densidad poblacional por casco urbanos	Cabeceras y centros poblados. Fuente: DANE (La proximidad a estas áreas aumenta la probabilidad de deforestación).	Generadas con los datos del DANE.
<b>5. Títulos mineros</b>	5. Títulos mineros		Vector del ANNA pág. Agencia Nacional de Minería.
<b>6. Vocación del suelo</b>	6. Vocación del suelo	Capacidad de uso del suelo. Fuente: Pomca río La Vieja.	Oficial del IGAC escala 1:100.000.
<b>7. Inundaciones</b>		Desarrollo de actividades productivas. Fuente: plan de extensión agropecuaria del Quindío – Coberturas 2020 (base en las coberturas de pastos limpios, detalladas en la interpretación de coberturas de la tierra).	Raster Fundación Natura.

Impulsores de cambio – drivers Ayapel	impulsores de cambio – Zapatoza	Impulsor de cambio La Vieja	Fuente
8. Densidad de cultivo de coca			Geovisor Página Observatorio de Drogas Colombia.
9. Reservas naturales	9. Reservas naturales	Áreas protegidas nacionales y regionales. Fuente: Parques Nacionales Naturales de Colombia (posible procurar la protección de los recursos naturales de un territorio).	Tomado del SIAC.
10. Resguardos indígenas y comunidades negras	10. Resguardos indígenas y comunidades negras	Áreas con reglamentación especial: zonas de reserva campesina, resguardos indígenas, consejos comunitarios (afrodescendientes). Fuente: portal de datos abiertos de la Agencia Nacional de Tierras.	Agencia Nacional de Tierras.
	11. Escorrentía media anual		Ideam y Fundación Natura.
	12. Cultivos de palma		DANE y Ministerio de Agricultura.
	13. Precipitación		Ideam.
	14. Pozos		Pomca, Ideam.

La Figura 13 presenta el esquema para la construcción del modelo de simulación.

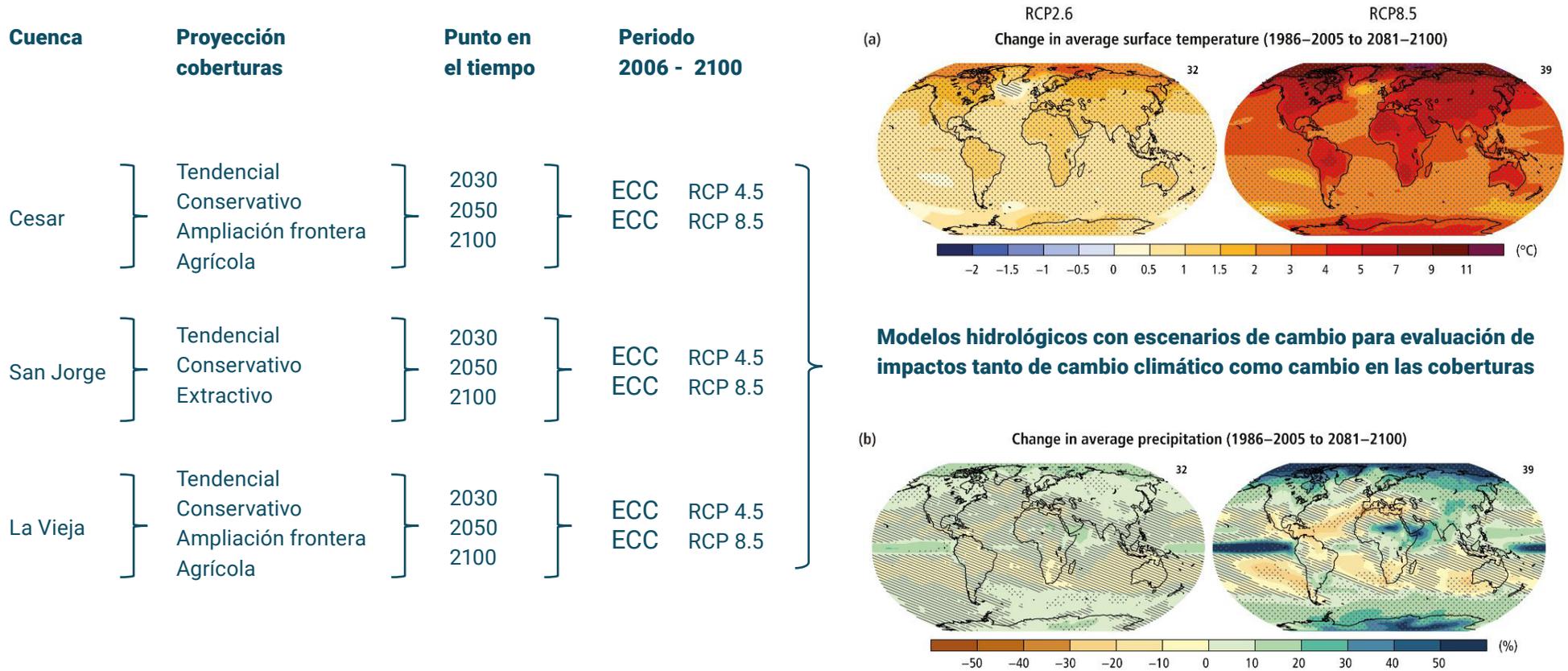


**Figura 13.** Pasos para el desarrollo del modelo de simulación del cambio del uso del suelo con el programa Dinámica EGO V5 (PMEH 2021).

El análisis de correlación de variables evidenció que las áreas protegidas nacionales y regionales, las cabeceras y centros poblados, la capacidad de uso del suelo y los sitios con reglamentación especial, están muy correlacionados. Por tanto, el modelo se construyó con las variables distancias euclidianas a: drenajes, a vías, a polígonos de expansión agropecuaria, a polígonos asociados a ganadería, mapa de pendiente y a núcleos mineros.

### 4.3.3. Simulación de los escenarios para la modelación hidrológica

Con las metodologías y procedimientos ya descritos en 4.3.2 para las tres ventanas de análisis. El abanico de escenarios trabajado se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.** Combinaciones de trabajo con escenarios de cambio climático, uso y cobertura de suelos (PMEH 2021).

El Modelo SWAT tiene treinta variables de salida para cada ventana; esto implica que, por ejemplo, el río San Jorge obtuvo 540 mapas de solo escenarios. Como son tres ventanas de trabajo, se programó un código en “R”, para facilitar el análisis e interpretación, pues visualiza o representa gráficamente estas salidas, no genera un *shapefile* y elabora la figura en JPG.

A los modelos hidrológicos SWAT calibrados ingresaron los insumos de los escenarios; sus resultados sirvieron de información de entrada a los modelos hidrodinámico, social y trófico para las simulaciones planteadas en cada ventana de trabajo.

## 4.4. Modelación hidrodinámica – Telemac

Modelo utilizado Open Telemac-Mascaret (Hervouet y Haren, 1994), que soluciona las ecuaciones diferenciales parciales para flujos de superficie libre promediados en la profundidad (aguas someras), con el método de volúmenes y elementos finitos. Herramienta de código abierto que facilitó modificarlo e implementar procesos adicionales, dependiendo de las necesidades o particularidades del problema que se trabajó.

Se implementó una modelación transitoria que representó la dinámica del complejo a lo largo del ciclo hidrológico. El modelo cuenta con una representación bidimensional y la capacidad de representar geometrías complejas, mediante el uso de mallas no-estructuradas. Permite el transporte de escalares pasivos que viajan con el agua (sedimentos, nutrientes, comunidades planctónicas y otros). Esta estrategia matemática resulta de utilidad para el estudio de variables a partir de las respuestas hidrodinámicas de velocidad y profundidad, como es la modelación biótica implementada en Telemac a través del módulo Waqtel (*Water quality for Telemac*). Este módulo incorpora un modelo de crecimiento de la comunidad de fitoplancton, en el que la tasa de crecimiento interactúa con variables como nutrientes y temperatura del agua (escalar pasivo); se pueden expandir las capacidades del modelo desarrollado, hacer el cálculo de transporte de fondo para la evolución del lecho, entre otros.

### 4.4.1. Configuración y calibración del modelo

Desde el modelo conceptual se identificaron las principales variables físicas, junto con sus relaciones que determinan las condiciones del hidrosistema. Se hace énfasis en los cuerpos de agua con los que el sistema intercambia agua, nutrientes y sedimentos, así como su relación con la atmósfera, que determinará variables como la temperatura del agua. Se captura parte de la complejidad, en cuanto a la interacción de variables netamente físicas, como la velocidad, profundidad, con el crecimiento del fitoplancton, seleccionando los procesos considerados como fundamentales.

Los modelos hidrodinámicos requieren de una representación fiel del terreno para su correcto funcionamiento, por lo menos a la escala que se quiera modelar. La extensión, complejidad del terreno y ubicación dificulta la toma de datos topográficos en campo de forma convencional, pero no son limitaciones para el sensoramiento remoto.

Aspectos relevantes de un modelo apto para estas modelaciones son: representación de las conexiones, formas del lecho (en modelos de escalas más finas), certeza en los volúmenes de los cuerpos de agua, pendiente del terreno y alta precisión en la altimetría.

## 4.4.1.1. Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio

El procedimiento utilizado al respecto para cada una de las dos ciénagas, se muestra en las tablas 16 y 17.

**Tabla 16.** Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio ciénaga de Zapatosa

Aspecto analizado	Proceso de modelación hidrodinámica ciénaga de Zapatosa
<p><b>Datos y fuentes de información</b></p>	<p>Información batimétrica existente del Ideam y complementaria del proyecto levantada con ADCP, scanner topográfico y ecosondas, cubriendo áreas de interés para cada condición de niveles en las 3 campañas de campo en junio 2019 (niveles en transición), en noviembre 2019 (niveles máximos) y marzo de 2020 (periodo de estiaje); énfasis en las partes norte y sur: casi 400 km<sup>2</sup> muy complejos. Información hidrometeorológica del área.</p> <p>Información de sensores remotos complementando las batimetrías. Construcción modelo elevación digital, verificado con levantamiento topográfico, detallado con escáner láser y procesamiento de 419 imágenes satelitales periodo 1984-2019.</p> <p>Salidas escenarios modelos hidrológicos SWAT río Cesar.</p> <p>Información de variables físicas obtenidas en campo: i) profundidades del lecho, ii) aforos líquidos, iii) aforos sólidos y iv) toma de muestras de sedimentos y caracterización granulométrica.</p>
<p><b>Definición del dominio y malla computacional</b></p>	<p>Por su extensión, se refinó en: i) zona norte, entrada del río Cesar al complejo; ii) zona sur del río Cesar donde deja el espejo de agua permanente de la ciénaga (cerca del sector de Belén), hasta su desembocadura, río Magdalena; iii) los sectores norte y sur, espejo de agua permanente, múltiples ciénagas inter conectadas por caños; iv) zona del espejo de agua permanente de la ciénaga. El área de inundación prevalece a lo largo del año, de geometría sin complejidad, se usan elementos de mayor dimensión, sin perder precisión en la representación de la topobatimetría; y v) el perímetro del espejo principal de la ciénaga, donde hay expansión y contracción de la lámina de agua.</p> <p>Malla computacional con 1217638 nodos y 2432550 triángulos equiláteros, de tamaños variables.</p> <p>Las condiciones de frontera introducen fuente de masa y concentraciones de elementos suspendidos en el agua. Hay 3 fronteras:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) la descarga del río Cesar al río Magdalena, municipio El Banco; serie del nivel registrado en la estación El Banco sobre el río Magdalena, que dispone de cero de mira.</li> <li>2) La entrada del río Cesar al dominio. Este se extendió igualmente en la zona norte, cubriendo hasta el sector de Rancho Claro, con el 100% del caudal del río Cesar, en un único cauce definido. No se comparte este caudal con otra corriente.</li> <li>3) 3 fronteras secundarias que representan las conexiones de los <i>box-couvert</i> con el río Magdalena, el sector sur del modelo, sobre la vía El Banco-Tamalameque. Aquí el nivel es el de la serie del río Magdalena.</li> </ol>

**Tabla 17.** Disponibilidad de datos, fuentes de información y dominio ciénaga de Ayapel.

<b>Aspecto analizado</b>	<b>Proceso de modelación hidrodinámica ciénaga de Ayapel</b>
<b>Datos y fuentes de información</b>	<p>Información base de elevación digital e hidrometeorológica del área de estudio. Modelo de elevación digital con una resolución de 3 m x 3 m. Fue construido a partir de información existente Lidar del proyecto de Fondo Adaptación región de La Mojana. La información hidrometeorológica tiene como fuente primaria las estaciones del Ideam, de precipitación y niveles a resolución subdiaria, Beirut (25027760 Limnigráfica 25 m.s.n.m)), además de las estaciones pertenecientes al proyecto del SAT- PNUD para la región de La Mojana, con resolución subdiaria (Seheve (limnigráfica 22.5 m.s.n.m) y Cecilia (limnigráfica 20.48 m.s.n.m).</p> <p>Salidas escenarios modelo hidrológico SWAT, río San Jorge. Información de variables físicas obtenida en campo i) profundidades del lecho.</p>
<b>Definición del dominio y malla computacional</b>	<p>El modelo numérico del sistema incluye caños, quebradas y lagunas afluentes. Se define por el norte de la malla computacional, donde se encuentran las estaciones Cecilia y Seheve. Además, es necesario representar la conectividad de la ciénaga con el río San Jorge, en la zona de la estación Seheve. Asimismo, la estación Cecilia recoge la masa de los afluentes de la ciénaga Ayapel, para transformarse en el caño Viloría.</p> <p>La delimitación del área de estudio se realizó con base al modelo de elevación digital de la zona (GRASS, 2017), además de considerar la conectividad hidráulica de la ciénaga de Ayapel con los afluentes. Primero, por el sector oeste de la ciénaga, la malla computacional colinda con el río San Jorge entre el inicio de la ciénaga Ayapel y la estación de Seheve. Segundo, entre la estación Cecilia y los rompederos de Pueblo Nuevo y Santa Ana en la parte este de la ciénaga Ayapel. Finalmente, la zona sur de la malla computacional se ve delimitada por los puntos de cierre del modelo hidrológico de las subcuencas descritas, como aportes de masa para el modelo numérico.</p>

#### 4.4.1.2. Definición de escala temporal y espacial para las dos ventanas cenagosas

La definición de la escala temporal y espacial del proyecto está asociada a los fenómenos que se requieren representar, además de la resolución disponible de la información base. La información base para el modelo de elevación y construcción de las condiciones de frontera del modelo tiene una resolución de 3 m y 12 horas, respectivamente, por lo que es adecuada para representar los fenómenos objeto de esta simulación.

### 4.4.1.3. Definición de dominio y malla computacional

#### Condición inicial

El PMEH configuró y calibró el modelo hidrológico para cada una de las dos corrientes: el río Cesar (ciénaga de Zapatosa)—que se dividió en dos cuencas para generar información detallada para la ciénaga— y para el río San Jorge, hasta la ciénaga de Ayapel. De ellos se tomaron los respectivos datos, según la ventana de estudio: evaporación y precipitación. De información disponible en estaciones del Ideam del sector se tomó viento y radiación, mientras que presión de vapor se dedujo de humedad relativa, y nubosidad, a través de sensores remotos. Además, se realizó el calentamiento de cada modelo.

#### Ciénaga de Ayapel

Las simulaciones definidas en bifurcación, eliminación San Jorge, cambio climático RCP 4.5 y 8.5 incluyen transporte de trazadores (caudal, sedimentos en suspensión, temperatura, tiempo de residencia, biomasa de fitoplancton, fósforo disuelto, nitrato disuelto, fósforo orgánico no asimilable, nitrato orgánico no asimilable). Sin embargo, el escenario de rompederos solo mantiene fuentes de masa de agua (caudal).

#### Ciénaga de Zapatosa

El modelo refinado es una modelación transitoria que cubre un periodo de cuatro años, incluyendo el periodo de calentamiento. El balance de energía del modelo se realizó con información de las estaciones del Ideam: Aguachica (automática 23195240), Aeropuerto Las Flores (automática 25025360) y La Loma Carbones (automática 280125130).

### 4.4.2. Calibración y refinamiento

El procedimiento se describe para las dos ciénagas en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Procedimiento calibración y refinamiento modelación hidrodinámica.

Ventana de trabajo	Calibración y refinamiento modelación hidrodinámica
<p><b>Ciénaga de Ayapel</b></p>	<p>Se realizó con análisis de imágenes Telesentinel para identificar el área de cada tipo de cobertura, espacialmente variada en el dominio de la ciénaga, a fin de asociar cada clase a un coeficiente de rugosidad.</p> <p>La calibración del modelo se realizó para el periodo de 01-01-2016 a 31-12-2018 con la estación Beirut; los niveles de esta, Cecilia y Seheve (01/2016 – 07/2019) definieron el nivel aguas abajo del modelo numérico del sistema cenagoso. La validación en periodo seco y húmedo fue mediante matrices de confusión, comparando áreas con agua y sin agua. Los resultados de la métrica f1 score tienen un mínimo de 0,71 en época seca, y máximo de 0,88 en época lluviosa.</p> <p>Asimismo, para desestimar la influencia de la diferencia de nivel entre el modelo de elevación digital y la cota cero de las estaciones de medición, se calculó la diferencia en la serie <math>(X(n+1) - X(n))</math>, que describe la variación diaria de nivel entre lo simulado y observado.</p> <p>Para identificar posibles periodos de bidireccionalidad del caño Grande se realizó un análisis de contenido frecuencial de las series observadas, en las estaciones de condiciones de frontera y la serie de tiempo de los afluentes de la ciénaga, para identificar alguna conexión entre lo que sucede en la estación Seheve y los afluentes de la ciénaga, los ríos San Jorge y Cauca.</p>
<p><b>Complejo cenagoso de Zapatosa</b></p>	<p>Se refinó mejorando el desempeño para: i) Mejorar la representación del lecho del complejo y las conexiones hidráulicas entre ciénagas y caños, ii) refinar la malla de cómputo para la correcta representación del terreno en algunas zonas, iii) incluir la entrada o salida de masa del modelo a través de fuentes /sumideros, iv) mejorar el mecanismo de especificación del coeficiente de rugosidad o fricción de Manning, e incluir la posibilidad de especificar valores del coeficiente de fricción para diferentes zonas.</p>
<p><b>Complejo Cenagoso de Zapatosa</b></p>	<p>Calibración modificando el coeficiente de rugosidad en el periodo de 01/2017-12/2018.</p> <p>Para el área de inundación, la estrategia de calibración fue la comparación de aquella generada por el modelo, con la mapeada mediante sensores remotos. Para ello se emplearon 54 imágenes Sentinel, 2 previamente clasificadas periodo 01/2017 a 12/2018. Un buen ajuste en el proceso de calibración se observa a través de la métrica de desempeño, seleccionada como la medida F o predicción de valores positivos, definida como el promedio armónico entre la precisión y la sensibilidad. La estrategia comparo los niveles calculados con los históricos estación limnimétrica de Belén.</p>

### 4.4.2.1. Acoples

Los acoples desarrollados en modelación ecohidrológica responden a procesos físicos relevantes identificados en el complejo, que controlan las tasas de crecimiento del fitoplancton y de los productores primarios en general. La mayoría de las variables de interés en los acoples (concentración de sedimentos, nutrientes, temperatura, entre otros), pueden ser modeladas mediante la aproximación de escalares pasivos en Telemac, en donde el modelo hidrodinámico representa el proceso de advección y difusión de los escalares modelados; es decir, tendrá en cuenta el transporte de estas sustancias que viajan suspendidas o disueltas en el agua, debido a la hidrodinámica del sistema y a los aportes desde los afluentes a la ciénaga.

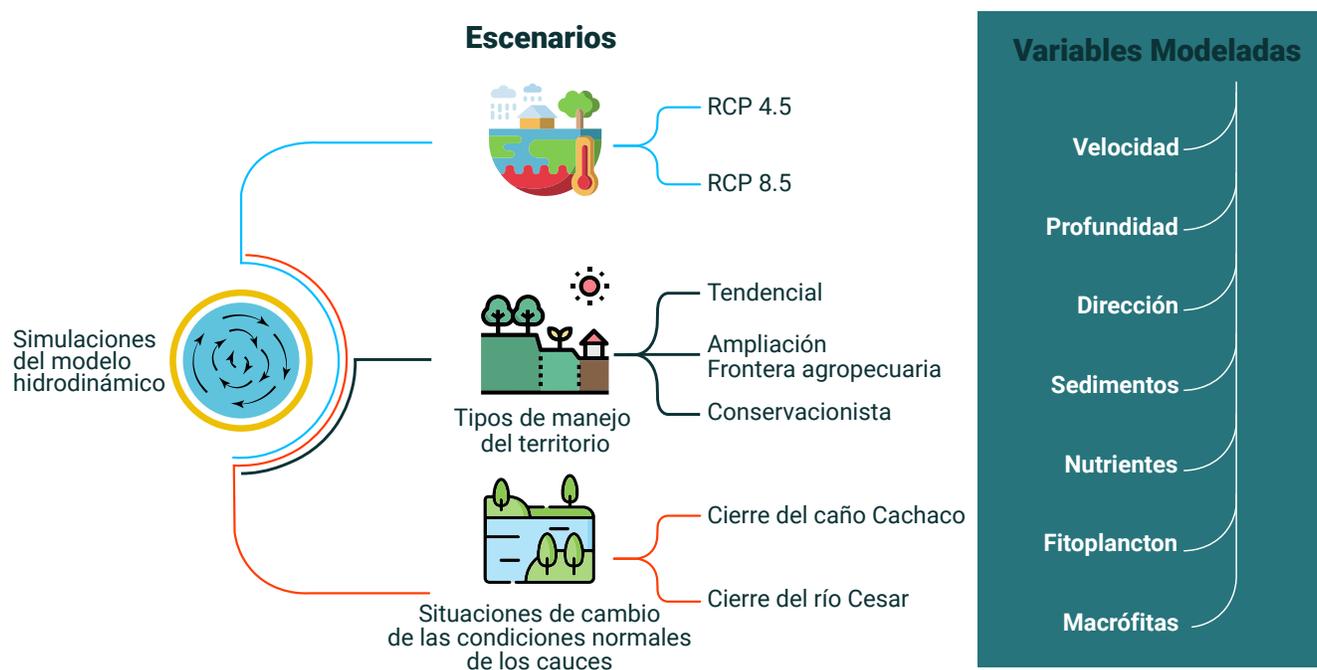
**Ciénaga de Ayapel:** las condiciones de frontera y de masa del modelo numérico se relacionan con los caños y quebradas y son iguales para todos los escenarios en duración y ubicación geográfica. Las simulaciones definidas bifurcación, eliminación San Jorge, cambio climático RCP 4.5 y 8.5 incluyen transporte de trazadores, los cuales fueron calibrados.

**Ciénaga de Zapatosa:** se desarrollaron e implementaron acoples para: i) transporte de sedimentos en suspensión; ii) balance de energía para cálculo de la temperatura del agua; iii) cálculo distribución espacial de la transparencia del agua; iv) ajuste cálculo parámetro RAY (-Cálculo radiación solar en superficie y - ajuste cálculo dinámico de la profundidad Secchi); v) biomasa de fitoplancton; vi) cálculo predación del fitoplancton.

Se generaron los códigos fuente para modificar las rutinas involucradas; se calibraron estos acoples con trazadores. Se utilizó Wactel (Telemac) como estrategia de modelación y solución de una ecuación de transporte para cada escalar modelado, por lo que estos escalares serán afectados por los flujos que se presenten en la ciénaga, de acuerdo con la hidrodinámica. Se introducen términos que contemplan procesos de interacción entre las variables modeladas y términos fuente o sumidero, que pueden ser volumétricos o de superficie. Se deben dividir en la profundidad, al tener que ser repartidos en la columna de agua.

### 4.4.3. Simulación de los escenarios para la modelación

La Figura 15 muestra el proceso seguido dentro de la modelación hidrodinámica, que incorpora los resultados de los escenarios generados en el aparte 4.3.3 de este documento y de los resultados producto de la modelación hidrológica para cada ventana.



**Figura 15.** Proceso modelación hidrodinámica (Peña y Hernández, 2022).

En las tablas 19 y 20 se muestran los escenarios planteados para cada una de las dos ciénagas. Estos fueron modelados hidrodinámicamente y sus resultados se abordan en el numeral 5 de este documento.

**Tabla 19.** Escenarios modelados hidrodinámica ventana Ciénaga de Zapatosa PME.H.

Nombre del escenario	Periodo	Descripción	Utilidad
<b>Escenario base</b>	2015-01-01 a 2018-12-31	Consiste en la simulación más extensa realizada.	Base comparativa para las demás simulaciones.
<b>Cierre caño Cachaco</b>	2016-06-01 a 2018-12-31	Consistió en la modificación en el modelo de elevación digital para mostrar un cierre del caño y su efecto en el complejo cenagoso.	Mostrar un cierre del caño Cachaco y su efecto en el complejo cenagoso,
<b>Cierre río Cesar</b>	2016-06-01 a 2018-12-31	Consistió en la modificación en el modelo de elevación digital para mostrar un cierre del río Cesar y su efecto en el complejo cenagoso.	En conjunto con la simulación anterior, son insumos para el entendimiento de cada uno de estos cuerpos lóticos, en el funcionamiento del sistema completo.
<b>Escenario de cambio climático RCP 8.5</b>	2031-06-01 a 2032-12-31	Se alimentó con las series generadas por el modelo hidrológico.	Efectos sobre la ciénaga.
<b>Escenario cambio de cobertura del suelo</b>	2016-06-01 a 2018-12-31	Utilizó las series generadas por el modelo hidrológico y el cambio futuro de cobertura y uso de suelo extractiva esperada. Horizonte de tiempo 1.5 años.	Efectos sobre la ciénaga.

**Tabla 20.** Escenarios modelados hidrodinámica ventana Ciénaga de Ayapel PME.H.

Nombre del escenario	Periodo	Descripción	Utilidad
<b>Escenario base</b>	2016-01-01 a 2018-12-31	Consiste en la simulación más extensa realizada.	Base comparativa para las demás simulaciones.
<b>Rompederos río Cauca Nuevo Mundo y Santa Anita</b>	2016-01-01 a 2018-12-31	Falla del dique río Cauca. Se utilizará como valor de referencia con respecto a los otros escenarios en donde permite observar la interacción de la precipitación, evaporación de la zona con los arroyos y quebradas que aportan a la ciénaga de Ayapel.	Cómo es la hidrodinámica de la ciénaga ante eventos como la falla de dique del río Cauca que inunde la zona de la ciénaga, presentados en los rompederos de Nuevo Mundo y Santa Anita, considerando las variables, niveles, velocidad y profundidad.
<b>Modificación de bifurcación conexión entre el caño Viloria y la ciénaga</b>	2016- 06-01 al 2018-12-31	Se elimina la conexión entre caños de las condiciones de contorno en Cecilia y Seheve, considerando las variables hidrodinámicas y de calidad de agua. Escenario futuro de cambio en la línea base bifurcación: el caudal del San Jorge no entra a la ciénaga si no que pasa directamente a caño Viloria hacia Cecilia.	Evaluar la conexión de la ciénaga con las condiciones de contorno de Cecilia y Seheve, considerando la restauración del caño, cómo es la interacción de la lluvia, evaporación de la zona con los arroyos y quebradas afluentes a la ciénaga, y cómo se comporta la hidrodinámica.
<b>Simulación eliminación aporte río San Jorge a la ciénaga de Ayapel</b>	2016- 06-01 al 2018-12-31	Cambio en la hidrodinámica del sistema por desconexión entre la ciénaga y el río San Jorge, no recibe aportes de caudal de este considera variables de niveles y velocidades.	Afectaciones al hidrosistema si se desconecta el río san Jorge.
<b>Escenario de cambio climático RCP 4,5</b>	2049-06-01 a 2050-12-31	Se alimentó con las series generadas por el modelo hidrológico, condiciones de precipitación y temperatura generadas por el cambio climático para RCP 4.5 y RCP 8.5 y el cambio futuro de cobertura y uso de suelo extractiva esperada para 2050. Horizonte de tiempo, 1.5 años. Considera niveles, velocidad, profundidad, sedimentos, temperatura del agua, nitrógeno, fósforo y fitoplancton.	Evaluar la afectación por cambio de temperatura y precipitación dentro del dominio de la ciénaga. Verificar si existe un cambio en la disponibilidad de fitoplancton y nutrientes, así como las modificaciones del ciclo hidrológico, con respecto a las variaciones de área y volumen de la ciénaga de Ayapel.
<b>Escenario de cambio climático RCP 8,5</b>			

## 4.5. Modelación social–dinámica de sistemas

Luego de revisar experiencias de modelación social y articularlas con las características sociales de las ventanas de estudio y la estrategia de modelación ecohidrológica, la mejor

opción para el análisis de la relación entre la población humana y su capital económico fue Dinámica de Sistemas (DS), que deja plantear escenarios que soporten la toma de decisiones.

Cada ventana fue caracterizada y analizados sus perfiles sociodemográfico, socioeconómico y sociocultural, con información secundaria, e identificados sus actores, los subsistemas socioecológico, gobernanza y gobernabilidad, activos de la población y servicios ecosistémicos.

### 4.5.1. Configuración y calibración del modelo social

En cada área de estudio se seleccionaron los índices sociales basados en las interacciones identificadas, pues su cambio da cuenta del estado del Sistema Socio Ecológico (SSE) en el tiempo. En consecuencia, operan como indicadores del SSE, cuya pertinencia radica en la relación que tienen con los criterios del proyecto: a) gobernanza y gobernabilidad, b) orientado a la toma de decisiones y c) la interacción entre el ecosistema y sistema social.

La metodología DS identifica las relaciones causales como medio de interacción de los elementos de cada SSE, evidenciando la estructura del sistema que determina el comportamiento dinámico, modelando flujos de masa e información y bucles de realimentación, unidos a variables que definen el estado del sistema (Sarmiento y López, 2017). Estos bucles y uniones se pueden observar a través de la construcción de los diagramas causales y la formulación de la hipótesis dinámica, evidenciando las variables endógenas y exógenas del SSE, limitándolo en relaciones de causa–efecto (Morecroft, 2007).

Se construyeron las ecuaciones diferenciales, de acuerdo con las variables identificadas y su comportamiento dependiente de las variables flujo.

Para obtener parámetros de los que no se poseen mediciones, se realizó la calibración del modelo, mediante la herramienta Platypus, desarrollada en el lenguaje Python.

#### Convenciones de los diagramas:

**Verde:** relaciones subsistema Servicios ecosistémicos.

**Naranja:** relaciones subsistema social.

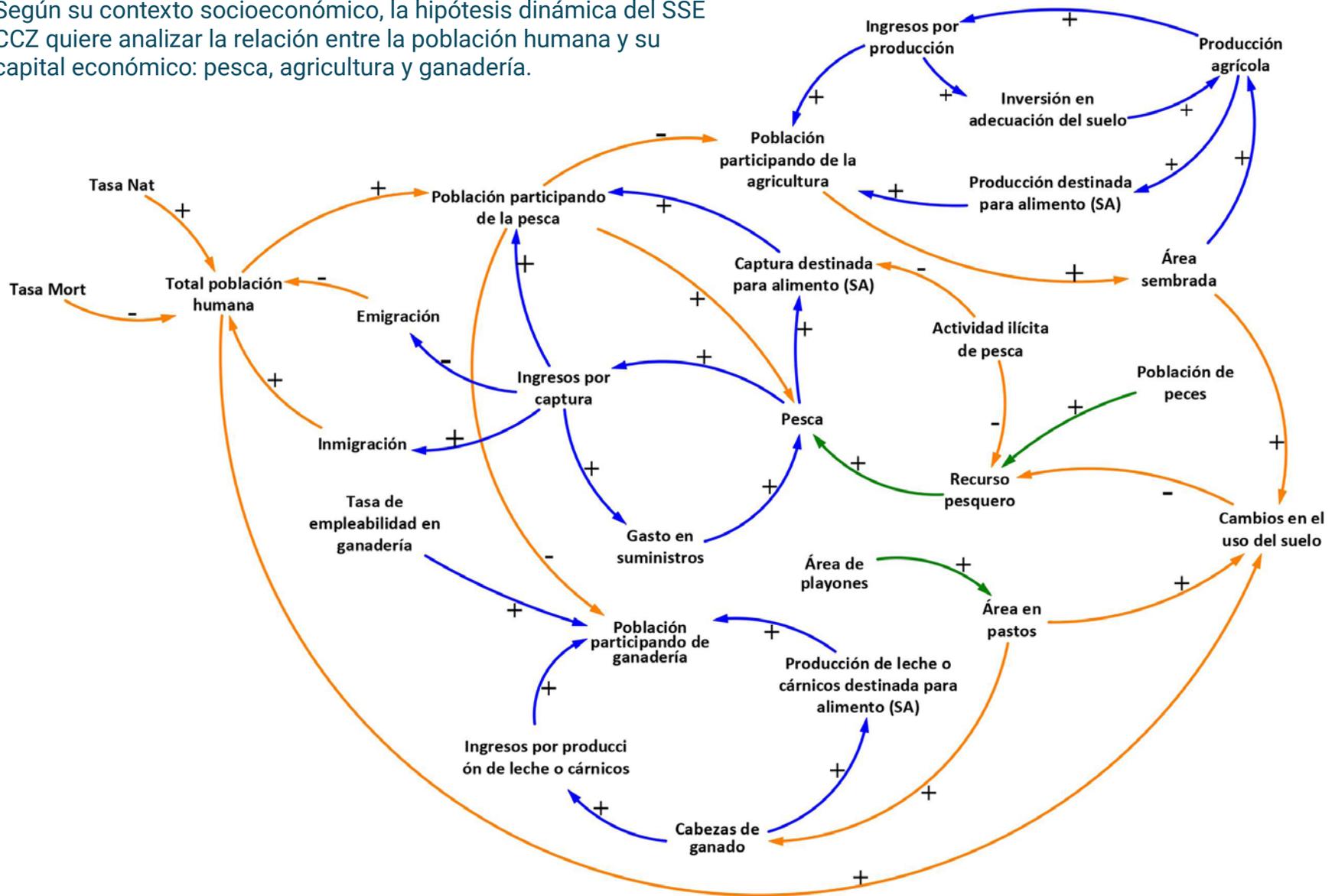
**Azul:** relaciones artefactos.

(+): si causa y efecto tienen el mismo comportamiento (aumento o disminución). Si la variable causa aumenta (disminuye), la variable efecto también aumenta (disminuye).  
(-): si causa y efecto van en direcciones contrarias. Si la variable causa aumenta (disminuye), la variable efecto disminuye (aumenta).

De acuerdo con la información disponible para las ventanas de estudio ya descrita en el numeral 4.5, se formula la hipótesis dinámica para cada una.

## Complejo cenagoso de Zapatosa

Según su contexto socioeconómico, la hipótesis dinámica del SSE CCZ quiere analizar la relación entre la población humana y su capital económico: pesca, agricultura y ganadería.



**Figura 16.** Hipótesis dinámica del sistema social, económico y cultural del complejo cenagoso de Zapatosa (Reina, 2021).



Lanzamiento de atarraya. Ciénaga de Zapatos.

**Hipótesis dinámica (Figura 16):** si disminuye el recurso pesquero, disminuye la actividad pesquera como capital económico de la población, afecta la disponibilidad de empleo, la generación de ingresos y baja el atractivo económico, incentiva la movilidad de la población a otras capitales o municipios, o hacia actividades económicas que mejoren sus ingresos.

## Ciénaga de Ayapel

Según su contexto socioeconómico, se quiere analizar la relación entre la población y su capital económico: pesca, agricultura, ganadería y la explotación ilegal de oro de aluvión (EIOA); –muy atractiva, a pesar de sus problemas ambientales –, la movilidad de la población flotante –que sale del territorio buscando mejores ingresos, y regresa según mejoren o no los ingresos en el capital económico.

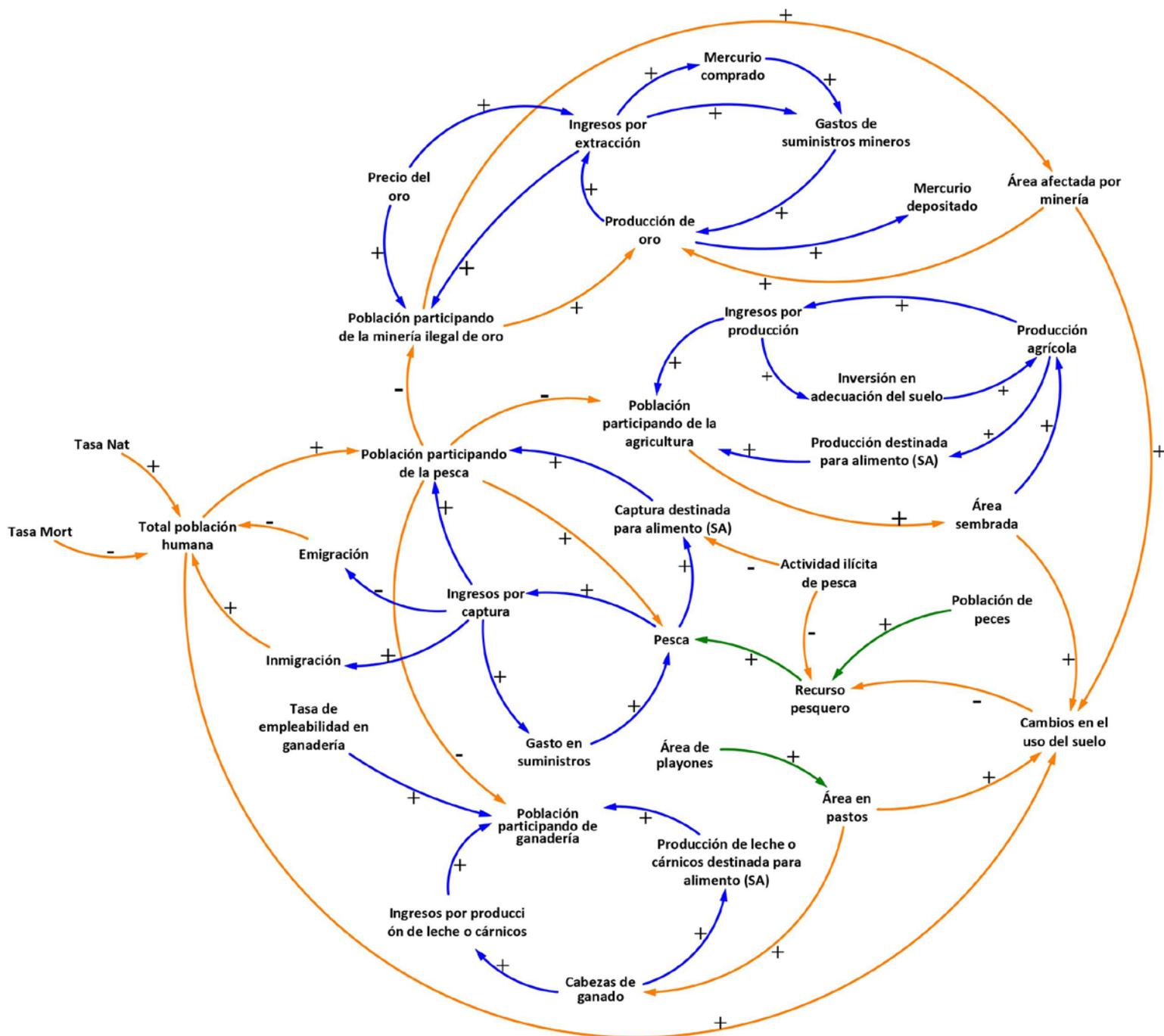


Figura 17. Hipótesis dinámica sistema social, económico y cultural de la ciénaga de Ayapel (Reina, 2021).

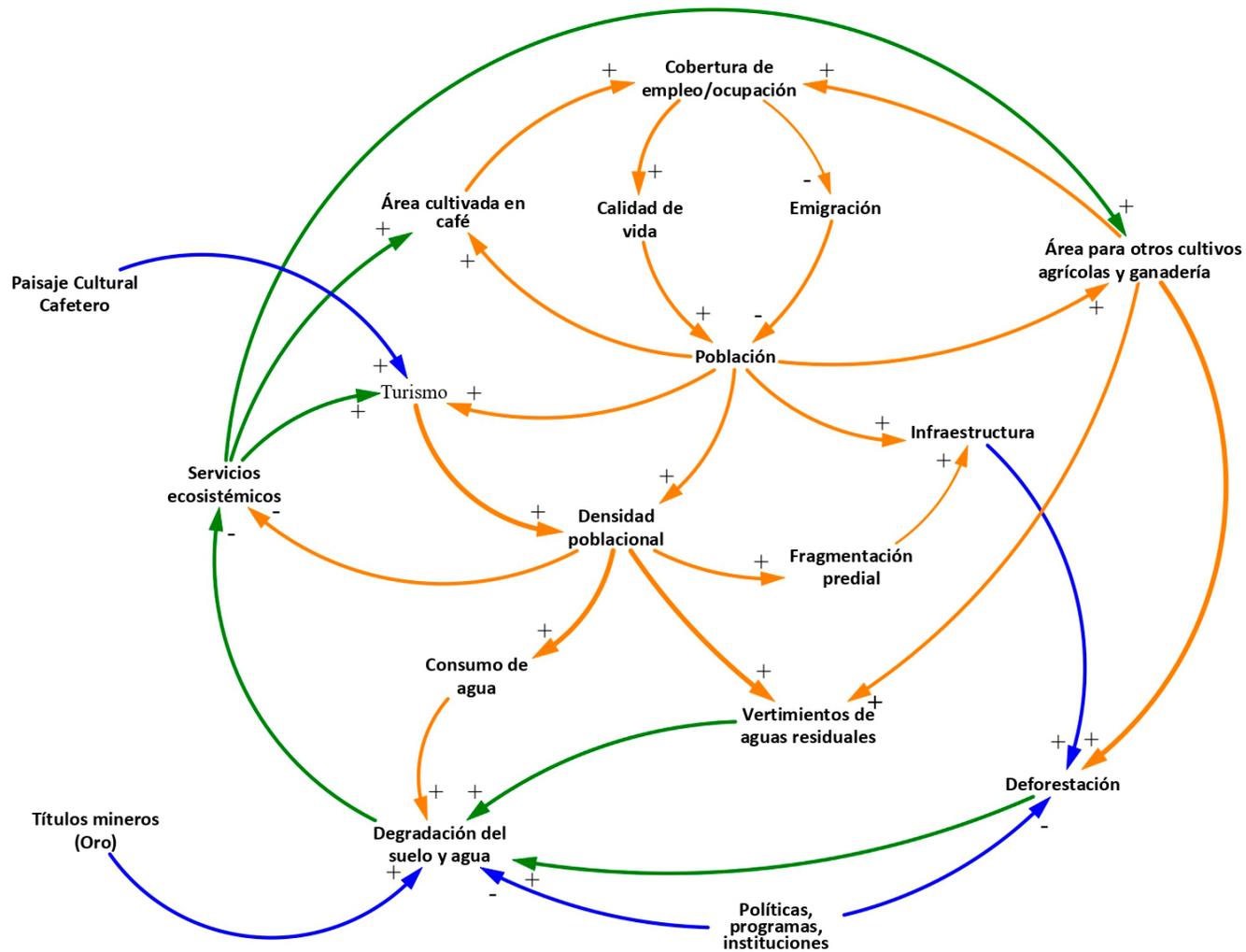


Chavarrí (*Chauna chavaria*) en la ciénaga de Ayapel.

**Hipótesis dinámica (Figura 17):** la actividad pesquera y la minería ilegal de oro son el capital financiero de la población y generan empleo; su eliminación, implica movilizarse para buscar oportunidades, e incentiva la agricultura, el turismo y la ganadería, con otras implicaciones.

## Río La vieja

Su contexto socioeconómico sustenta el análisis de la relación entre la población y su capital económico: producción de café, otros tipos de cultivos, ganadería y turismo; la movilidad de la población flotante: aquella que sale en búsqueda de mejores ingresos o transita a otra actividad económica según las oportunidades, por la misma razón.



**Figura 18.** Hipótesis dinámica del sistema social, económico y cultural de la cuenca del río La Vieja (Reina, 2021).



Los bosques andinos del DCS Barbas Bremen aportan a la conectividad de la cuenca alta, media y baja del río La Vieja. Municipio Filandia, Quindío.

**Hipótesis dinámica (figura 18):** disminuir el área cultivada con café conduce a reemplazar este cultivo por otros que generen más ganancias, como el plátano o la praderización (para ganado y el turismo de descanso), afecta la disponibilidad de empleo, la generación de ingresos y la actividad turística asociada a la cultura del café; hay migración de población rural al contexto urbano en la búsqueda de tener ingresos.

Una vez construidos los modelos, se hizo el análisis de sensibilidad, el de incertidumbre o la variabilidad de los resultados por una variación determinada de los parámetros de entrada (*inputs*) requeridos en un modelo matemático. Su calibración se apoyó en herramientas e información histórica disponibles, así como la validación. Se generó una herramienta en lenguaje **Python**, que dispone de gran número de librerías de carácter libre y herramientas para la presentación en línea. Se utilizó el entorno de programación **Jupyter notebook**, dada la facilidad de presentación de resultados.

La herramienta de modelación desarrollada se presenta en el archivo denominado *gui\_MSCRV.ipynb*, que contiene el modelo social para cada ventana, las ecuaciones explicadas y el entorno gráfico desarrollado. Además, se alojó en la herramienta de muestra en línea de la desarrolladora **binder.org**, su integración con **GitHub** permite usar el modelo en línea sin descargar el software externo o librerías. Para mayor información consultar en los siguientes enlaces:



Ver más información

Ventana río Cesar-complejo cenagoso de Zapatosa



Ver más información

Ventana río San Jorge-ciénaga de Ayapel



Ver más información

Ventana río La Vieja

## 4.5.2. Escenarios y simulaciones de la modelación social

Cada modelo se centró en la principal actividad económica de las regiones de estudio y su relación con la dinámica poblacional, como ya se explicó.

El modelo calibrado es la base o el actual, y representa un escenario donde las condiciones de las variables continúan como lo muestra la información recogida. Se realizó la modelación a cincuenta años, que da un análisis tendencial más cercano a la realidad, con información de los escenarios de uso y cobertura del suelo, extractivista y sostenible, según la tabla 21.

**Tabla 21.** Porcentajes de manejo por ventana y por escenario PMEH.

Tipo Escenario	Parámetro del modelo	Zapatoosa %	Ayapel %	La Vieja %
<b>Extractivista</b>	Tasa de cambio del área agrícola.	+15%	+15%	+30%
	Tasa de cambio de área de cultivo de café.			-20%
	Tasa de cambio del área de pastos.	+15		
	Tasas de nacimiento bovino.	+15%	+15%	+20%
	Período de veda (meses).	0	0	
	Cantidad de peces capturados (por trasmallo y chinchorra, menos por atarraya).	+15%	+15%	
	Cantidad de peces capturados por atarraya.	5%		
	Oro extraído por persona.		+15%	
<b>Sostenible</b>	Tasa de cambio del área de pastos.	-15%		
	Tasa de cambio de área de cultivo de café.			-20%
	Tasa de cambio población bovina.	-15%	-15%	-20%
	Tasa de cambio del área agrícola.	-5%	=	+5%
	Período de veda (meses).	+3	9	
	Cantidad de peces capturados con trasmallo.	-15%		
	Cantidad de peces capturados con otras artes.	-5%	-15%	
	Cantidad de peces capturados con atarraya.	+15%		
	Oro extraído por persona.		-99%	

## 5. Resultados



Presentación de resultados del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive con participación de los diferentes actores que intervienen en la ciénaga de Zapatosá. El Banco, Magdalena.

### 5.1. Resultados campañas de monitoreo complejo cenagoso de Zapatosá

Como ya se explicó en el numeral 4, se realizaron tres campañas de muestreo en el complejo de Zapatosá. El análisis del material recolectado produjo un documento que contiene el proceso de colecta y análisis en detalle, denominado Análisis integral de resultados muestreos PMEH sitio demostrativo de ecohidrología complejo cenagoso de Zapatosá y que puede ser consultado en el siguiente enlace:



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

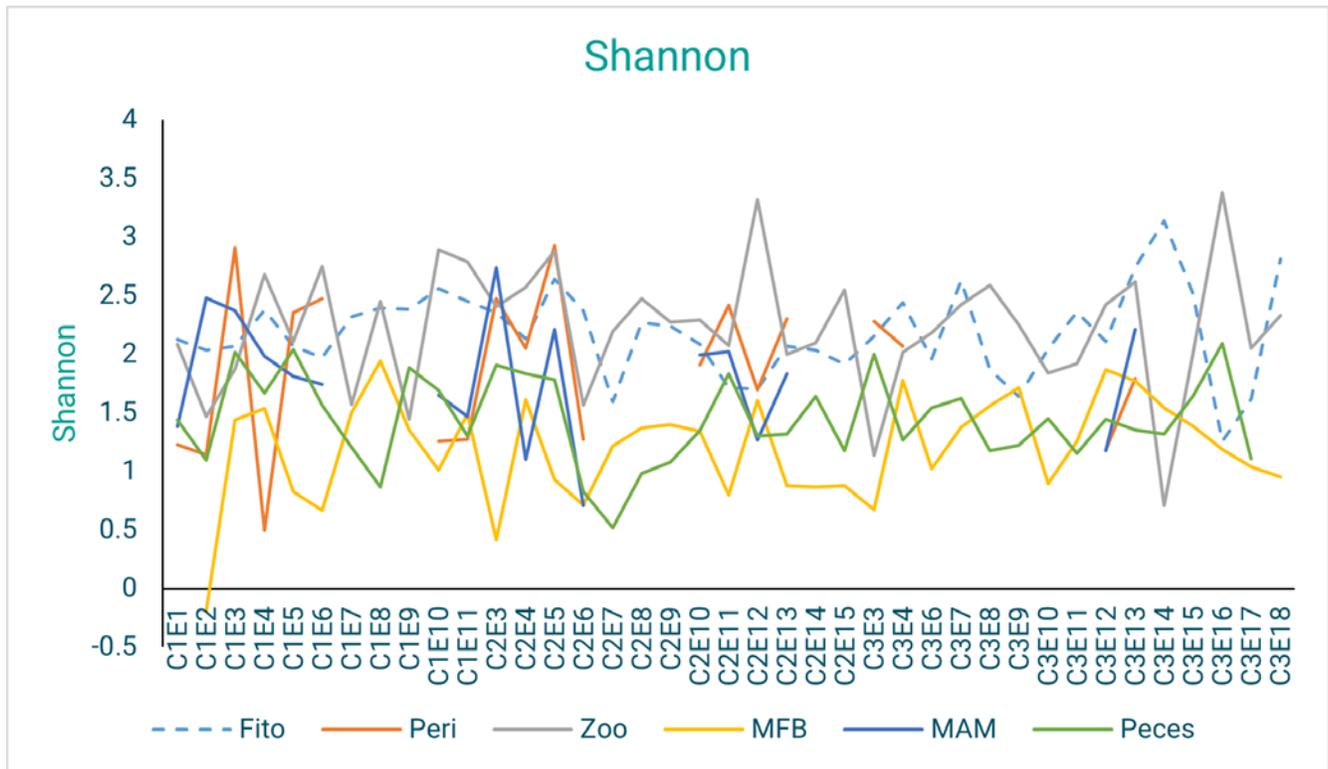
Se produjo una serie de catálogos de las especies muestreadas en las tres campañas, ilustrados con las fichas para cada uno de ellos, documentos que se pueden consultar en los siguientes enlaces:

-  • **Peces. Fichas de especies.** Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.
-  • **Microalgas y cianobacterias.** Fichas de morfoespecies. Catálogo Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.
-  • **Zooplankton.** Fichas de organismos. Catálogo Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.
-  • **Macrófitas acuáticas.** Fichas de especies. Catálogo Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.
-  • **Macroinvertebrados asociados a macrófitas acuáticas.** Fichas de especies. Catálogo Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.
-  • **Macroinvertebrados asociados a fondos blandos.** Fichas de especies. Catálogo Biodiversidad acuática del Sitio Demostrativo de Ecohidrología PHI- UNESCO, DRMI-Sitio Ramsar Complejo Cenagoso Zapatosa.

Según los análisis realizados en el CCZ, las comunidades registradas son bioindicadoras, se relacionan principalmente a condiciones de oligo, meso y eutrofización (alta carga de nutrientes), materia orgánica, turbulencia, a su preferencia o tolerancia por algún compuesto químico o bioquímico presente (Vázquez *et al.*, 2006).

De forma general, se presenta aquí un solo aspecto como producto del análisis.

## 5.1.1. Índice de Shannon



**Figura 19.** Índice de biodiversidad de Shannon ( $H'$ ) comunidades hidrobiológicas monitoreo ciénaga de Zapatosa: C1 primera campaña (06/2019); C2 segunda campaña (11/2019); C3 tercera campaña (3/2020) (PMEH, 2020).

El índice de Shannon (Figura 19) mide la diversidad y considera número total de especies y sus abundancias relativas; varía entre 0,5 y 5, por lo general entre 2 y 3, en donde 0,5- 1 es muy baja, 1- 1,8 es baja, 1,8- 2,1 es media, 2,1- 2,3 es alta y >2,3 muy alta (Ramírez, 2006). Los valores del índice de Shannon de todas las comunidades hidrobiológicas fueron comparados entre sí, sin ninguna transformación, con el fin de evaluar la posible existencia de patrones comunes. El análisis se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Interpretación índice de Shannon campañas ciénaga de Zapatosa.

Comunidad hidrobiológica	Índice de Shannon muestreos Ciénaga de Zapatosa
<b>Fitoplancton</b> (Microalgas y cianobacterias)	Condiciones de biodiversidad constantes entre estaciones y campañas. Muy diverso, con alta cantidad de morfotipos disponibles para otras comunidades, desde zooplancton, hasta peces. Hace parte de la dieta de consumidores, pero su tasa de renovación y crecimiento es muy alta (ciclos de vida cortos), que lo hace parte fundamental de la cadena trófica.
<b>Perifiton</b>	Condiciones de la biodiversidad cambian dependiendo de las estaciones y la época del año, siendo en la mayoría de los casos condiciones medias y altas. Esta comunidad tiende a ser muy diversa en los ecosistemas, donde se presenta altas tasas de renovación. Puede ser sensible a cambios fisicoquímicos, en especial a la disponibilidad de sustratos donde se desarrollan.
<b>Zooplancton</b>	Varió entre estaciones y campañas, indicativo de heterogeneidad ambiental. En el sector occidental Candelaria de la primera campaña (C1E6), la condición de la biodiversidad aumentó cuando hubo poca diversidad de depredadores, como peces e invertebrados. Un comportamiento similar se registró en el sector de Último caso (C1E10); así como en el caño Patón en la segunda campaña (C2E5) Río Cesar arriba (C2E12) y Fuera Patón de la tercera campaña (C3E17). Finalmente, los valores bajos registrados en ciénaga Saloa (C3E14) durante el estiaje se debieron a la dominancia de organismos del género <i>Brachionus</i> presentes, favoreciendo la biodiversidad del fitoplancton en esta zona.
<b>Macroinvertebrados</b> ( asociados a fondos blandos )	Mostraron valores bajos en las tres campañas. Las estaciones que presentan mayor turbiedad se encontraron con diversidades bajas, con valores altos de sólidos suspendidos totales, especialmente la campaña de marzo/20. La figura 19 muestra los valores más bajos de las comunidades analizadas y que la tendencia de variación es de forma similar a la del zooplancton, y complementaria a la de los peces.
<b>Macroinvertebrados</b> (asociados a macrófitas)	Variación asociada al sitio y a la época del año, condiciones medias y bajas. Comportamiento similar al de la comunidad de perifiton, pues ambos grupos están muy relacionados con la presencia de macrófitas, siendo este el principal ambiente en el que viven. Es difícil identificar la relación entre los peces y este grupo de macroinvertebrados. Se observa que cuando los valores de peces aumentan, los de macroinvertebrados disminuyeron y viceversa; puede deberse a que los invertebrados son el principal alimento para muchas especies ícticas, adultos y larvas, cuya disponibilidad y abundancia se favorece por la presencia de parches de vegetación.
<b>Peces</b>	<p>Campaña de junio-2019: los mayores valores de biodiversidad se presentaron en las estaciones E3 Río Cesar aguas abajo CCZ y E5 Caño Patón, los cuales, según Ramírez (2006), clasifican como media. Las demás estaciones fueron baja, a excepción de la estación E8 Influencia Cesar, con una biodiversidad muy baja.</p> <p>Campaña de noviembre-2019: la mayor diversidad se presentó en las estaciones E3 Río Cesar aguas abajo CCZ y E11 Influencia Magdalena, correspondiente a media. Las otras estaciones para esta campaña presentaron diversidad baja, salvo las estaciones E6, E7 y E8, donde fue muy baja. En la campaña de marzo-20 los mayores valores de diversidad se presentaron en las estaciones E10 Oriental-sector Último caso, E15 Ciénaga Candelaria, E6 Occidental-sector Candelaria y E7 Occidental-sector Sempegua, con una biodiversidad alta en E10, media en E6, E7, E15 y E16 Las demás estaciones presentan una diversidad baja, salvo E8, que presenta una diversidad muy baja.</p>

## 5.2. Resultados modelos tróficos Ecopath – Ecosim Zapatosa y Ayapel

La formulación de los escenarios buscó evaluar el efecto del uso de las artes de pesca sobre las biomásas de los diferentes grupos funcionales; como el efecto que, sobre la red trófica, tienen los cambios en las biomásas, a causa de la captura de peces con interés comercial.

Los resultados y detalles de las simulaciones tróficas para las dos ventanas de interés se pueden consultar en los respectivos enlaces para cada ventana:

Complejo  
cenagoso de  
Zapatosa



Ciénaga de  
Ayapel



Para mayor información descarga los documentos adjuntos. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

### 5.2.1. Ciénaga de Zapatosa

Las simulaciones dinámicas realizadas con Ecosim consideraron aspectos pesqueros y de variables ambientales que históricamente dan información sobre cambios físicos ocurridos en el sistema como en el caso de nivel, temperatura y profundidad del agua; cambios en otras variables fisicoquímicas; sedimentos y nutrientes, simulados por el equipo de hidrología del PMEH, como se planteó en la Tabla 7 del numeral 4 escenarios.

## Resultados escenarios simulados

Escenario: aumento de la actividad pesquera con redes de enmalle fija continental y de deriva continental (un año de actividad del esfuerzo pesquero).

El incremento del uso de la red de enmalle fijo produjo una reducción de la biomasa de las especies de peces de importancia pesquera y favoreció la biomasa de los grupos funcionales que constituyen sus presas más frecuentes. Por otro lado, la biomasa de especies nativas, con reconocida importancia pesquera, disminuyó considerablemente, mientras que la biomasa de especies de peces introducidas no sufre un deterioro notable.



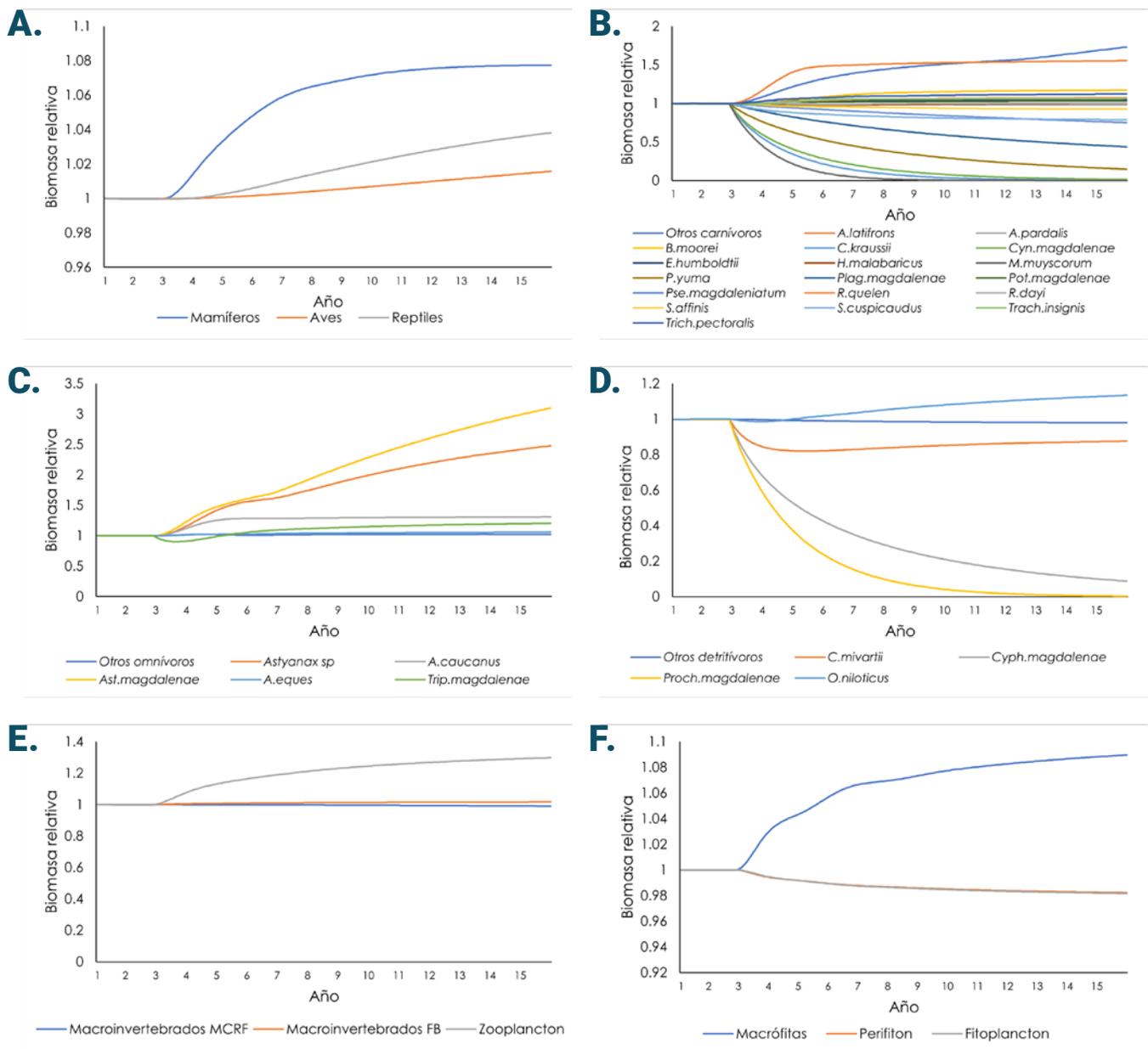
Pesca en la ciénaga de la Zapatoza. Corregimiento La Mata. Chimichagua, Cesar.

La red de enmalle fijo es el arte de pesca más utilizado y que más impacta el ecosistema, plantear su restricción o incremento muestra el beneficio potencial o afectación de la medida para toda la red trófica por su efecto sobre los depredadores, que son la mayoría de las especies de interés pesquero. En la modelación se les asigna un nivel trófico alto, por el impacto en sus presas y los niveles tróficos inferiores. Las estrategias de uso sostenible de las artes de pesca protegen la red trófica, el recurso pesquero y a las especies de importancia ecológica.

Los escenarios se simularon a un año, con proyección a quince años, para ver el comportamiento de las biomásas de los grupos funcionales después de ese tiempo del esfuerzo pesquero a simular. Se observó que quince años simulados no es suficiente para que los grupos funcionales modelados recuperen sus biomásas, a como se encontraron en las condiciones iniciales.

Se trabajaron cuatro especies, para evaluar los impactos de la pesca en el tiempo, escogidas por ser migratorias, de gran valor comercial y sociocultural; son de la pesquería en la ciénaga y en la cuenca del río Magdalena tienen respuesta diferente, en el tiempo requerido para mostrar cambios en su biomasa, como en su magnitud: el nicuro (*P. yuma*) muestra una respuesta más rápida y de mayor magnitud; le siguen el bagre (*Pseudo. magdaleniatum*) y el blanquillo (*S. cuspicaudus*). El bocachico (*Proch. magdalenae*) tiene una respuesta lenta y de menor magnitud.

Plantear políticas de manejo del ecosistema sobre los resultados de las simulaciones de los escenarios exige un abordaje integral de cuenca con las contribuciones ecológicas locales del proyecto y aspectos de mayor escala; especies migratorias requieren soluciones de manejo para todas las etapas de su ciclo de vida, que no es solo local.



**Figura 20.** Respuesta de la biomasa relativa por categorías al escenario de incremento del 100% del uso de red de enmalle fijo. a) consumidores cuaternarios, b) consumidores terciarios, c) consumidores secundarios, d) vertebrados consumidores primarios, e) invertebrados consumidores primarios, f) productores primarios (Gutiérrez, 2021).

La Figura 20 muestra la respuesta de la biomasa relativa por categorías de grupos funcionales. En los consumidores cuaternarios, los mamíferos tienen el mayor incremento de la biomasa, de 1.8; sigue un incremento gradual de los reptiles y las aves en el horizonte de modelación. Algunos grupos funcionales de consumidores terciarios tienden al descenso, la mayoría con una respuesta débil al incremento del uso de la red (*Brycon moorei*, *T. pectoralis*, *Trachelyopterus insignis*, *Roeboides dayi* y *Salminus affinis*); dos grupos funcionales mostraron un incremento gradual hasta el quinto año de modelación. El grupo funcional de otros carnívoros mostró un crecimiento gradual y sostenido durante el horizonte de modelación, mientras que el incremento de *Aequidens latifrons* se mantuvo hasta el quinto

año y se estabilizó. Los consumidores secundarios, con una tendencia de incremento en las especies *Astyanax* sp. y *Ast. magdalenae*, con una biomasa relativa de 2.48 y 3.1, respectivamente. Los vertebrados considerados consumidores primarios disminuyeron su biomasa, con valores cercanos a cero hacia el final de la modelación, para las especies *Proc. magdalenae* y *Cyp. magdalenae*.

Las especies restantes tuvieron variaciones moderadas de las biomásas. De los invertebrados consumidores primarios, solo el zooplancton mostró un incremento en la biomasa, llegando a 1.29 t/km<sup>2</sup>. Los macroinvertebrados se presentaron sin variación. Las macrófitas (productores primarios), mostraron un incremento en la biomasa, la cual llegó a 1.09 t/km<sup>2</sup>; el perifiton y el fitoplancton, un leve descenso.

## **Escenario: niveles históricos medios del agua**

Las variaciones del nivel del agua impactan a los productores primarios; influyen en la penetración del sol y el desempeño fotosintético de los grupos funcionales; indirectamente influye en niveles tróficos superiores dependientes del desempeño y la capacidad metabólica de los grupos basales; los rasgos ecológicos de cada grupo influyen en estos efectos.

Se utilizó el forzante nivel medio histórico del agua en un horizonte de quince años de simulación, serie de 45 años comprendida entre 1972 y 2017. En el caso de las algas influye en la cantidad de luz que penetra en la columna de agua y, por tanto, en el proceso de fotosíntesis; determina la disponibilidad de hábitat y la densidad de la cobertura de macrófitas; se aplicó al fitoplancton, perifiton y macrófitas y se analizó el efecto indirecto en los demás grupos.

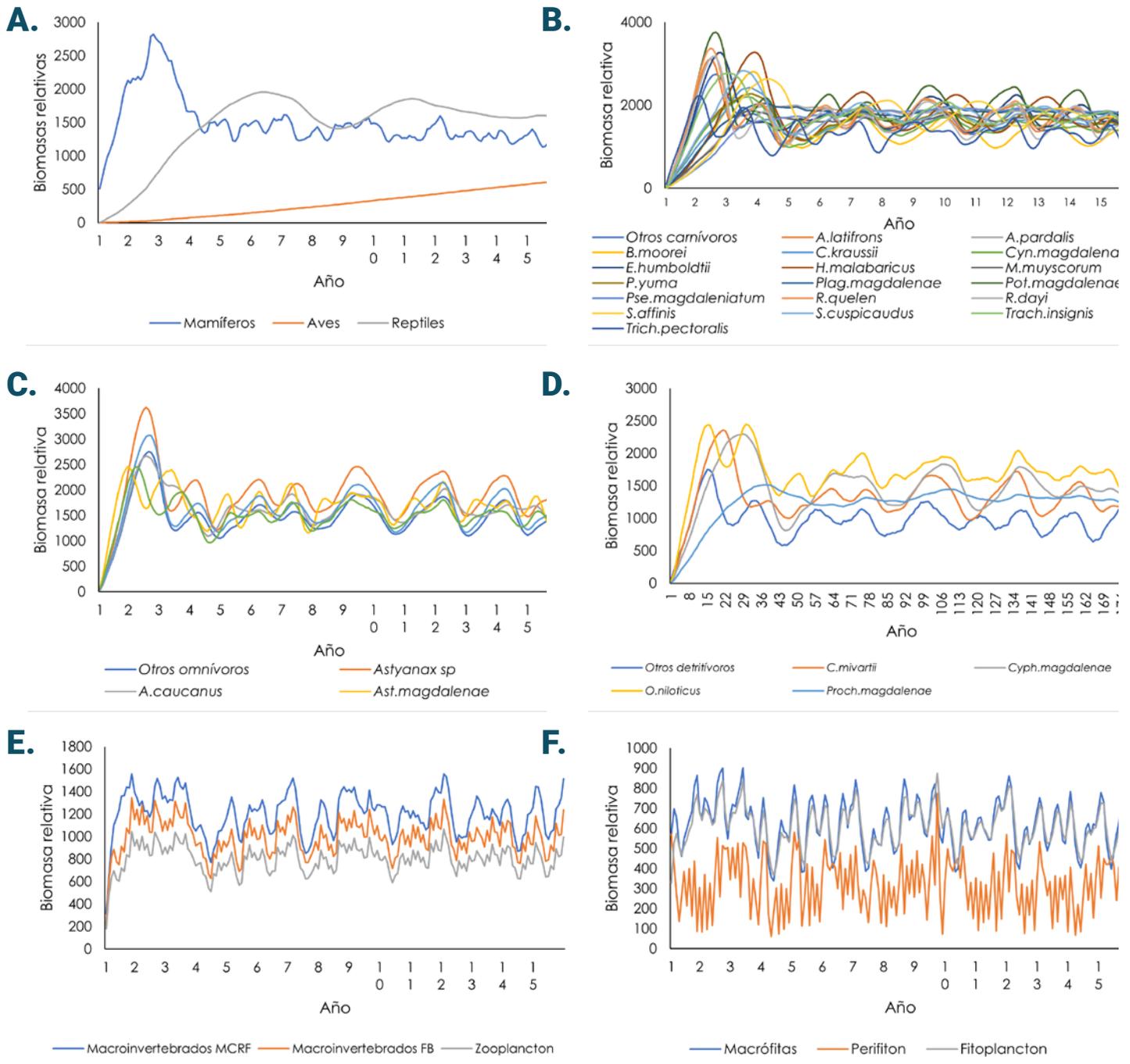
En los grupos funcionales con respuestas más lentas a los cambios de nivel, como los vertebrados (peces, mamíferos y reptiles), con ciclos de vida más largos y estrategias reproductivas más elaboradas, se demoran en incorporar los cambios en las condiciones ambientales. Mientras que los organismos de respuestas más rápidas, como los productores primarios (perifiton, fitoplancton y macrófitas) y los invertebrados considerados en el modelo (zooplancton, macroinvertebrados asociados a fondos y a macrófitas), que presentan ciclos de vida más cortos, responden más rápidamente a las variaciones medioambientales.

La Figura 21 muestra este patrón de respuesta lenta y rápida. Los consumidores cuaternarios, como los grandes vertebrados (mamíferos, aves y reptiles), con la más lenta y atípica en el caso de las aves, que no presentó tendencia senoidal, sino crecimiento moderado y lineal.

Para los consumidores terciarios, representados por especies de peces, hay la respuesta senoidal y lenta. Igual se registró en los consumidores secundarios y vertebrados primarios. Finalmente, los invertebrados consumidores y productores primarios, con ciclos de vida cortos, presentaron tendencia senoidal, pero con respuesta rápida.

La respuesta directa de los grupos funcionales a los cambios históricos del nivel del agua se relaciona con sus rasgos ecológicos. Los grupos funcionales de la base de la red trófica, con niveles tróficos menores, ciclos de vida más cortos, responden rápidamente a los cambios

del nivel del agua. Los organismos con mayores niveles tróficos, región superior de la cadena, con ciclos de vida más largos, se demoran en responder a las variaciones del nivel. Cuando los grupos de la base de la cadena responden a las variaciones de nivel, cambian sus biomazas, afectan su configuración y la oferta de alimento de los niveles tróficos más altos.



**Figura 21.** Respuesta de la biomasa relativa por categorías a las variaciones del nivel histórico del agua. a) consumidores cuaternarios, b) consumidores terciarios, c) consumidores secundarios, d) vertebrados consumidores primarios, e) invertebrados consumidores primarios, f) productores primarios (Gutiérrez, 2021).

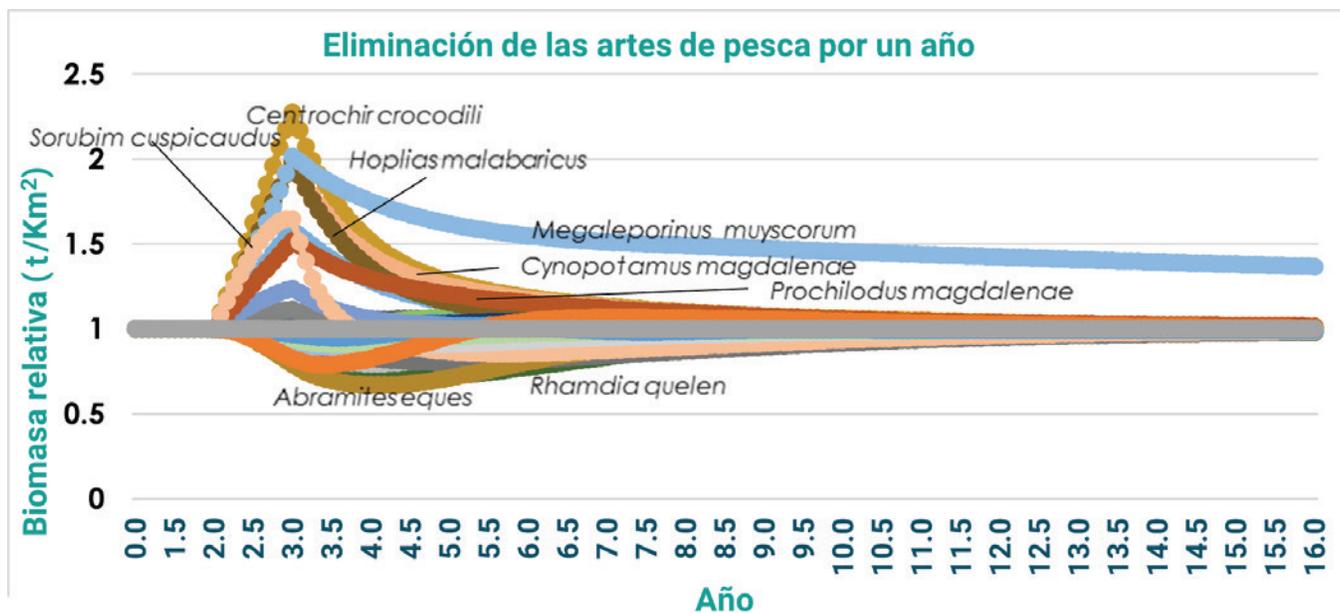
## 5.2.2. Ciénaga de Ayapel

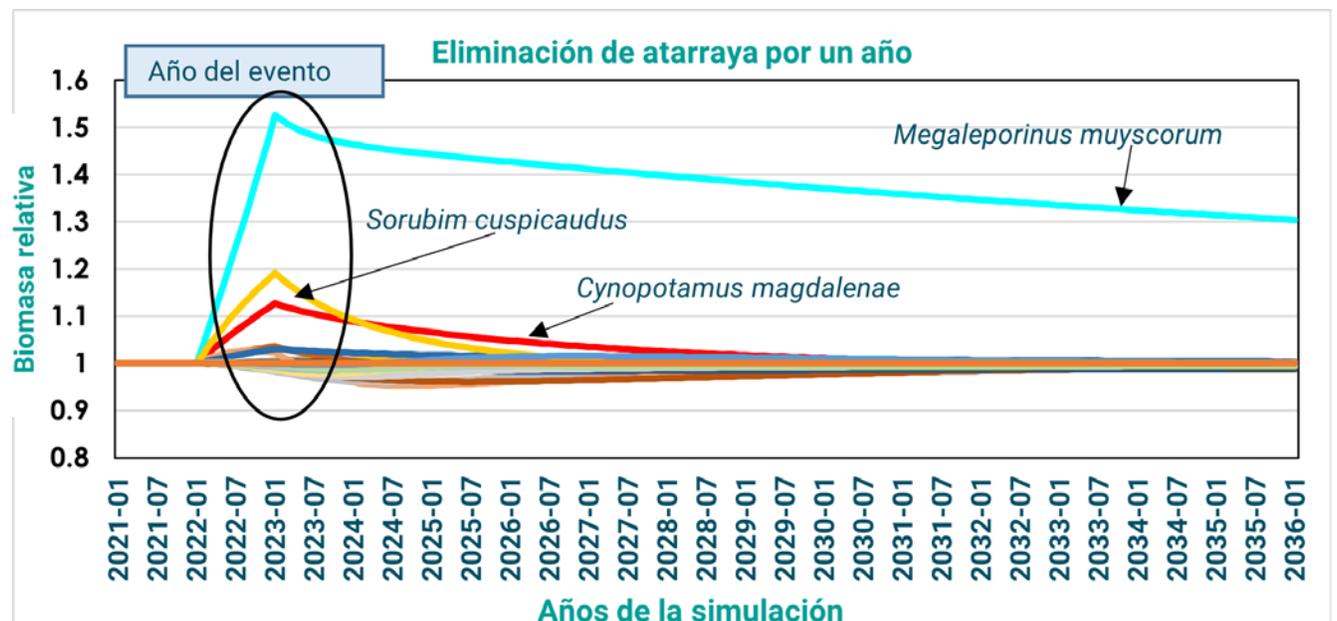
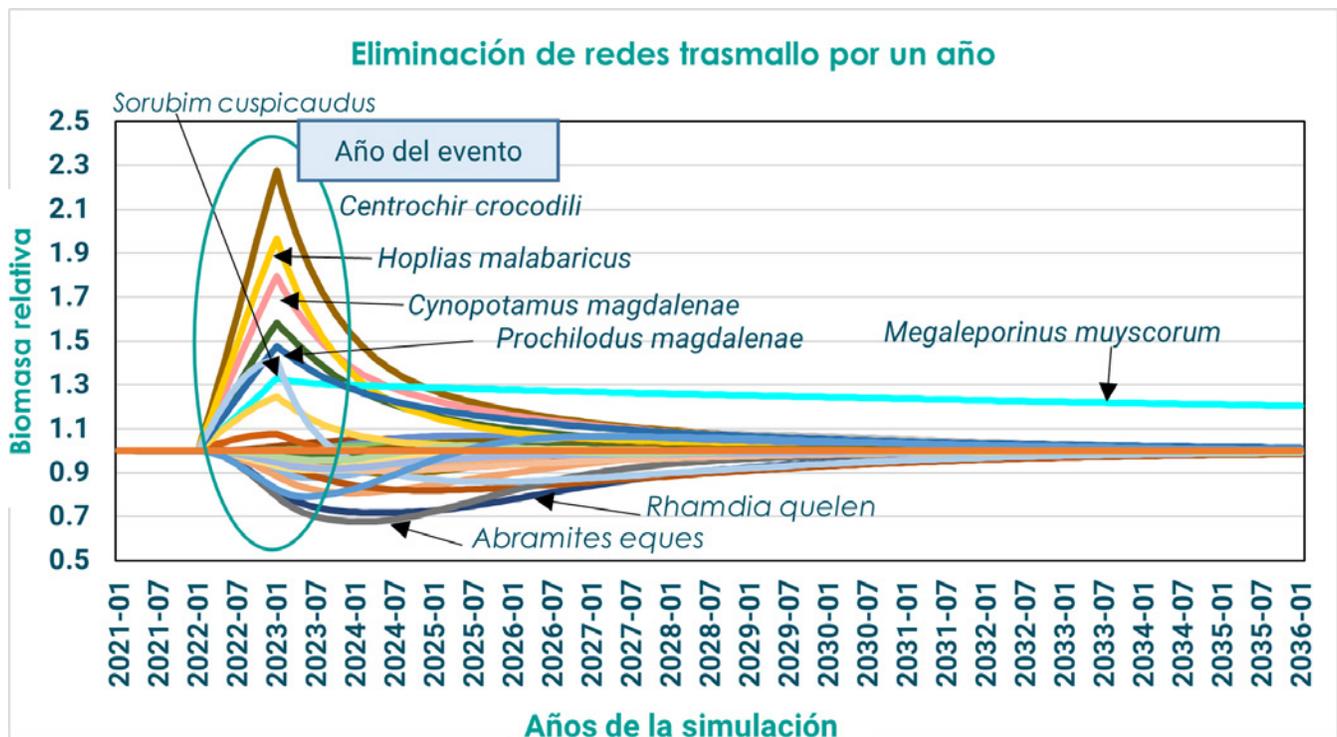
De lo planteado en la Tabla 21, se escogieron los resultados de dos simulaciones. Resultados escenarios simulados.

### Escenario: eliminación de artes de pesca simuladas (atarraya, palangre calandrio, redes de enmalle fija continental y de deriva continental). Eliminación de las artes de pesca por un año.

La Figura 22 muestra los escenarios de simulación donde se eliminan las artes de pesca (atarraya, palangre calandrio, red de enmalle de deriva continental y red de enmalle fija continental), en un esfuerzo de un año, y el escenario donde se eliminan las redes de enmalle por el efecto adverso sobre la ciénaga y la atarraya, la más amigable con el ecosistema.

Para la eliminación de todas las artes de pesca varios de los grupos funcionales se ven favorecidos, pues sus biomazas ( $t/km^2$ ) aumentan; es el caso de *Centrochir crocodili*, *Hoplias malabaricus*, *Sorubim cuspicaudus* (blanquillo), *Megaleporinus muyscorum* (dentón), *Prochilodus magdalenae* (bocachico) y *Cynopotamus magdalenae* (chango).





**Figura 22.** Simulación donde se elimina las artes de pesca en el complejo cenagoso de Ayapel durante un año, proyectado a quince años (Poloche PME, 2021).

En los quince años proyectados los grupos vuelven a sus condiciones iniciales, excepto *M. muyscorum*, el cual aumenta su biomasa y se mantiene constante durante la simulación. *Rhamdia quelen* y *Abramites eques* son los grupos más afectados: sus biomásas disminuyen a la mitad.

En la eliminación de las redes de trasmallo por un año, los grupos favorecidos aumentan durante el año de exclusión de estos artes: *M. muyscorum* (dentón) presenta aumento leve en su biomasa; *C. magdalenae*, *R. quelen* y *A. eques* disminuyen durante el año. Todos los grupos

recuperan sus condiciones iniciales alrededor del año diez de la proyección.

El aumento de las biomásas de varios grupos funcionales es notorio durante el tiempo de esta restricción, comparado con el impacto generado con la atarraya.

La atarraya, arte de pesca artesanal selectivo, captura determinadas especies, según el ojo de la malla, reglamentada por la Aunap; se recomienda por el poco impacto que genera en la dinámica de los grupos funcionales en el tiempo. Al eliminarse este arte por un año, solo unos cuantos grupos funcionales, como el blanquillo (*Sorubim cuspicaudus*), chango (*Cynopotamus magdalenae*), nicuro (*Pimelodus yuma*) y dentón (*Megaleporinus muyscorum*) logran aumentar levemente sus biomásas. Los demás grupos se mantienen durante el evento, y casi todos vuelven a sus condiciones iniciales.

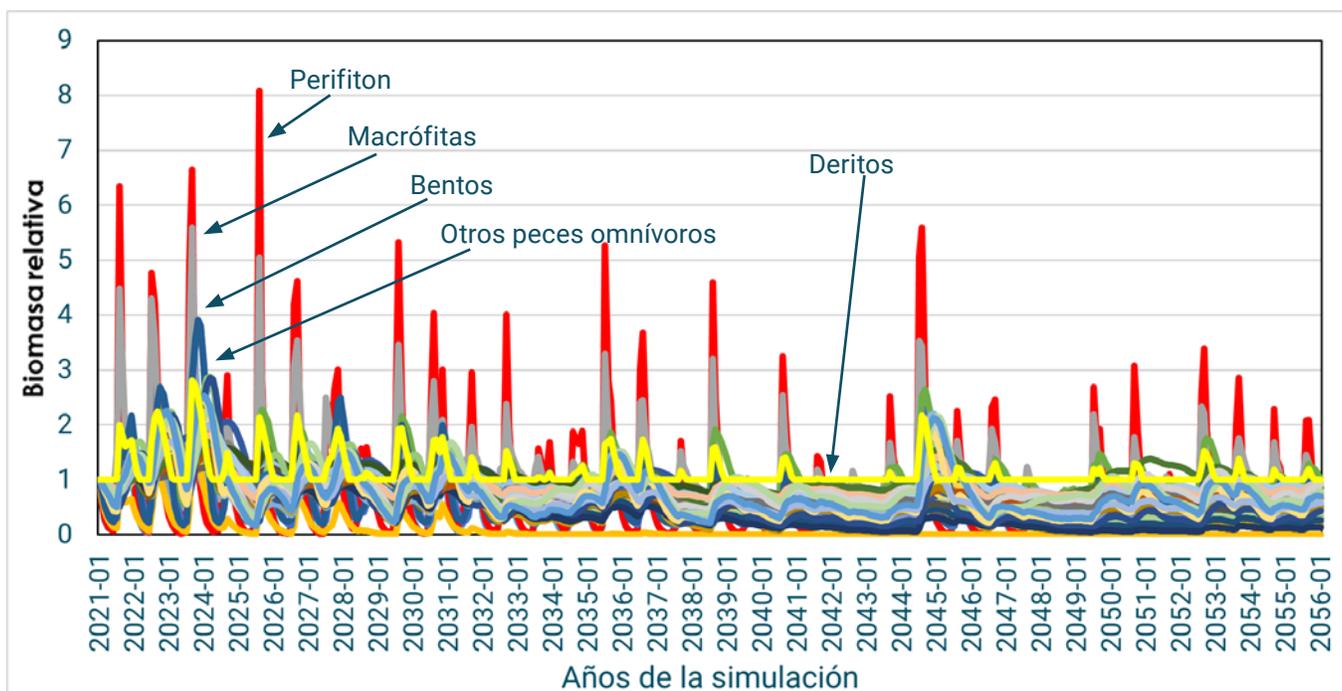
## **Escenario: variables fisicoquímicas forzantes de nitrógeno, fósforo, sedimentos y oxígeno disuelto en el complejo cenagoso de Ayapel.**

Se utilizaron los datos de salida del escenario de cambio climático RCP 4.5 y las series de tiempo desde el 2020 al 2055, para no subestimar o sobreestimar la dinámica de los grupos.

Las variables forzantes son concentración de sedimentos (mg/l), fósforo orgánico (ppm), nitrógeno orgánico (ppm) y oxígeno disuelto (ppm), aplicadas a los grupos productores, (fitoplancton, perifiton y macrófitas), importantes en la sostenibilidad del ecosistema y sensibles a cambios en sus concentraciones. El oxígeno tiene variabilidad cíclica, según el pulso de inundación, bajo en estiaje (descomposición materia orgánica vegetal) y alto en crecientes (abundancia de materia vegetal).

Casi todos los grupos funcionales aumentan sus biomásas con respecto a la condición inicial, presentando fluctuaciones según los periodos hidrológicos, ya que en los forzantes fisicoquímicos su variabilidad depende del período hidrológico evaluado. En aguas en ascenso y altas hay mayor concentración de nitrógeno, fósforo, oxígeno y de sedimentos por las lluvias, que arrastran material alóctono de otras partes y se deposita en el cuerpo principal de la ciénaga, cambiando las propiedades fisicoquímicas. En aguas en descenso y bajas de la ciénaga, estas concentraciones son menores. Muchos de estos elementos se incorporaron a la red trófica en los periodos de abundancia. La concentración de oxígeno es menor en niveles mínimos. Se destinó a la respiración de los organismos y a la oxidación de la materia orgánica, elevada en estos periodos por pérdida de conectividad del sistema. El comportamiento conjunto de los grupos funcionales simulados bajo estas condiciones se muestra en la Figura 23.

Los grupos funcionales sobresalientes son el perifiton, las macrófitas, los bentos y los insectos terrestres, pues sus biomásas son sensibles y responden rápidamente a los cambios en las condiciones fisicoquímicas del agua. Los productores como el perifiton y las macrófitas son los grupos más beneficiados, sus biomásas aumentan por encima de cuatro veces respecto a las condiciones iniciales, fluctuando en los ciclos hidrológicos anuales. Los picos altos son los niveles máximos, en los que las biomásas se incrementan por la disponibilidad de nutrientes. En los periodos de estiaje la presencia de nutrientes en el sistema es baja, disminuyendo la biomasa de estos grupos, como un factor limitante.



**Figura 23.** Comportamiento de biomasa de grupos funcionales en el escenario de variables forzantes de sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos y oxígeno disuelto, obtenidos del escenario de cambio climático RCP 4.5, en el complejo cenagoso de Ayapel, proyectado a 35 años (Poloche PME, 2021).

### 5.3. Resultados modelos hidrológicos

Los resultados de todas las simulaciones y el procesamiento de la información para el río Cesar y río San Jorge se pueden consultar en los dos enlaces mencionados en el numeral 4.

Dos scripts generaron todas las figuras presentadas en los resultados para las dos cuencas. El primero (tres resoluciones.R) tomó únicamente los datos del archivo *output.rch* para construir hidrogramas. También se construyó la curva duración de caudales y se realizaron los diagramas de cajas y bigotes (*box plots*) de cada variable, en las tres escalas temporales y los diagramas de cajas de la variabilidad intra-anual de cada variable obtenida por el SWAT.

Se obtuvieron los escenarios futuros requeridos para la modelación hidrológica en las tres cuencas río Cesar y San Jorge, coberturas conservacionista, tendencial y extractiva, río La Vieja coberturas tendencial, agrícola y conservacionista y los dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5), con un rango de tiempo 2006 a 2099. Los números 45 y 85 al final corresponden a los RCP explicados en el numeral 4.

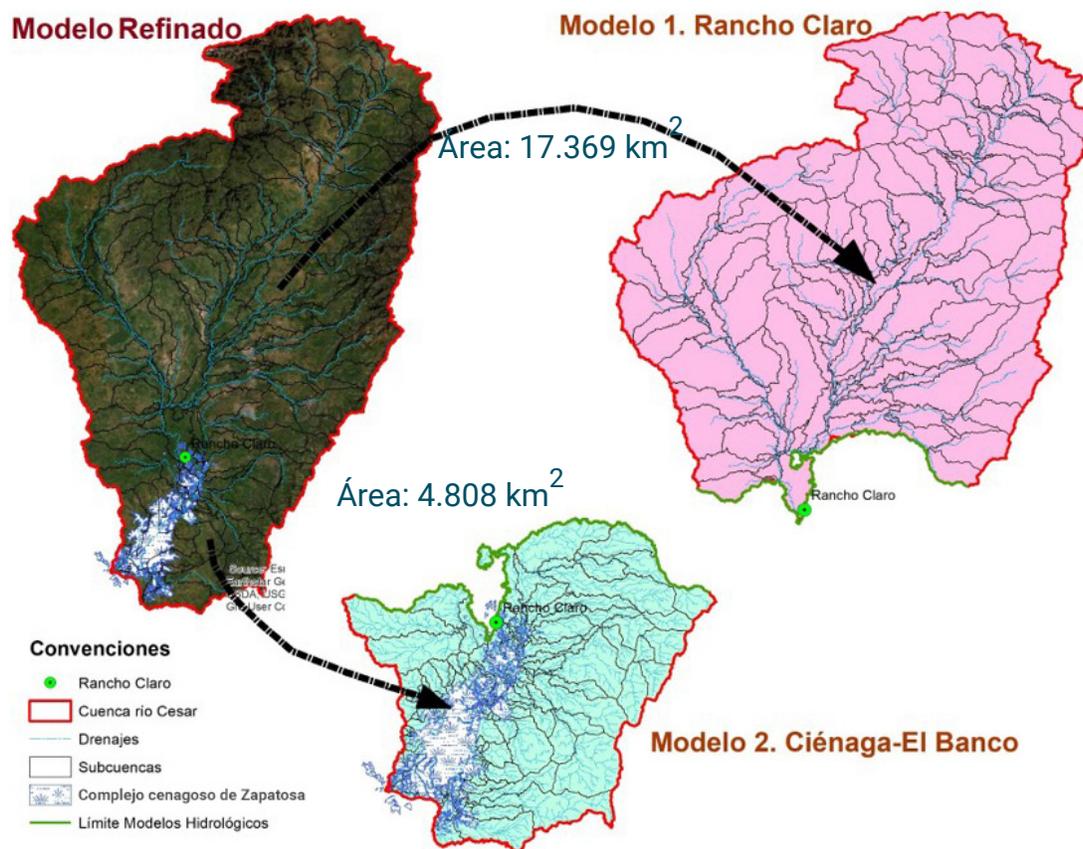
El modelo base es el modelo calibrado y validado de cada ventana, que corresponde a los insumos de coberturas y series climatológicas periodo histórico 1985–2018. Los escenarios futuros salen del modelo histórico calibrado al que se introducen los insumos de escenarios futuros, según proyecciones de cambio climático, cambio en el uso y cobertura del suelo, y la demanda hídrica estimada para los años 2030, 2050 y 2099.

- **Escenario base:** Base
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático estable 4.5:** 30Cons4.5
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático creciente 8.5:** 30Cons8.5
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático estable 4.5:** 30Extrac4.5
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático creciente 8.5:** 30Extrac8.5
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático estable 4.5:** 30Tend4.5
- **Proyección 2030, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático creciente 8.5:** 30Tend8.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático estable 4.5:** 50Cons4.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático creciente 8.5:** 50Cons8.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático estable 4.5:** 50Extrac4.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático creciente 8.5:** 50Extrac8.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático estable 4.5:** 50Tend4.5
- **Proyección 2050, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático creciente 8.5:** 50Tend8.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático estable 4.5:** 100Cons4.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo conservacionista, cambio climático creciente 8.5:** 100Cons8.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático estable 4.5:** 100Extrac4.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo extractivista, cambio climático creciente 8.5:** 100Extrac8.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático estable 4.5:** 100Tend4.5
- **Proyección 2100, escenario uso del suelo tendencial, cambio climático creciente 8.5:** 100Tend8.5

### 5.3.1. Escenarios para la cuenca del río Cesar

La cuenca se dividió en dos cuencas menores (Figura 24) para detallar mejor la modelación, especialmente en el sector aledaño a la ciénaga de Zapatosa, de muchos afluentes.

Las simulaciones de proyecciones son de aproximadamente 94 años (2006-2100). Se crean tres periodos de análisis: periodo del 30 (2019-2039), periodo del 50 (2040-2069) y periodo del 100 (2070-2100); este manejo evita que los resultados de 94 años atenúen algún comportamiento importante; cuanto más al futuro se simulen o generen datos, la incertidumbre aumenta y puede alterar los valores de las proyecciones más cercanas a la fecha actual, década del 2020-2029. Algunos resultados de las simulaciones se analizan a continuación (ver Figura 25).

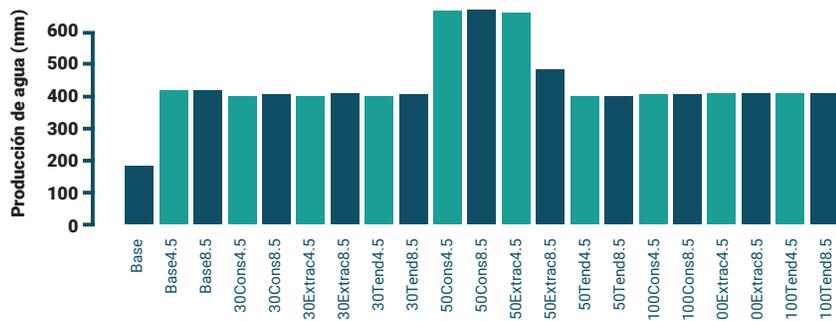


**Figura 24.** Cuenca río Cesar división en dos cuencas menores (PMEH, 2020).



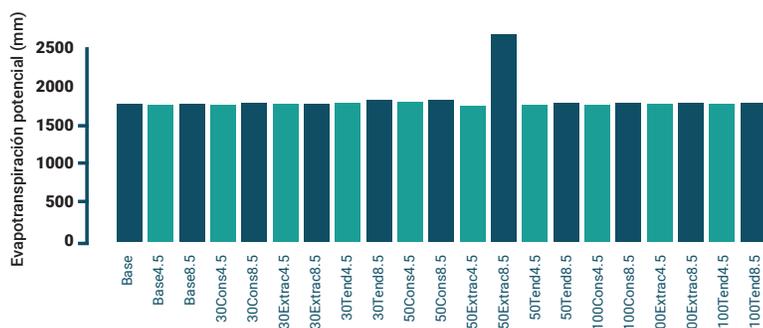
Para mayor información descarga los documentos adjuntos. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

# Subcuenca río Cesar Rancho Claro:



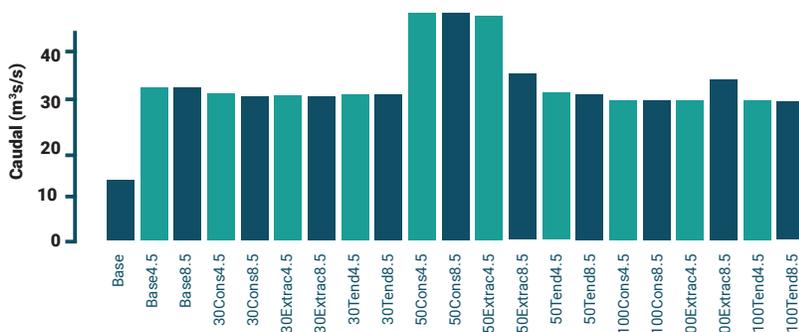
Producción de agua (mm) de escenarios 2006 - 2009 y modelo base en Rancho Claro

En todos los periodos la producción de agua es muy superior al modelo base, siendo el doble en la mayoría de los escenarios y mucho más en 50Cons4.5. En el periodo 2019-2039 se evidencia la diferencia entre escenarios de cambio climático. 4.5 y 8.5, ya que la precipitación es superior para el RCP 8.5.



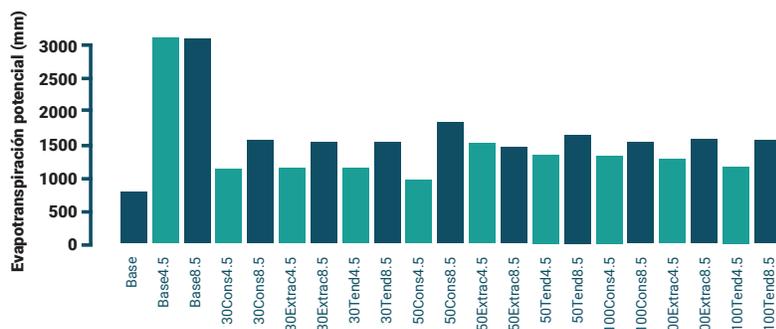
Evapotranspiración potencial (mm) de escenarios 2006-2009 y modelo base en Rancho Claro

La evapotranspiración potencial es estable en la mayoría de los escenarios, con excepción en el escenario 50Extract8.5, y muy baja en el 50Cons4.5. También los valores son muy similares entre los diferentes periodos analizados.



Caudal (3m/s) de escenarios 2006-2009 y modelo base en Rancho Claro

El caudal superficial tiene valores superiores al modelo base en todos los escenarios futuros. En el periodo de 2019 a 2039 se evidencian las diferencias entre RCP 4.5 y RCP 8.5. Los modelos 50Cons y 50Extrac presentan mayores caudales medios.



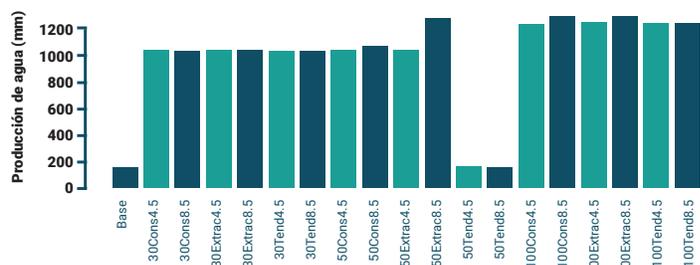
Sedimentos carga (kt) de escenarios 2006-2009 y modelo base en Rancho Claro

La carga de sedimentos en el periodo 2070-2098 es más variable entre escenarios futuros y con valores un poco menores para los escenarios 50tend4.5 y muy superiores frente al valor de 1000 kt del modelo base. Los modelos con series de precipitación y temperatura de RCP 8.5 tienen mayor carga de sedimentos.

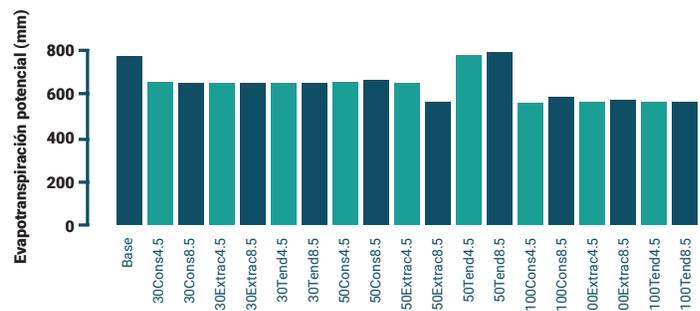
Figura 25. Resumen resultados escenarios hidrológicos río Cesar-Rancho Claro (Cañón PME, 2021).

## Subcuenca río Cesar-ciénaga El Banco:

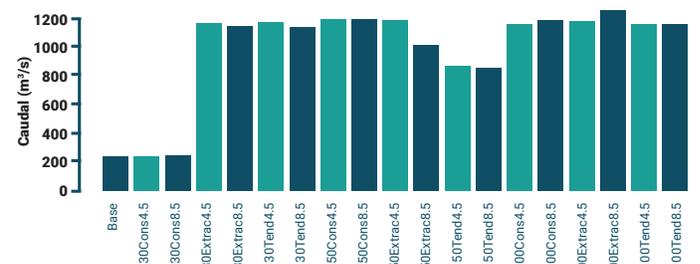
Para los modelos de uso y cobertura del suelo en la cuenca, en los escenarios tendenciales el aumento de la frontera agropecuaria es gradual; las actividades de ganadería bajan el desarrollo en la cobertura de pastos limpios y hay un mayor incremento en cultivos agroindustriales (palma). La cobertura boscosa presenta una pérdida considerable, comparada con las tasas de cambio de la cobertura de pastos limpios y palma. En los escenarios conservativos se privilegia la conservación y preservación de la cobertura natural, para reducir las tasas de deforestación en un 20%.



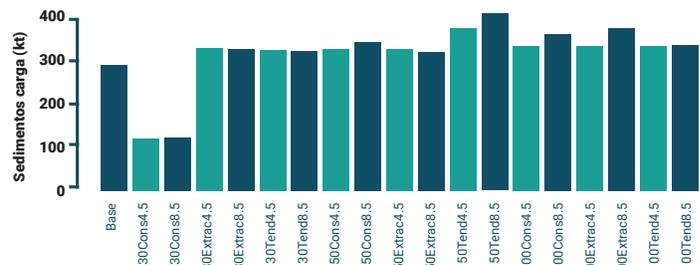
Producción de agua (mm) de escenarios 2006 - 2098 y modelo base en ciénaga El Banco



Evapotranspiración potencial (mm) de escenarios 2006 - 2098 y modelo base en ciénaga El Banco



Caudal (m³/s) de escenarios 2006 - 2098 y modelo base en ciénaga El Banco



Sedimentos carga (kt) de escenarios 2006 - 2098 y modelo base en ciénaga El Banco

La producción de agua del modelo base, menor a 200 mm, se asemeja a la del escenario 50 tend4.5 y es un poco menor a la del escenario 50tend8.5. Los otros escenarios son iguales o superiores a 1000 mm, logrando 1200 mm en las proyecciones a 100 años en los escenarios conservacionista, extractivista y tendencial.

La evapotranspiración real o actual (mm) registra cerca de 800 mm en el modelo base. Los modelos 50tend4.5 y 50tend8.5 tienen valores similares. Los valores menores de evapotranspiración actual se presentan en la cobertura extractivista año 2100.

Los Caudales son ampliamente mayores que el modelo base, en todos los escenarios futuros, excepto en los escenarios a 2030 conservacionista, cambio climático 4.5 y 8.5.

La carga de sedimentos (kt) entre los 4 periodos es muy similar, pero hay diferencias entre otros escenarios en un mismo periodo: Los modelos 30 cons4.5 y 30cons8.5 presentan una tercera parte de la carga de sedimentos del modelo base.

**Figura 26.** Resumen resultados escenarios hidrológicos. Río Cesar-ciénaga El Banco (Cañón PME, 2021).

## 5.3.2. Escenarios para la cuenca del río San Jorge

El caudal del modelo base (Figura 27), evidencia los mayores valores sobre las subcuencas que corresponden al propio cauce del río. Hay un comportamiento similar en los demás escenarios señalados en las figuras 28 y 29 de los escenarios 50Extract4.5 y 50Tend4.5.

Q m3 s modelo San Jorge escenario base

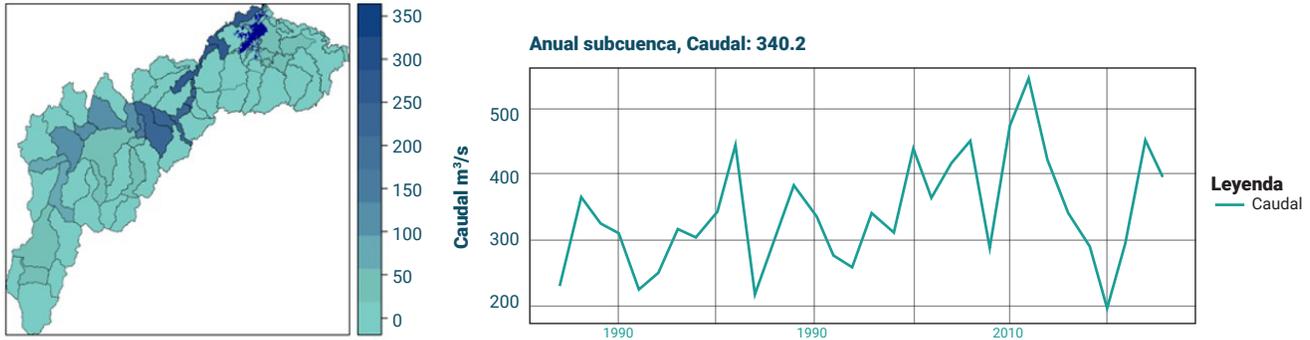


Figura 27. Caudales anuales m³/s salida modelo San Jorge Base (Cañón, 2021).

Q m3 s modelo San Jorge escenario base 50Extract4.5

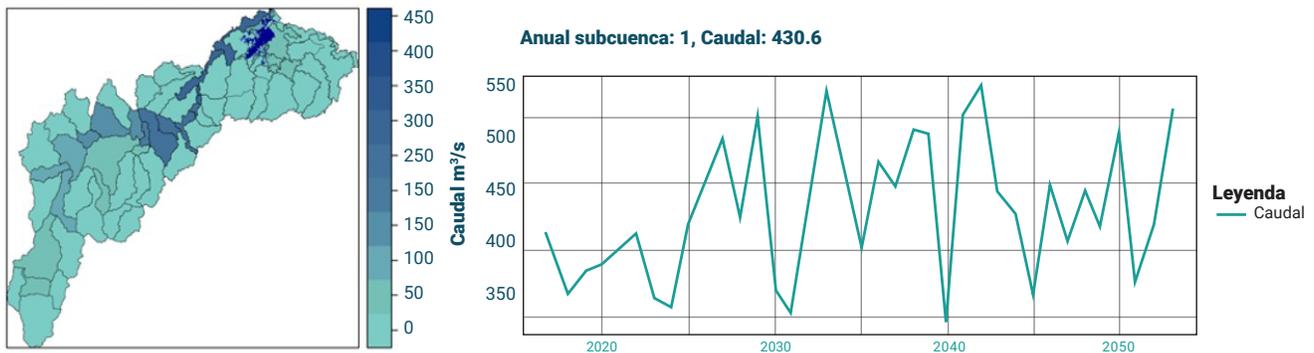


Figura 28. Caudales anuales m³/s salida modelo San Jorge 50Extrac4.5 (Cañón, 2021).

Q m3 s modelo San Jorge Escenario 50Tend4.5

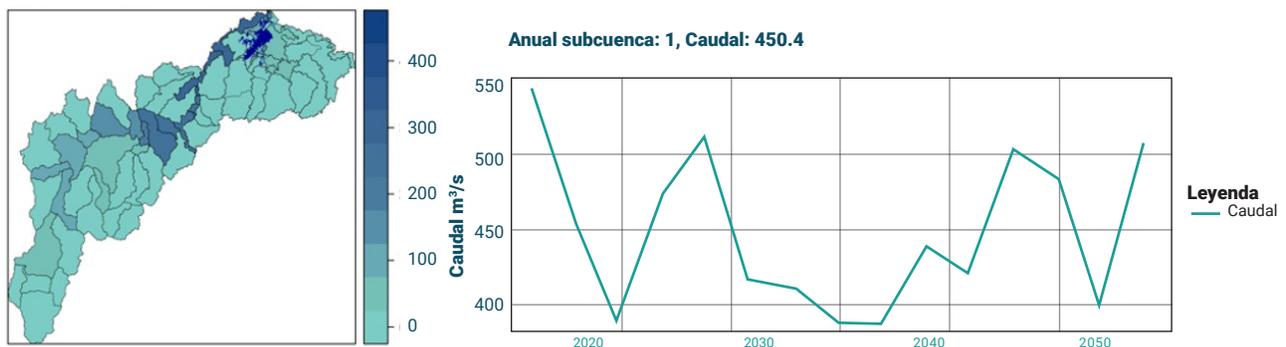
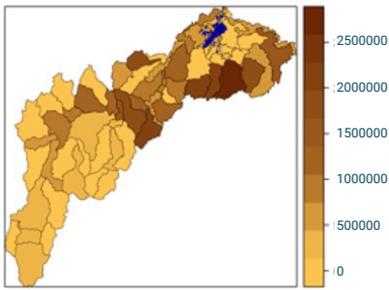


Figura 29. Caudales anuales m³/s salida modelo San Jorge 50Tend4.5 (Cañón, 2021).

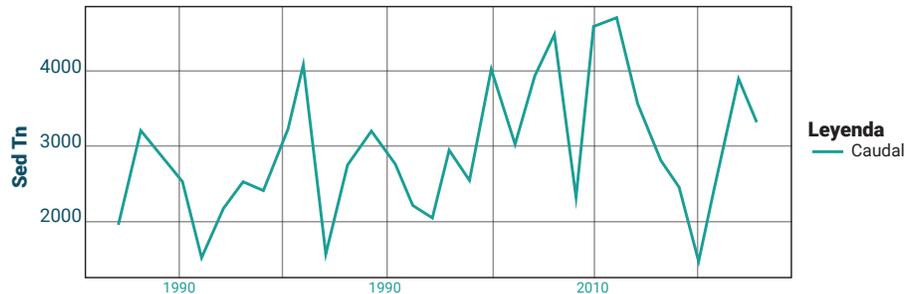
La producción de agua del modelo base es de 1500 mm; los valores de los escenarios son mayores que el periodo base en 300 y hasta 500 mm más, excepto el modelo 100tend4.5.

La carga de sedimentos (figuras 30, 31 y 32) se hace mayor en la zona aferente de caño Barro y caño Muñoz, zona oriental de la ciénaga de Ayapel. El modelo base genera menor carga de sedimentos frente a los dos escenarios, pero la simulación futura de cobertura tendencial genera más sedimentos que la extractiva.

Q m3 s modelo San Jorge escenario base

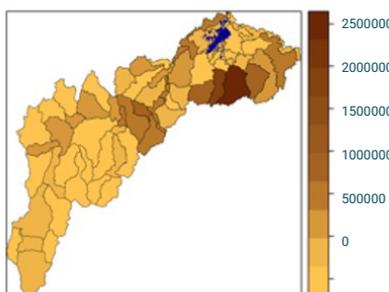


Anual subcuenca: 1, Sed: 2884.2

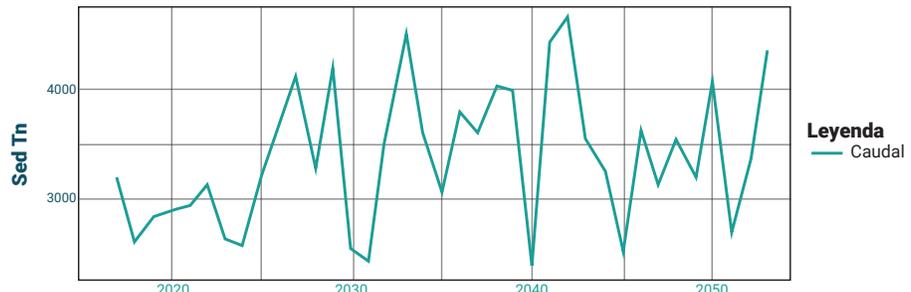


**Figura 30.** Carga de sedimentos toneladas anuales salida modelo San Jorge base (Cañón, 2021).

Q m3 s modelo San Jorge escenario base

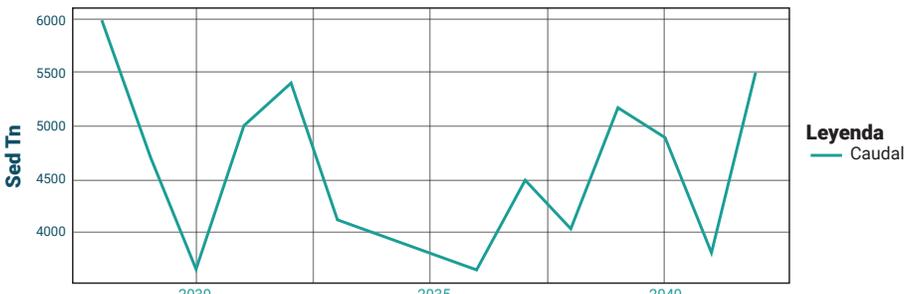
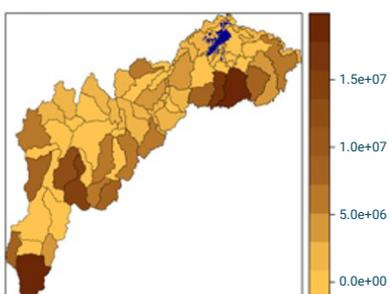


Anual subcuenca: 1, Sed: 2884.2



**Figura 31.** Carga de sedimentos, toneladas anuales salida, modelo San Jorge 50Extract4.5 (Cañón, 2021).

Q m3 s modelo San Jorge escenario 50Tend4.5 Anual subcuenca: 1, Sed: 4549.6



**Figura 32.** Carga de sedimentos, toneladas anuales salida, modelo San Jorge 50Tend4.5 (Cañón, 2021).

Los sedimentos, en carga (kt) y en producción (t/ha), se ven afectados por los cambios hidrológicos simulados. El modelo base simula una carga alrededor de 600 kt año promedio anual de todas las subcuencas, valor cercano en cinco escenarios relacionados con las coberturas del año 2050. Ellos son: 50Cons4.5, 50Cons8.5, 50Extrac4.5, 50Extract8.5 y 50Tend4.5. Los demás escenarios están produciendo hasta seis o siete veces más sedimentos.



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

### 5.3.3. Escenarios para la cuenca río La Vieja

Se modelaron los escenarios de cambio climático, uso y cobertura del suelo para la cuenca del río La Vieja. Los resultados detallados se pueden consultar en el siguiente enlace:



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

Escenarios de cambio climático y cambio de uso y coberturas del suelo:

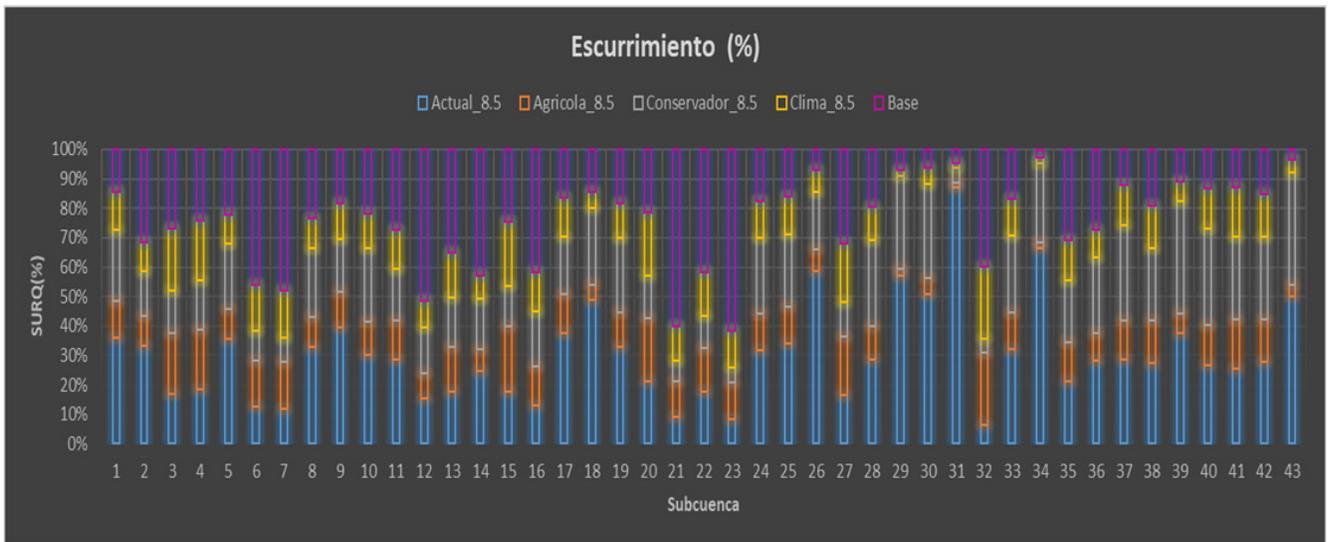
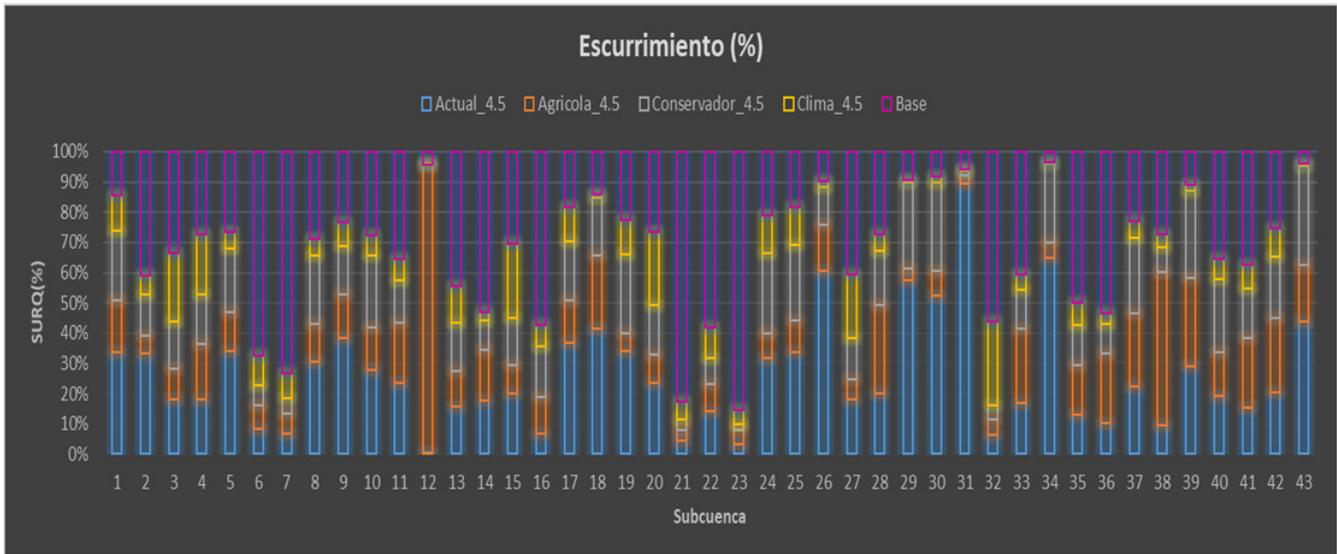
Se montaron 3 simulaciones (2025, 2030, 2050, 2100), con base en las coberturas de la tierra: conservacionista, agrícola y actual o tendencial, combinadas con las proyecciones de clima (RCP 4.5 y RCP 8.5 en el periodo futuro [2016-2100]).

### Escorrentía superficial multianual

Para la escorrentía superficial multimensual, (figuras 33 y 34) se observa el comportamiento bimodal del régimen hídrico, los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre, con los valores más altos de escorrentía en las subcuencas. La escala numérica muestra las diferencias de magnitud para cada escenario. En el periodo base se presentan los valores más altos de escorrentía, seguido del tendencial y el agrícola; por último, el conservacionista.

Se identifican las subcuencas más sensibles a los cambios en las variables. Para la escorrentía, las subcuencas 20 río Espejo, 1 río Consota, 16 río La Vieja, tienen variaciones significativas, a medida que cambia el volumen de agua escurrido en las subcuencas.

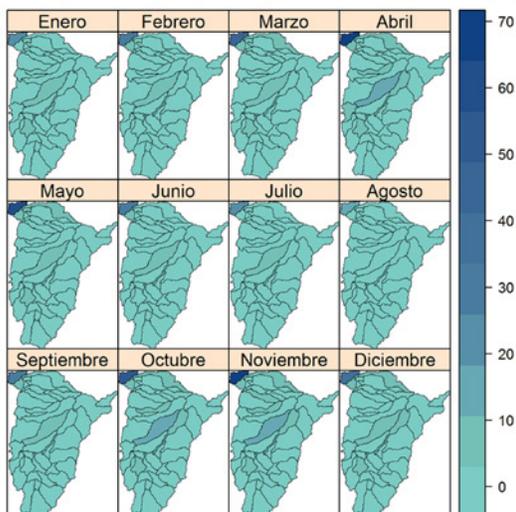
Estas gráficas permiten ver la influencia de las coberturas en cada RCP a nivel de subcuenca, respecto al periodo base:



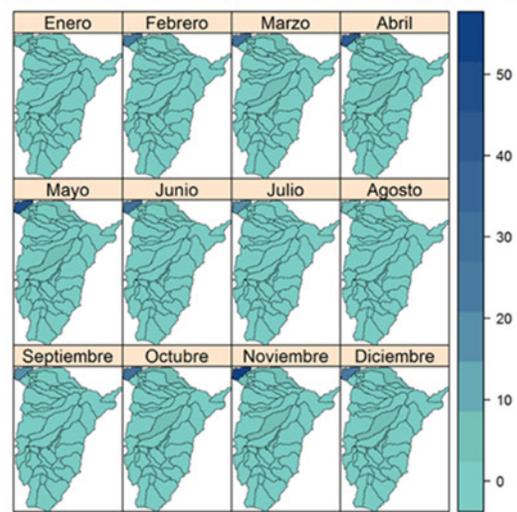
**Figura 33.** Escurrimiento multianual (%) por escenario de uso y cobertura del suelo para cada subcuenca en los RCP 4.5 y RCP 8.5. (Bonilla, 2021).

En la subcuenca 12 la escorrentía del escenario agrícola RCP 4.5 aumenta el escurrimiento significativamente respecto a los demás escenarios, lo que ocurre si se afectan ecosistemas de alta montaña con actividades agrícolas y con un incremento moderado de la temperatura caso del escenario proyectado. En la subcuenca 31, quebrada Palomino, las coberturas escenario RCP 4.5 pueden producir volúmenes extremadamente altos de escorrentía por los cambios de coberturas, especialmente entre el café (base: 75%, pastos: 19%), a pastos (60%) y mosaicos de cultivos (25%) en el escenario tendencial. Igual ocurre en el escenario RCP 8.5.

Caudal superficial (mm) La Vieja, escenario base 1993-2015



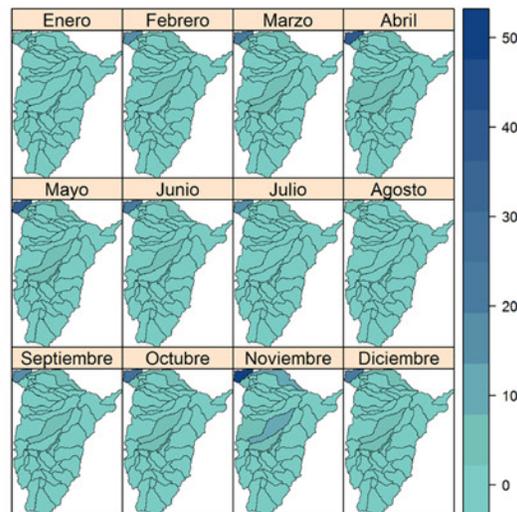
Caudal superficial (mm) La Vieja, escenario agrícola 4.5, 2016-2099



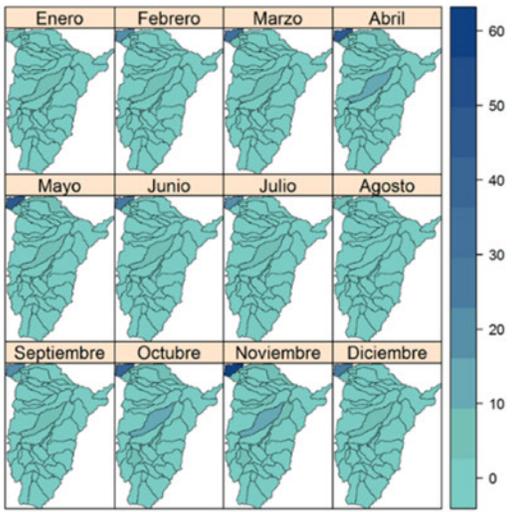
Caudal superficial (mm) La Vieja, escenario conservacionista 4.5, 2016-2099



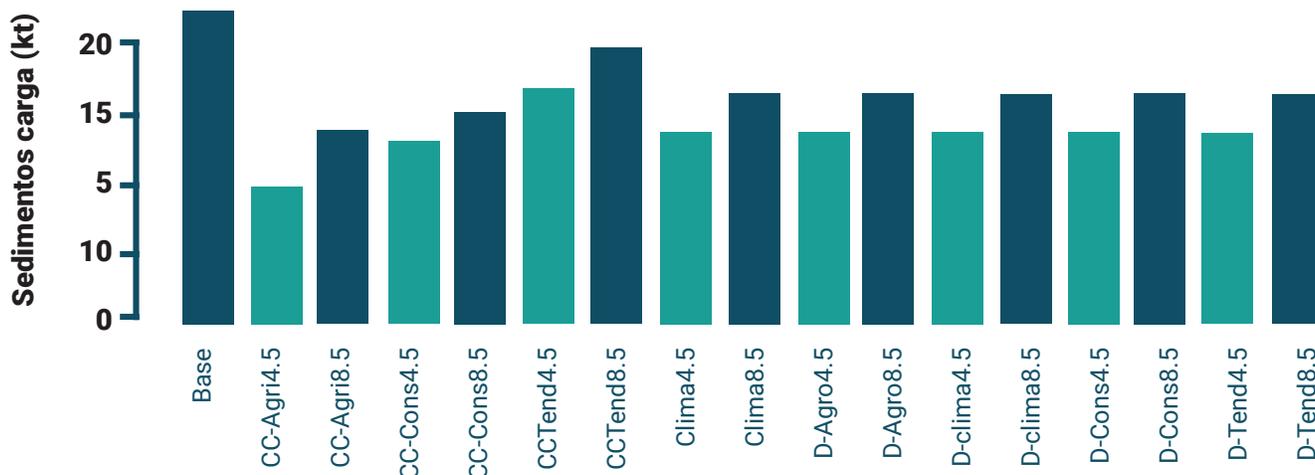
Caudal superficial (mm) La Vieja, escenario tendencial 4.5, 2016-2099



Caudal superficial (mm) La Vieja, Escenario clima 4.5, 2016-2099



**Figura 34.** Escorrentía superficial multimensual (mm) para el periodo de referencia (1993-2015) y para los diferentes escenarios de coberturas del suelo y RCP 4.5 para el periodo 2019-2099 (Bonilla, 2021).



**Caudal superficial (mm) de escenarios 2016-2099 y modelo base en río La Vieja**

**Figura 35.** Resumen escenario caudal superficial proyectado vs escenario base 2016-2099 La Vieja (Bonilla PME, 2021).

De manera general, en la cuenca (Figura 35) se observa que el caudal o escorrentía superficial del modelo base es mucho mayor que la simulada con los escenarios de cambio climático, uso y cobertura del suelo, para todas las combinaciones posibles modeladas, lo cual sugiere manejar con detalle cada una de las subcuencas definidas, dada su heterogeneidad, características topográficas y uso de suelo.

## 5.4. Resultados modelos hidrodinámicos

Se presentan resultados de algunas simulaciones para las dos ciénagas estudiadas, según lo planteado en las tablas 13 y 14 del numeral 4, que muestran los escenarios trabajados para cada ventana, comparados contra los respectivos escenarios base.

### 5.4.1. Simulaciones modelación hidrodinámica complejo cenagoso de Zapatos

Se hicieron diversos análisis con la modelación hidrodinámica para líneas de flujo, velocidades, temperatura, macrófitas (imágenes satelitales), sedimentos, profundidad, conexión hídrica

del complejo con el río Magdalena, frecuencias de inundación, fitoplancton; para identificar áreas homogéneas en su interior se utilizó la metodología de análisis de clúster. Los resultados completos y en detalle pueden ser consultados en el siguiente enlace:



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

De los escenarios planteados en la Tabla 13 del numeral 4, ya mencionada, se abordan dos escenarios que se combinan, complementan y fueron priorizados por comunidades y entidades en la transferencia de conocimientos y resultados, en el diplomado realizado por el PMEJ durante 2021.

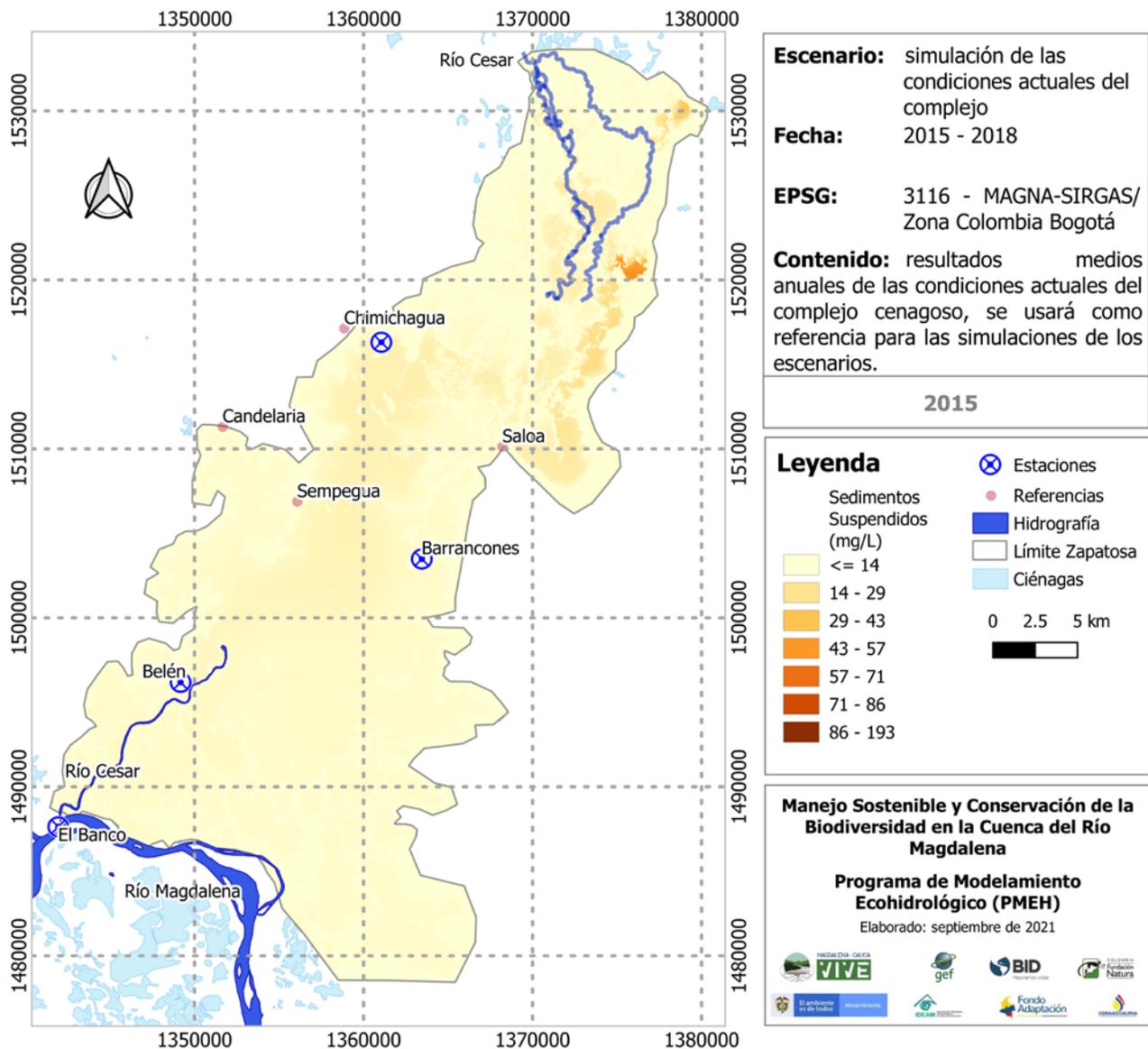
**Escenario base:** consiste en la simulación más extensa realizada; cubrió el periodo 2015-01-01 a 2018-12-31, y será empleada como base comparativa.

**Escenario cierre caño Cachaco:** consiste en la modificación en el modelo de elevación digital para mostrar un cierre del caño Cachaco y su efecto en el complejo cenagoso. Comprende el periodo de simulación 2016-06-01 al 2018-12-31.

**Escenario cierre río Cesar:** consiste en la modificación en el modelo de elevación digital para mostrar un cierre del río Cesar y su efecto en el complejo cenagoso. Comprende el periodo de simulación 2016-06-01 al 2018-12-31.

En conjunto, las dos simulaciones son insumos para el entendimiento de cada uno de estos cuerpos lóticos en el funcionamiento del sistema completo.

Se ha evidenciado cómo el río Cesar, en su zona norte (población de Rancho Claro Figura 36), presenta, recientemente, una bifurcación con el caño Cachaco. El caudal del río se deriva, principalmente, a través del caño Cachaco (en la segunda campaña de muestreo, nov-2019, la proporción de los caudales era 15% / 85%). Este cambio en la morfodinámica modifica la forma en la que el flujo entra al complejo: en el curso original el agua se desplaza principalmente por el sector oriental del complejo, pasando por la ciénaga de Saloa; con la nueva configuración el flujo se da principalmente por el sector occidental, entregando la mayoría del agua cerca a la población de Chimichagua.

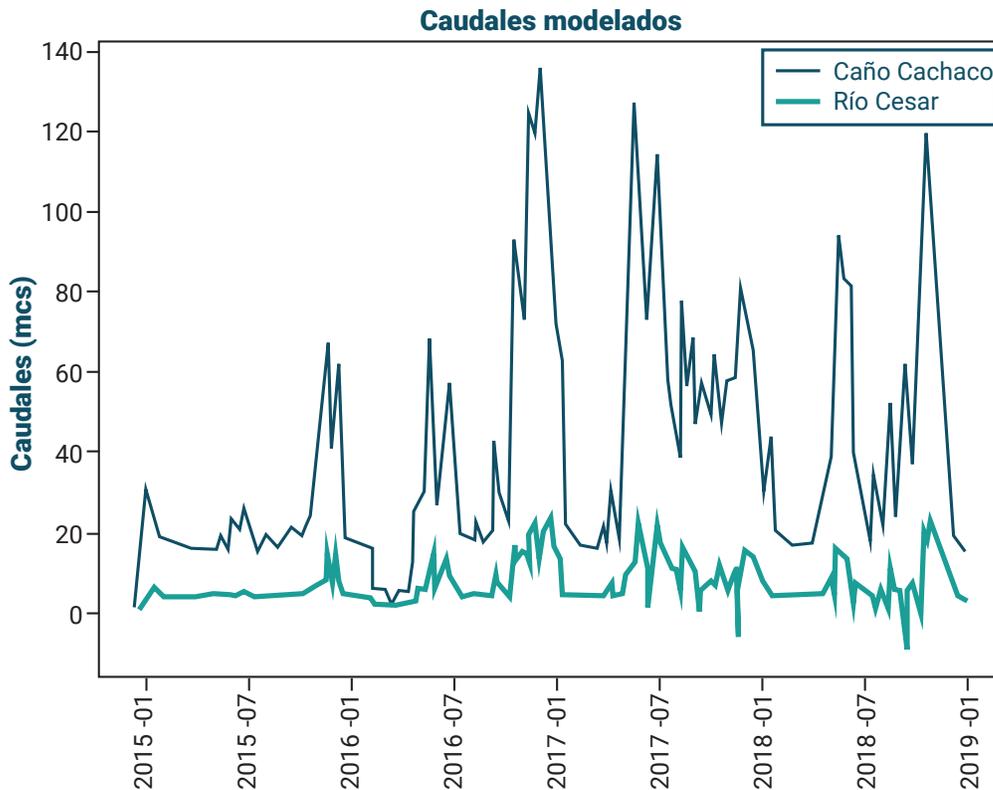


**Figura 36.** Detalle bifurcación caño Cachaco y río Cesar en Rancho Claro (Fuentes, 2021).

Comprender los efectos de esta modificación en los cursos de agua es importante para las ciénagas que conforman la parte norte del complejo. El modelo permitió evaluar algunos de los impactos derivados de ello.

El análisis de líneas de corriente guió la fracción derivada de uno u otro brazo, con muy buena correspondencia entre los caudales y el área alimentada por uno u otro –60% del área directamente por el caño Cachaco y el 40% restante por el río Cesar—. Del aforo de la segunda campaña 2019/11 la distribución fue del 84% y 16% respectivamente (Figura 37).

Lo anterior fue complementado con los resultados de los escenarios comparados entre sí y con el escenario base, empleando la variable *residencia* o tiempo en días de permanencia del agua desde que ingresó al complejo por una de sus fronteras o afluentes, (zona norte desde el río Cesar en Rancho Claro). Se aprecia, además, cómo la pérdida de la capacidad hidráulica de alguno de los dos brazos aumenta los niveles, con posibles afectaciones a la población de Rancho Claro, mientras que el brazo no intervenido recupera la capacidad hidráulica con procesos de erosión por su mayor caudal. También es posible que se abran nuevos brazos.



**Figura 37.** Distribución de caudales caño Cachaco – río Cesar PME (Fuentes, 2021).

Los resultados para cada nodo se agruparon en *k-means*; se agregan en un número dado de grupos según los valores calculados. Se contempló el logaritmo de la norma de velocidad, profundidad, concentración de sedimentos y tiempo de residencia en el complejo. La temperatura no se integró, pues se trabajó con resultados agregados a escala mensual.

El análisis de compacidad de los clústeres dio un valor de  $k=10$ . El primer clúster corresponde a la parte seca del complejo. En la visualización se hace seguimiento espacial y temporal de los valores relativos, mediante una salida gráfica, cuya interpretación es la siguiente:

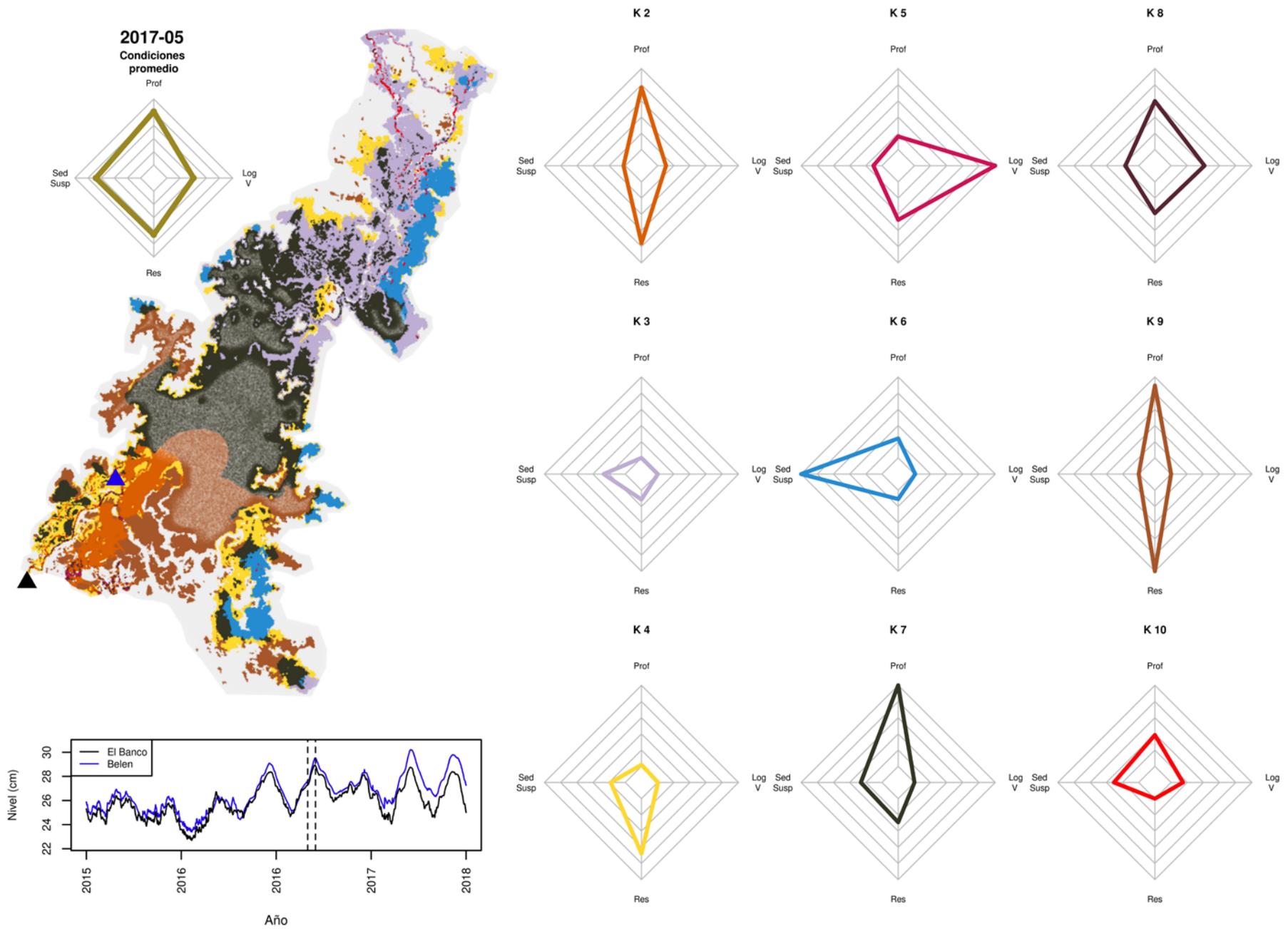
La zona superior izquierda muestra las variables agregadas para todo el complejo en el tiempo indicado (condición promedio mensual). Se hizo una transformación lineal con todos los pasos de tiempo (toda la extensión del polígono es el máximo calculado para los meses analizados, y el mínimo, el polígono más interno). Se localizan los resultados respecto a la variación que presentan a lo largo del ciclo hidrológico del complejo y al detalle para el

periodo de referencia. Las cantidades exactas están disponibles en archivos de texto, las escalas relativas facilitan la visualización e interpretación de los datos, la información original (a resolución subdiaria) se puede consultar en los archivos tipo selafin del modelo. En la parte inferior izquierda están los niveles registrados y modelados río Magdalena y estación de Belén del escenario proyectado de cambio climático, momento hidrológico —aguas en ascenso, niveles máximos, mínimos, la tasa de cambio, su diferencia con los niveles del río Magdalena, la velocidad con que sale el agua de la ciénaga —.

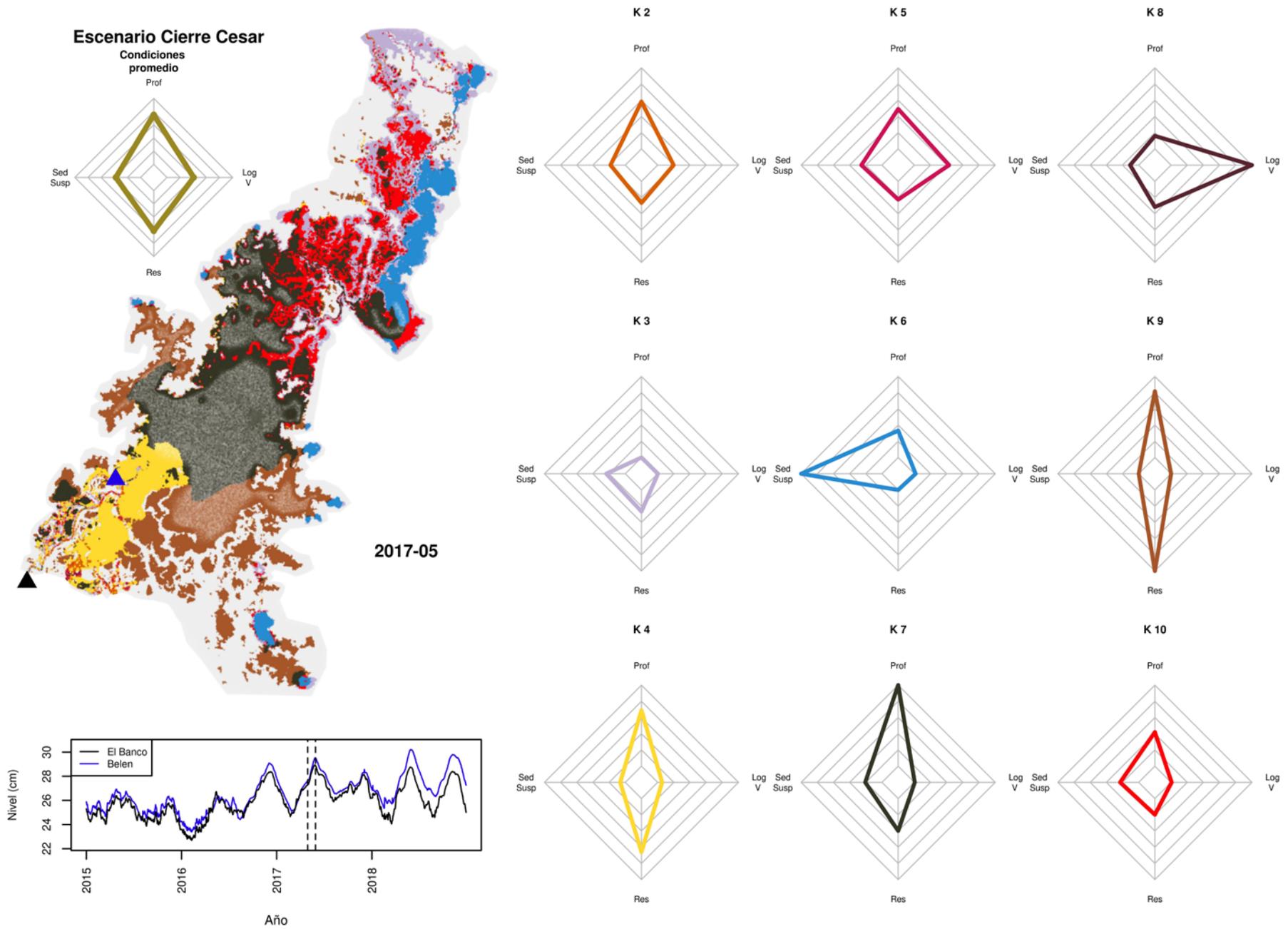
Los colores empleados en el mapa del complejo —tanto en la izquierda, como en la derecha— son coherentes. Con esta estrategia de visualización los resultados para este escenario son:

De la comparación en conjunto de la figura 38, figura 39 y figura 40, se concluye:

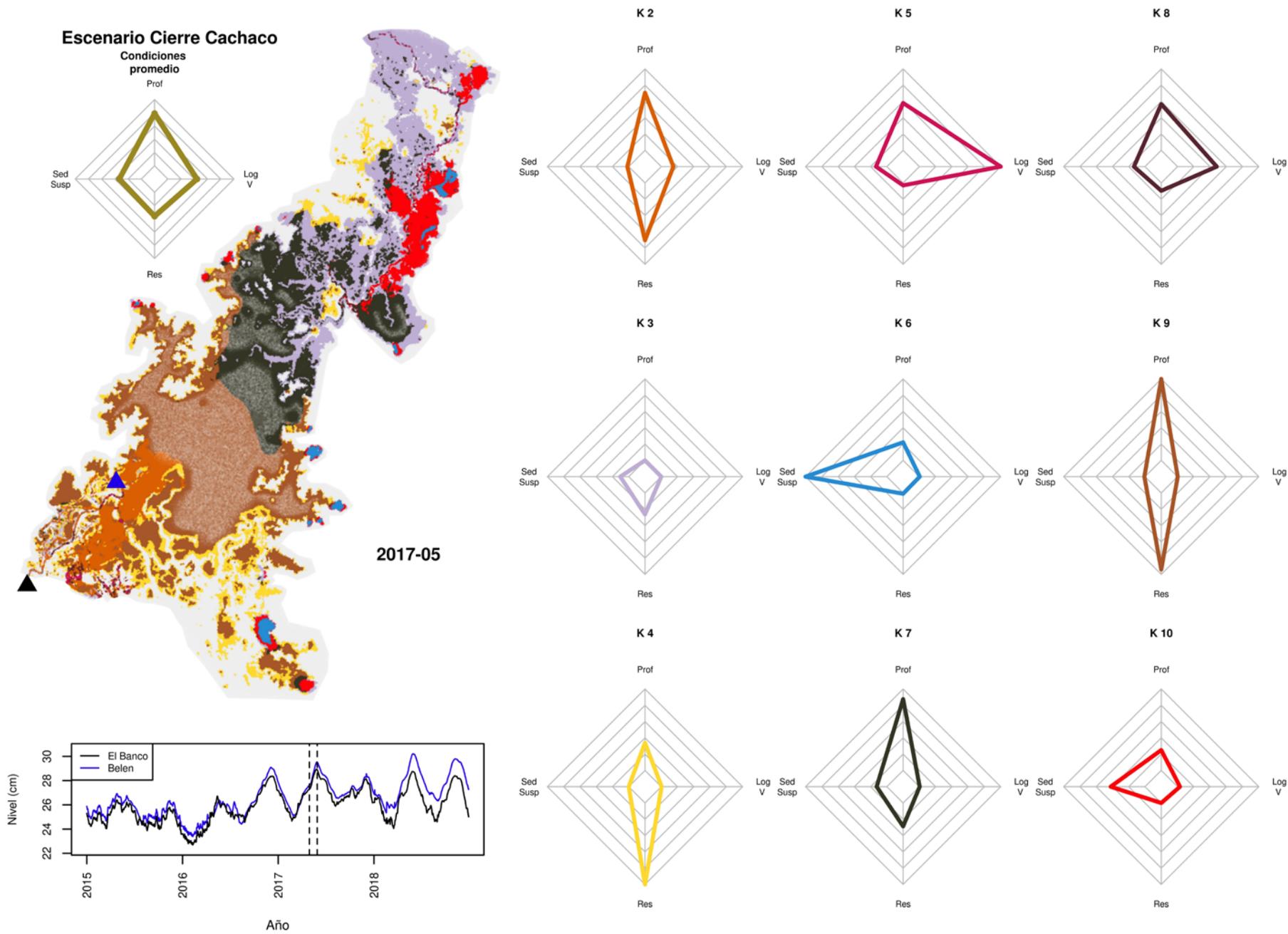
1. La menor condición de inundación en la zona norte se obtiene bajo la condición actual, donde hay dos brazos para evacuar el caudal que aporta la cuenca del río Cesar.
2. Para el cierre del caño Cachaco, los cambios son mucho menos dramáticos que para el cierre completo del río Cesar, muy cercano a la condición actual. A través de la bifurcación, un 16% del caudal va hacia el río Cesar, llegando a ser inferior en periodos de aguas bajas.
3. La pérdida de aportes de caudal desde la bifurcación no implica la pérdida total de flujo en el río Cesar, pues tiene varios afluentes aguas abajo de la bifurcación. Sin embargo, sí se ve afectada su continuidad y modificada su cuenca aferente, que se analiza aparte, en el cierre del río Cesar.



**Figura 38.** Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario base (Fuentes, 2021).



**Figura 39.** Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario cierre del río Cesar (Fuentes, 2021).



**Figura 40** Comportamiento en aguas altas (mayo de 2017) para el escenario cierre caño Cachaco (Fuentes, 2021).

4. El clúster 6 (en azul), de altas concentraciones de sedimentos, reduce su área para el cierre del caño Chachaco, comparado con el cierre del río Cesar o con el escenario base. En su lugar, el área ahora es el clúster 10, con un comportamiento similar, pero con concentraciones inferiores; razón por la que el caudal líquido del sector oriental asociado al río Cesar tiene un buen incremento al desviarse la mayoría del caudal transportado por el caño Cachaco, esperándose aumentos de cinco veces en el caudal. El aporte de sedimentos en suspensión de los afluentes es constante, por lo que baja la concentración de sedimentos en suspensión.

## 5.4.2. Simulaciones modelación hidrodinámica complejo cenagoso de Ayapel

Se realizaron las simulaciones planteadas en la Tabla 12, numeral 4 de este documento; aquí se presentan solo los resultados de una de ellas. La totalidad con sus detalles se consultan en el enlace:

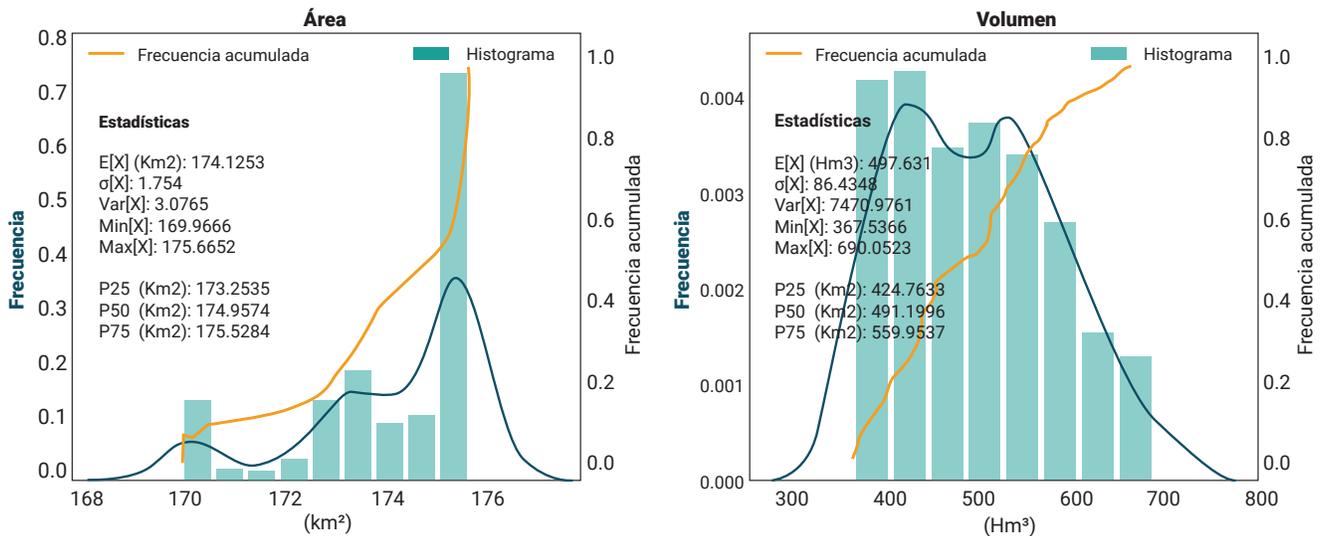


Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

### Escenario rompederos

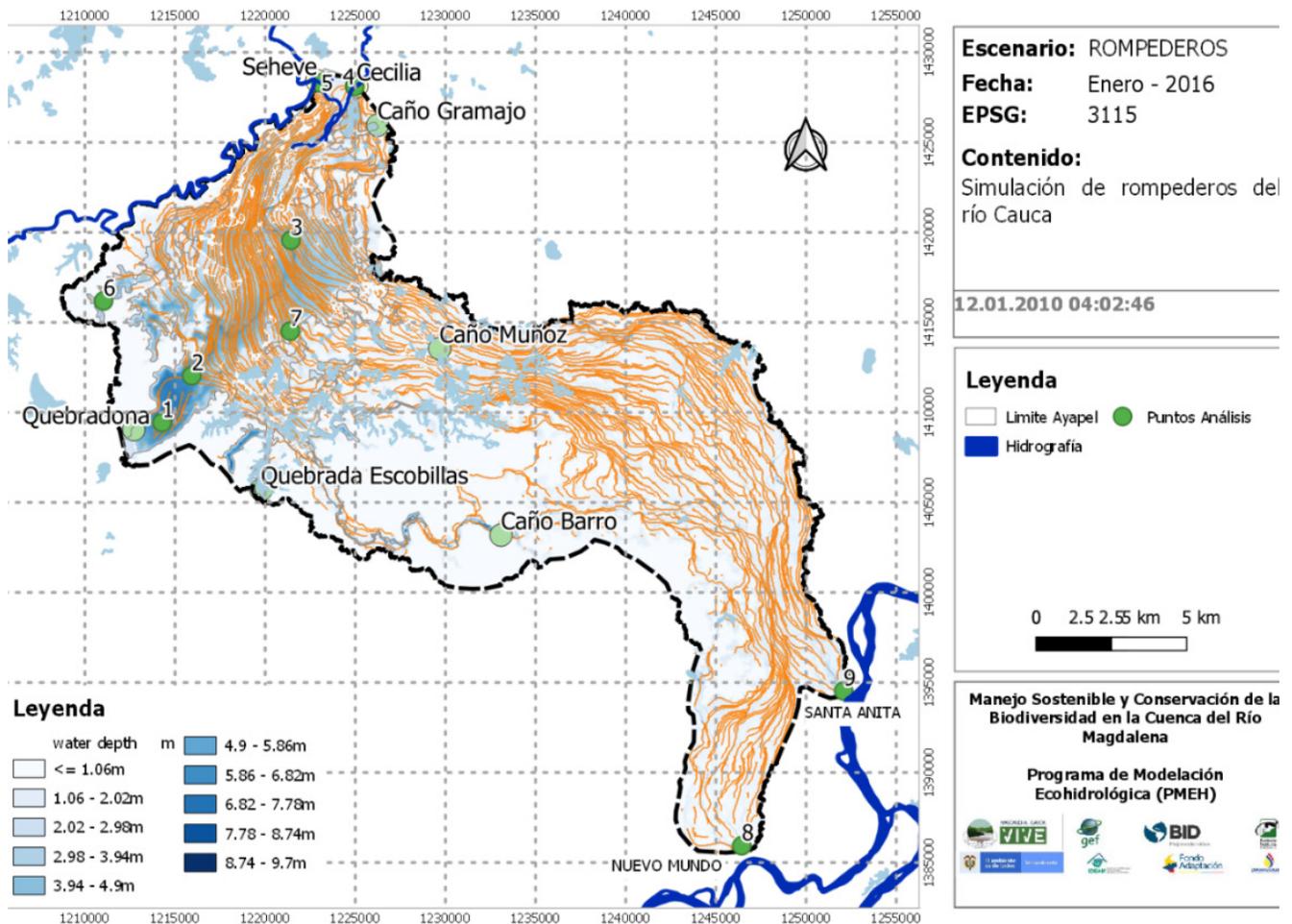
Describe los resultados de la simulación de rompederos del río Cauca ubicados en Mundo Nuevo y Santa Anita, periodo de inundaciones 01-01-2009 a 01-01-2012, por desbordamiento del río Cauca. Se describió la serie temporal de las variables hidrodinámicas en las referencias definidas en la Figura 42 (puntos verdes). Se presentó la extensión de la ciénaga en periodos de lluvias y estiaje, y se cuantificaron en el tiempo cambios de área superficial y volumen de agua.

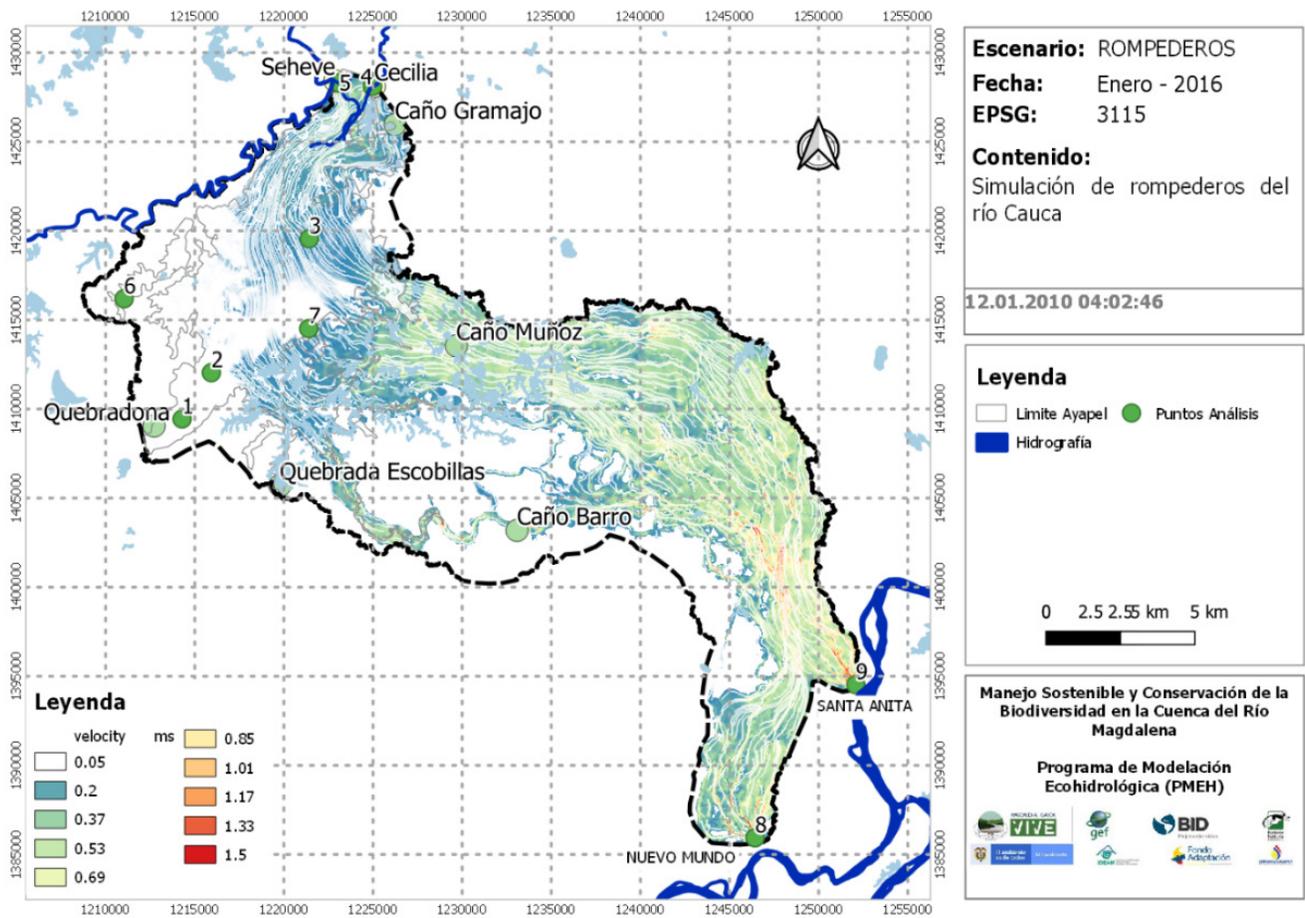
La Figura 41 y la Tabla 23 muestran el cambio de los estadísticos de la serie de tiempo del área y volumen de la ciénaga. Comparado con la simulación de línea base, hay un incremento del 335% en el promedio del área, y del 5700 % en el volumen de la ciénaga.



**Figura 41.** Estadísticos área volumen escenario rompederos ciénaga de Ayapel PMEh (Barros, 2021).

La Figura 42 muestra una crecida en el área de la ciénaga de Ayapel, donde existe un flujo preferente por caño Muñoz para el caudal proveniente de los rompederos Mundo Nuevo y Santa Anita, considerando las condiciones del modelo digital de elevación, la estimación de caudal de rompederos del río Cauca y la incertidumbre de la reducción de fuentes de masa, Figura 42. Periodos de inundación para valores de profundidad (superior) y de velocidad escalar (inferior) en la ciénaga de Ayapel, para la simulación de rompederos.





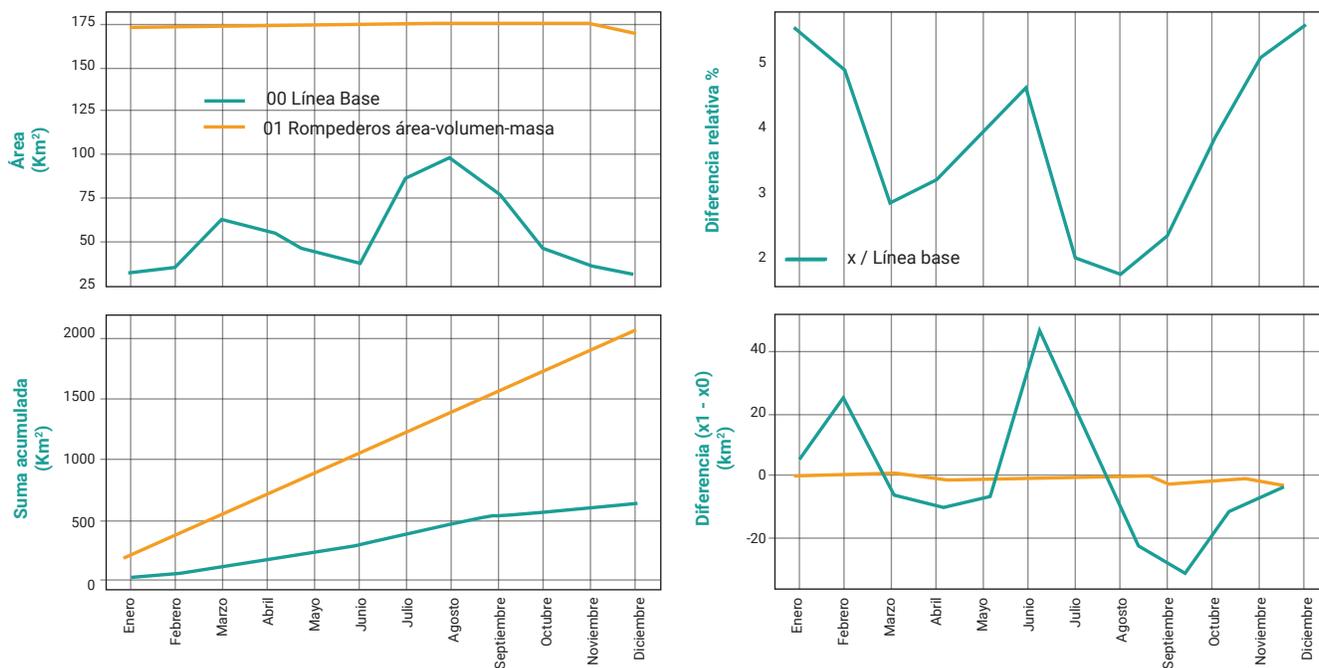
**Figura 42.** Periodos de inundación para valores de profundidad (inferior) y de velocidad escalar (superior) en la ciénaga de Ayapel, para la simulación de rompederos (Barros, 2021).

**Tabla 23.** Estadísticos serie de tiempo, área y volumen ciénaga de Ayapel (Barros, 2021).

Estadísticas	Area	Vol
Número	285	285
Media	174.1	496.7
std	2.0	89.6
Mínimo	164.5	295.2
25%	173.3	424.8
50%	175.0	491.2
75%	175.5	560.0
Máximo	175.7	713.3

La Figura 43 muestra la dinámica de cambio del área con una amplitud de 30 km<sup>2</sup> y 80 km<sup>2</sup> (marzo y agosto). La forma de acumulación de área no se afecta por el año hidrológico.

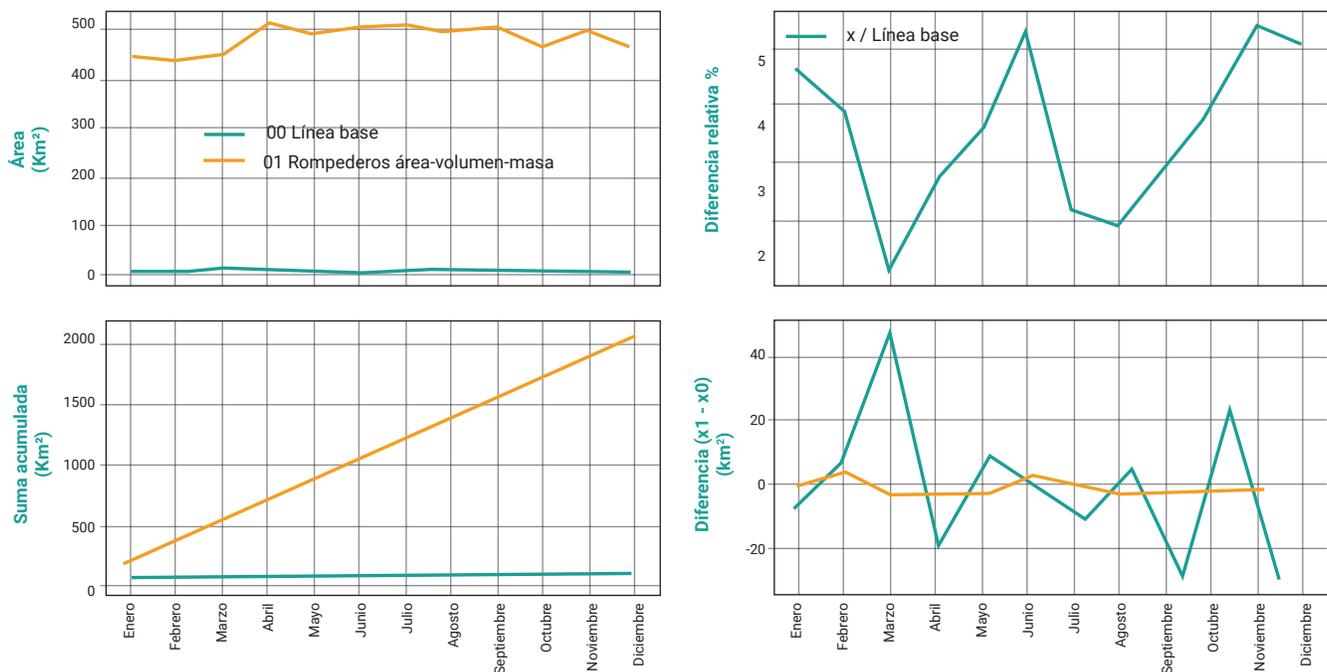
Hay una influencia en el año hidrológico y en el valor del área mensual de la simulación de línea base, con una reducción en los meses de junio y diciembre. En la serie de tiempo de área para la simulación de rompederos del río Cauca se ve un valor intermensual promedio de 174,12 km<sup>2</sup> que no está afectado por el año hidrológico de la cuenca de la ciénaga.



**Figura 43.** Comparación mensual área ciénaga Ayapel simulación rompederos y de línea base (Barros, 2021).

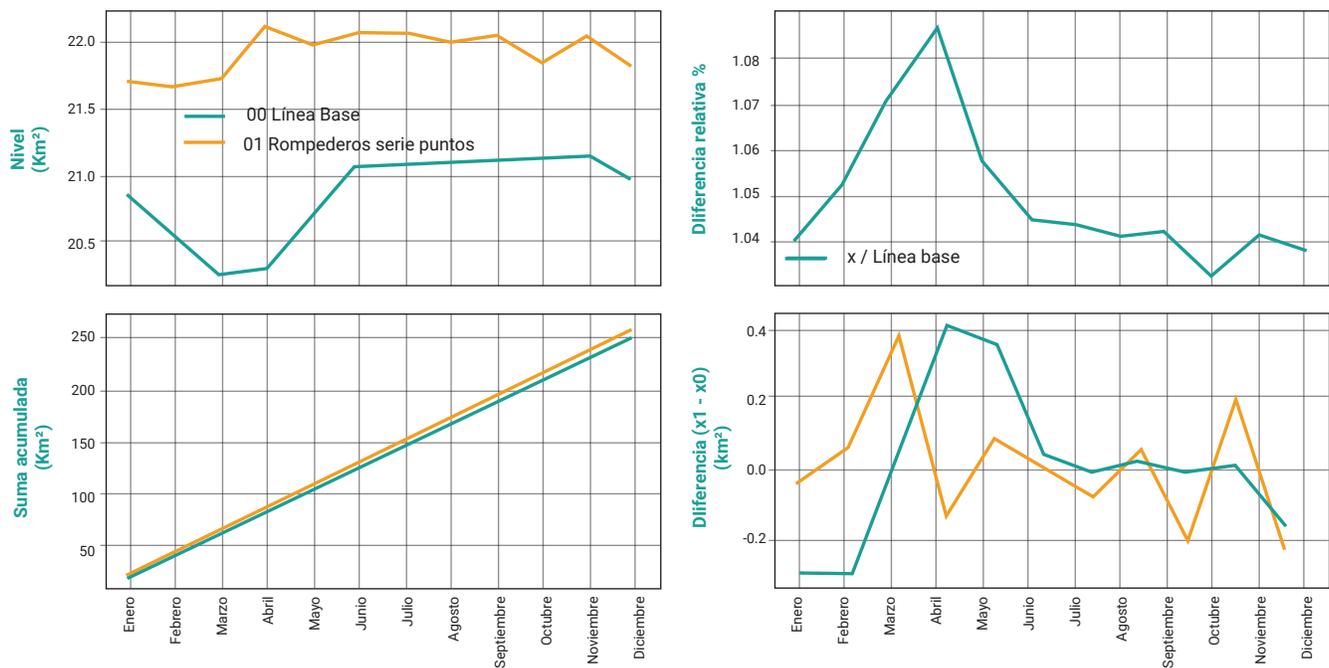
La diferencia relativa de cambio de valor del área a resolución temporal mensual es de máximo 500% y mínimo 178%, la mayor diferencia en los meses de aguas bajas. El área acumulada mensual para rompederos no muestra un cambio de pendiente asociado al año hidrológico, como sí se ve en la simulación de línea base, línea azul, para enero y junio.

La Figura 44 muestra la variación promedio mensual de volumen de la simulación de línea base (línea azul) y de la simulación de rompederos (línea naranja).



**Figura 44. (a y b).** Comparación mensual volumen ciénaga de Ayapel, simulación de rompederos y de línea base (Barros, 2021).

La Figura 44a muestra el promedio mensual de volumen de la serie de la simulación rompederos, que se estima en  $496,6 \text{ hm}^3$  y la serie línea base en un promedio de  $8,56 \text{ hm}^3$ . La figura 44b muestra que los meses de aguas bajas, enero y junio, tienen las mayores diferencias, con un valor estimado de  $7000\%$ , asociado a que el volumen de agua que producen los rompederos no sigue la forma de la variación hidrológica anual de la cuenca de la ciénaga Ayapel. Se observa una amplitud máxima mensual de  $90 \text{ hm}^3$  para la serie de la simulación rompederos y una amplitud máxima mensual de  $4,8 \text{ hm}^3$  para la de línea base.



**Figura 45 (a y b).** Diferencia mensual de serie de nivel (línea base y rompederos) (punto 1) (Barros, 2021).

La Figura 45 muestra la diferencia mensual promedio de nivel para la simulación de la línea base y la de rompederos, la figura 45a muestra una variación aproximada de 1,2 m de forma mensual. Asimismo, la figura 45b muestra una diferencia máxima de 108% en la relativa ubicada en abril.

## 5.5. Resultados modelo Social

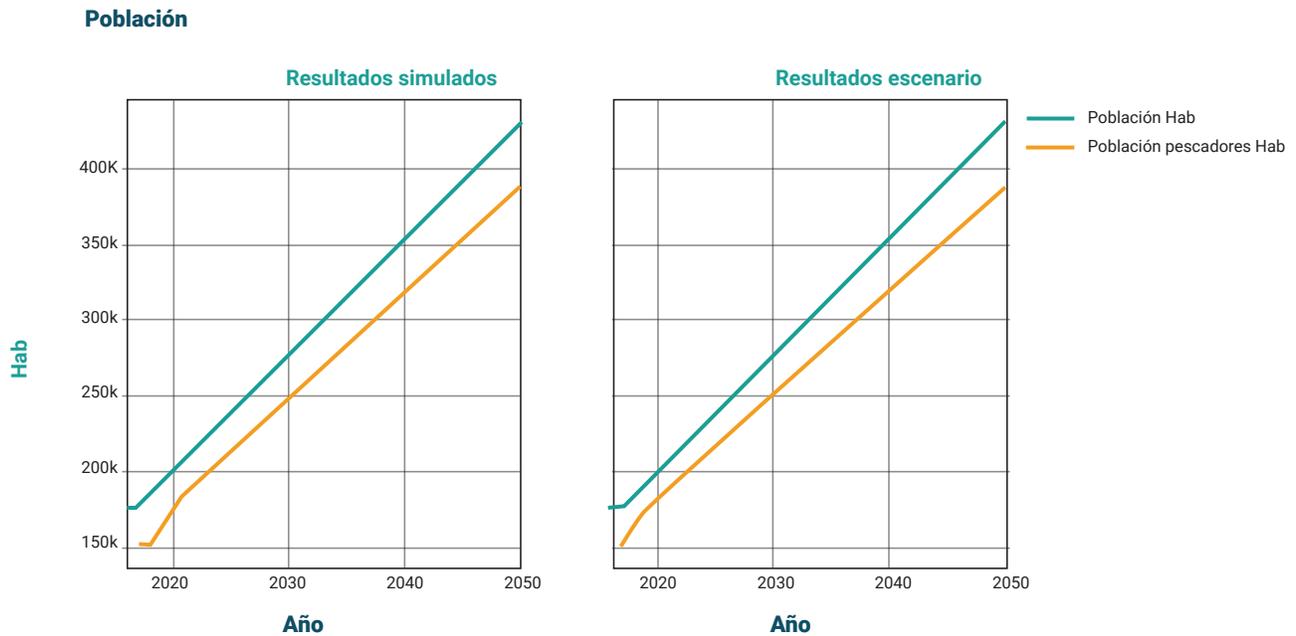
Con las características de la metodología DS y la información disponible de cada ventana, se definieron conceptualmente los cambios a realizar, aumentos o disminuciones porcentuales, explicadas en el numeral 4, simulación de escenarios, extractivista y sostenible.

### 5.5.1. Escenarios de modelación SSE río Cesar – ciénaga de Zapatosa

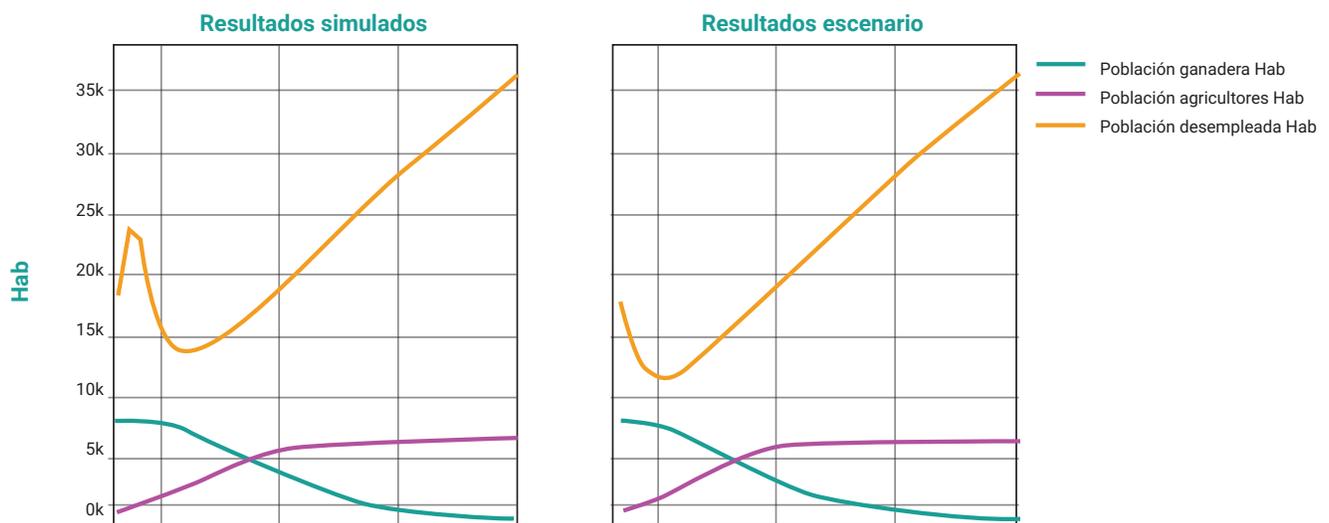
Los resultados analizados corresponden a la población dedicada a: i) ganadería, ii) agricultura y iii) desempleada. Capitales por ganadería y pesquero. Capital agrícola y producción agrícola, para un escenario de uso y cobertura del suelo extractivista:

El escenario extractivista de este SSE, fomenta la explotación intensiva de las tres actividades económicas estudiadas: en este escenario las áreas dedicadas a la agricultura aumentan, y, consecuentemente, el dinero para la adecuación del terreno; las cabezas de ganado y áreas de pastos aumentan; sin sanciones al uso de artes de pesca, ni vedas, se intensifica el uso del trasmallo y baja el de la atarraya. Ver figuras 46, 47, 48 y 49.

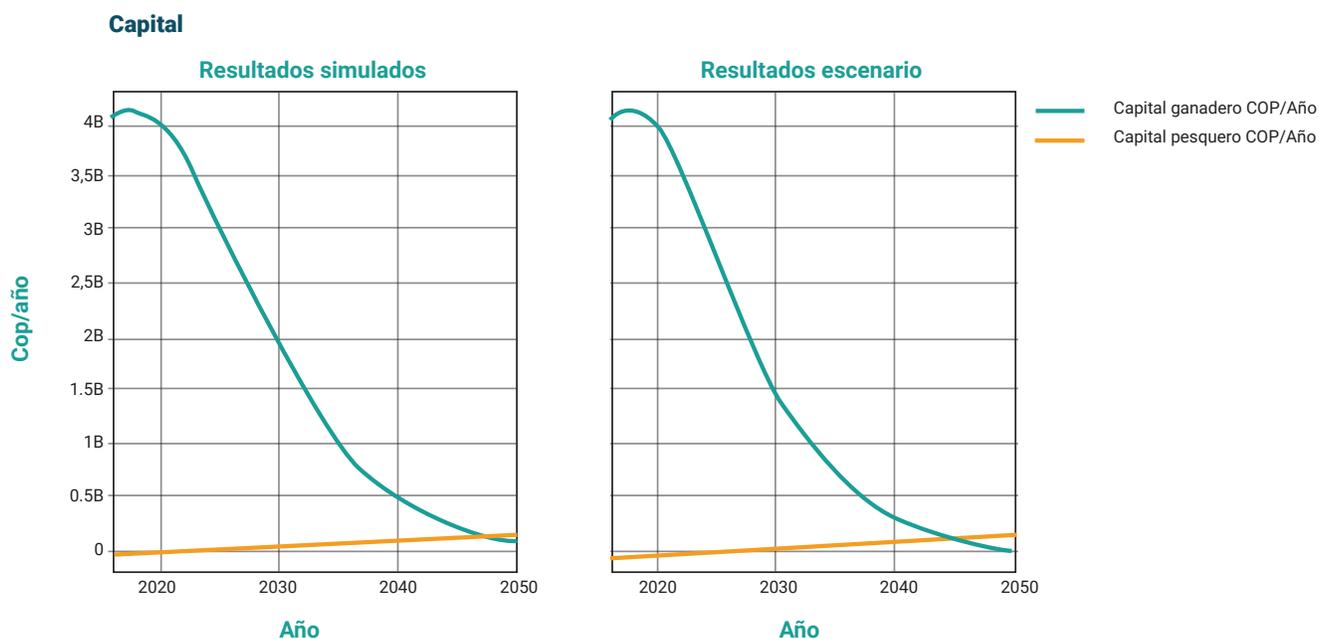
La variable población presenta cambios leves iniciando la modelación (gráficas a la izquierda), que cambian al resultado simulado (gráficas a la derecha). La población desempleada para estas actividades económicas disminuye al inicio, pero aumenta hasta el final del periodo modelado. La transición entre población dedicada a la ganadería y a la agricultura (Figura 47) sucede rápido. Los ingresos generados por la actividad pesquera aumentan en el tiempo.



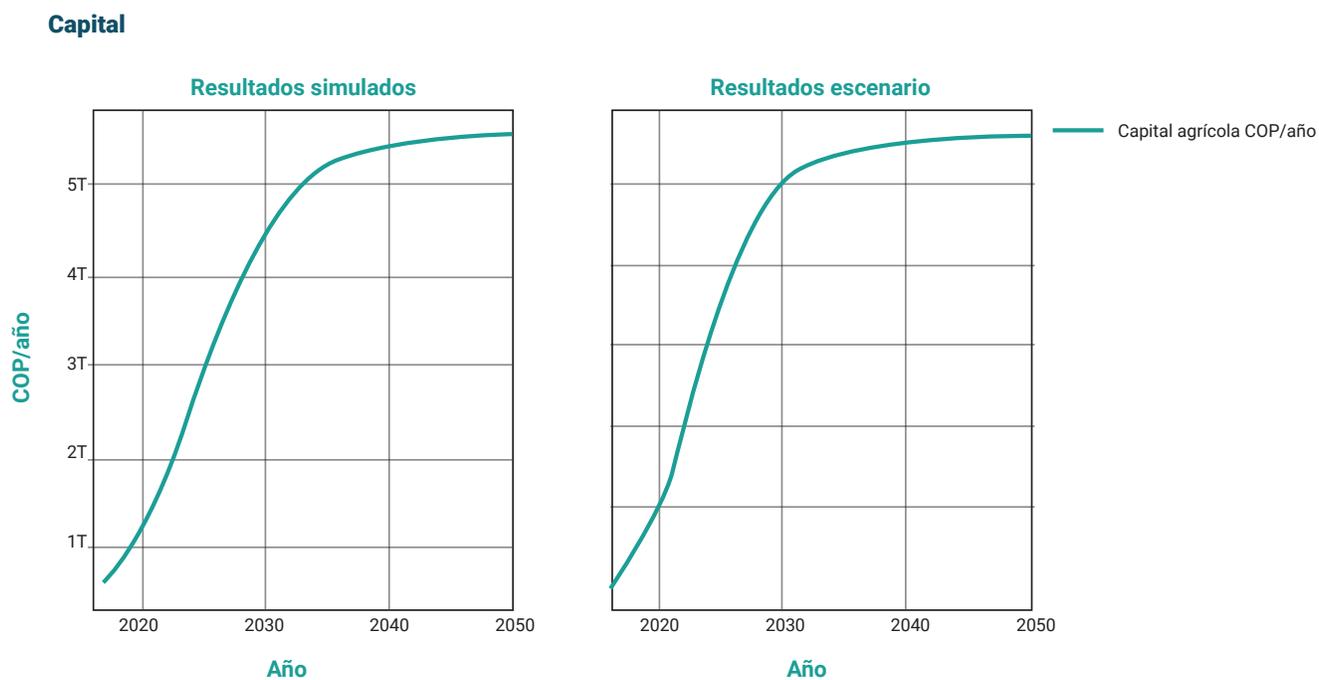
**Figura 46.** Población total y dedicada a la pesca, en escenario extractivista (Reina PME2021).



**Figura 47.** Población dedicada a ganadería, agricultura y desempleada (Reina PME2021).



**Figura 48.** Ingresos por actividad de ganadería y pesca (Reina PMEHE 2021).



**Figura 49.** Ingresos por actividad agrícola (Reina PMEHE 2021).

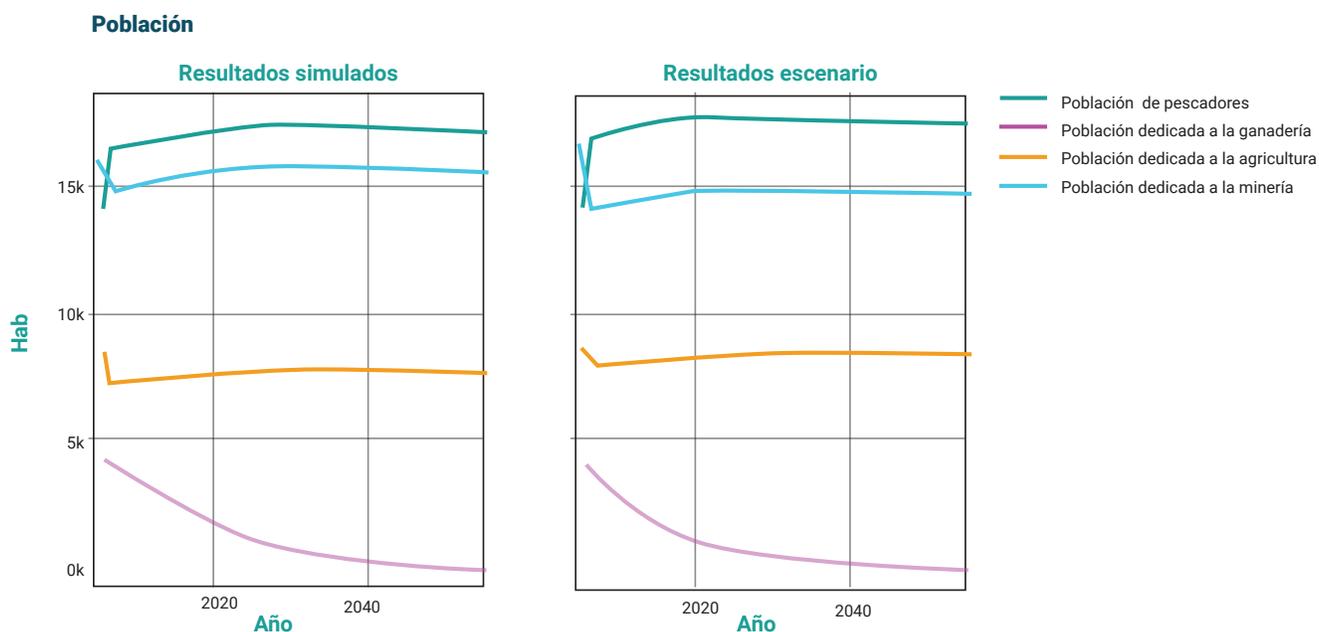
Se requiere una solución al desempleo o baja generación de ingresos. La explotación intensiva de los servicios ecosistémicos, sustento del capital económico, a corto plazo da resultados positivos, con una alta incertidumbre y el deterioro del ecosistema a largo plazo, al transformar la vegetación nativa en pastizales o agrícola.

## 5.5.2. Escenarios de modelación SSE río San Jorge – ciénaga de Ayapel

El escenario sostenible promueve en sus actividades económicas: a) disminución significativa de las áreas praderizadas (pastizales, praderas, etc.); b) áreas dedicadas a la agricultura en el estado actual 2021; c) uso de artes de pesca reguladas (incentiva la atarraya, prohíbe artes intensivas y da continuidad a las temporadas de vedas); d) prohibición de minería ilegal de oro, con cero aumentos en su área. Ver figuras 50, 51, 52, 53 y 54.

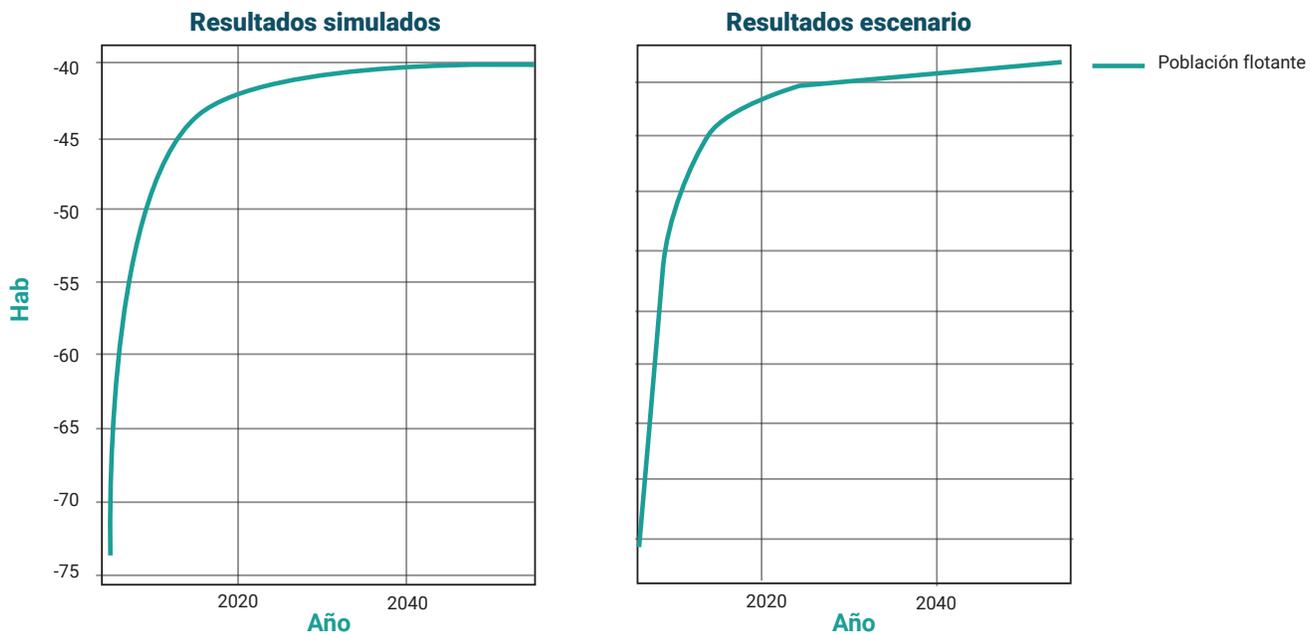
La pesca es la actividad que más genera ingresos y la más atractiva. La producción de oro es prohibida, según el régimen legal de área protegida, por lo que decae junto con la generación de ingresos. Las restricciones a las otras actividades las hacen menos atractivas.

Este enfoque no incide en la dinámica de la población flotante, dedicada a la minería. Dado que esta debe buscar otra forma de generar ingresos, se implementan y crean actividades económicas que fomenten la sostenibilidad del ecosistema y generen ingresos suficientes a los pobladores.



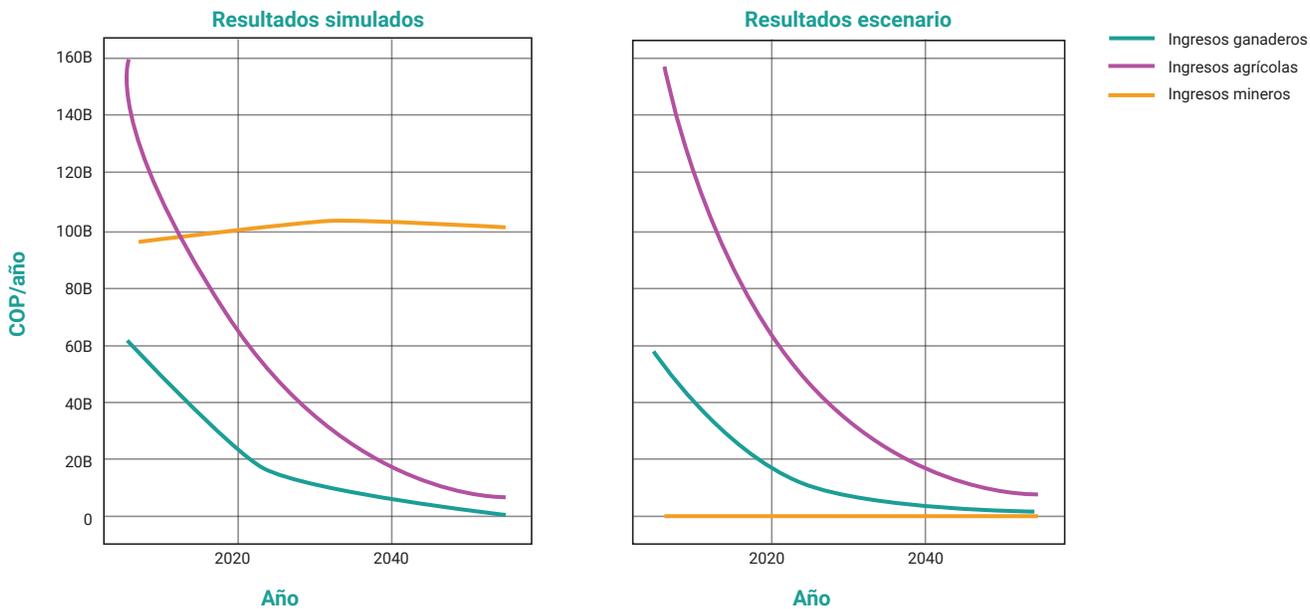
**Figura 50.** Población en pesca, ganadería, agricultura y minería (Reina PMEH 2021).

## Población



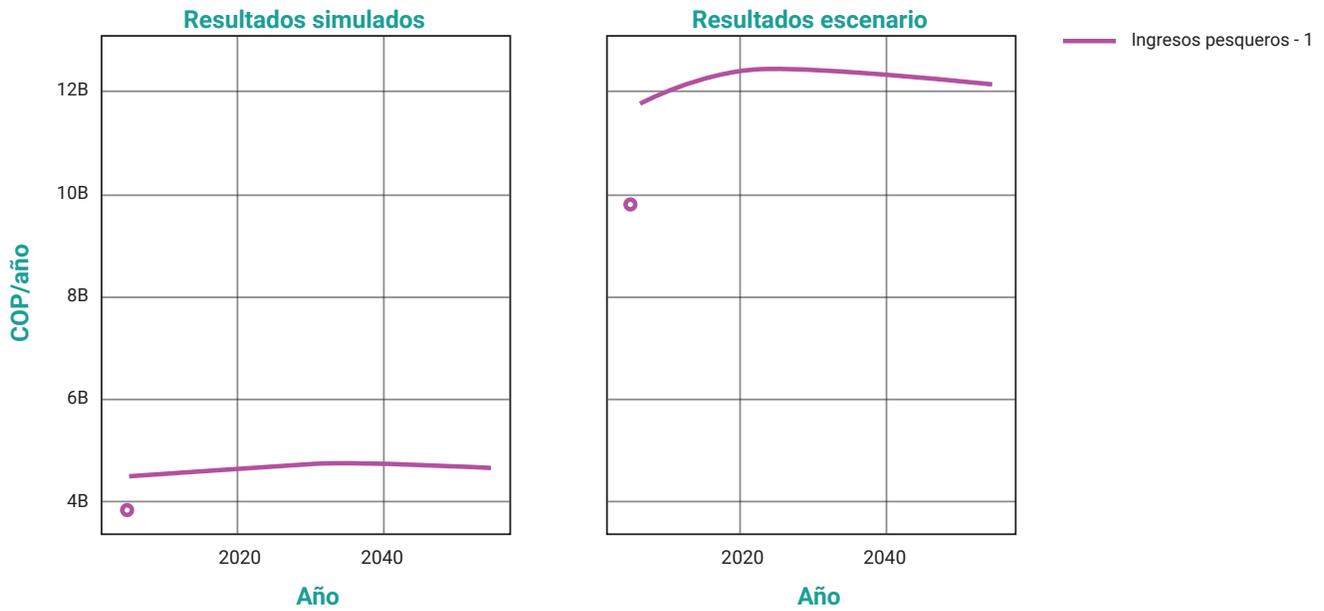
**Figura 51.** Población flotante.

## Ingresos

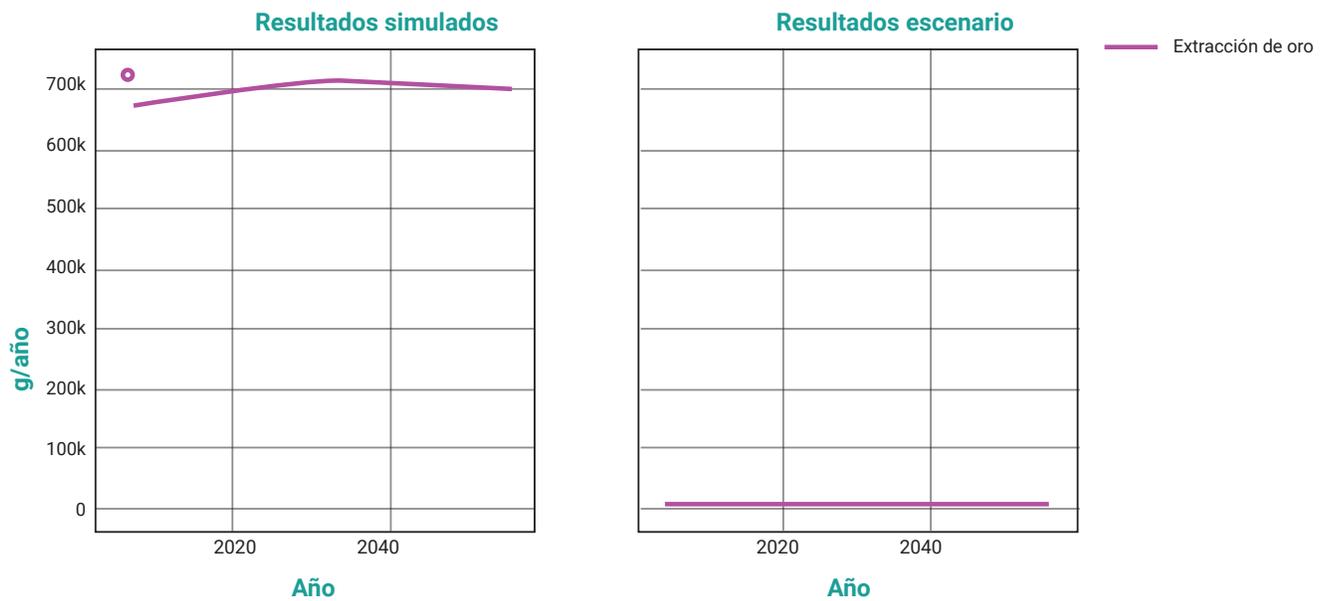


**Figura 52.** Ingresos por ganadería, agrícola y minería (Reina PMEH 2021).

### Ingresos pesqueros



**Figura 53.** Ingresos por pesca.



**Figura 54.** Extracción de oro.

Las actividades con mayor atractivo son la minería ilegal de oro y la pesca: la población dedicada a estas actividades aumenta. La ganadería es de baja generación de empleo, y de buenos ingresos a pocas personas. La población flotante aumenta, evidenciando la falta de cobertura de estos capitales al total de la población. Los ingresos generados por la minería y la pesca aumentan hasta un máximo, y disminuyen a largo plazo.

La explotación intensiva de los servicios ecosistémicos no incide en la población flotante, lo que representa una constante migración del municipio, buscando mejores ingresos.

### 5.5.3. Escenarios de modelación SSE río La Vieja

El modelo de la cuenca se enfoca en la actividad cafetera y lo que se deriva de ella. Se muestran los resultados de la simulación de uno de los dos escenarios planteados.

El escenario **sostenible** se caracteriza por la disminución de las áreas dedicadas al pastoreo de bovinos y el control de la cantidad de cabezas de ganado por hectárea. Se mantienen las áreas sembradas con café, por su valor cultural y por la alta generación de empleo. Las áreas dedicadas a otros tipos de cultivos disminuyen. Se controla la actividad turística, en relación con la carga de visitantes de los ecosistemas. Desde este enfoque se pone un límite de visitantes (ver figuras 55, 56, 57, 58, 59 y 60).

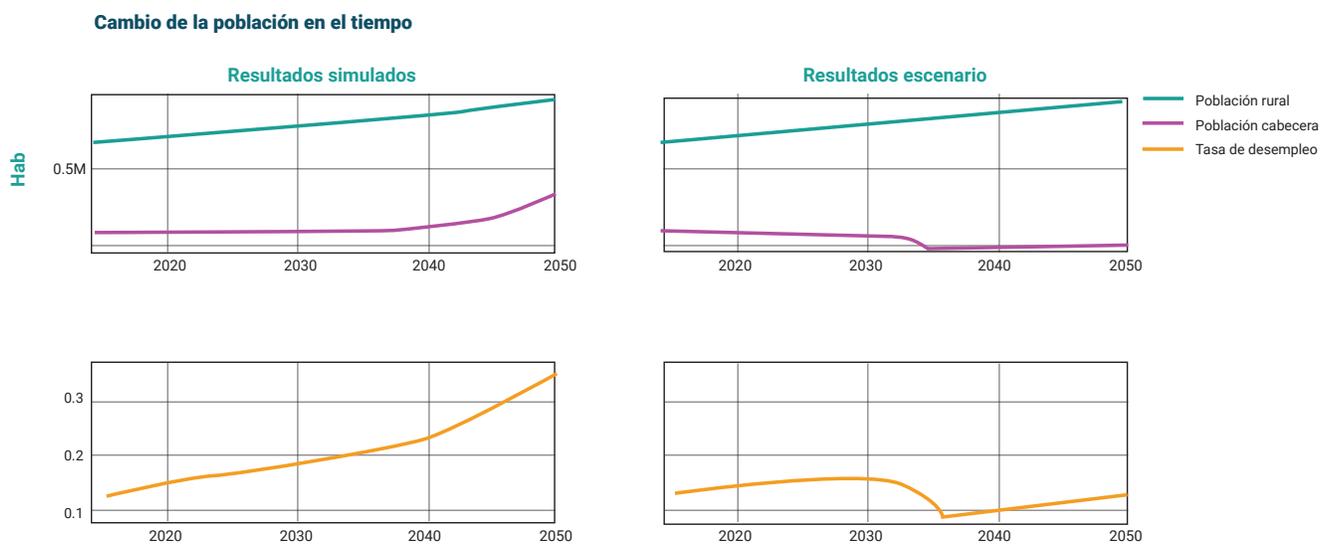


Figura 55. Población rural, cabeceras municipales y tasa de desempleo.

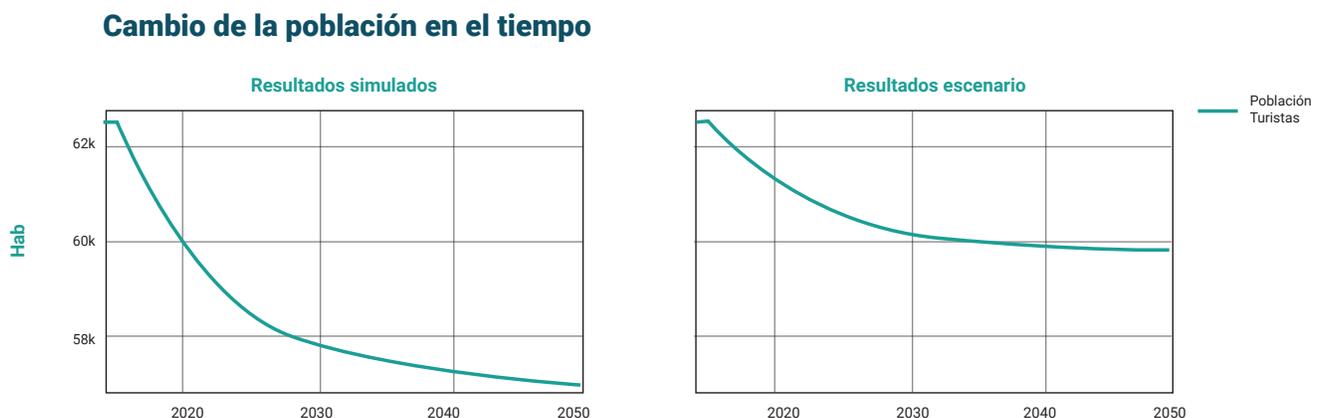
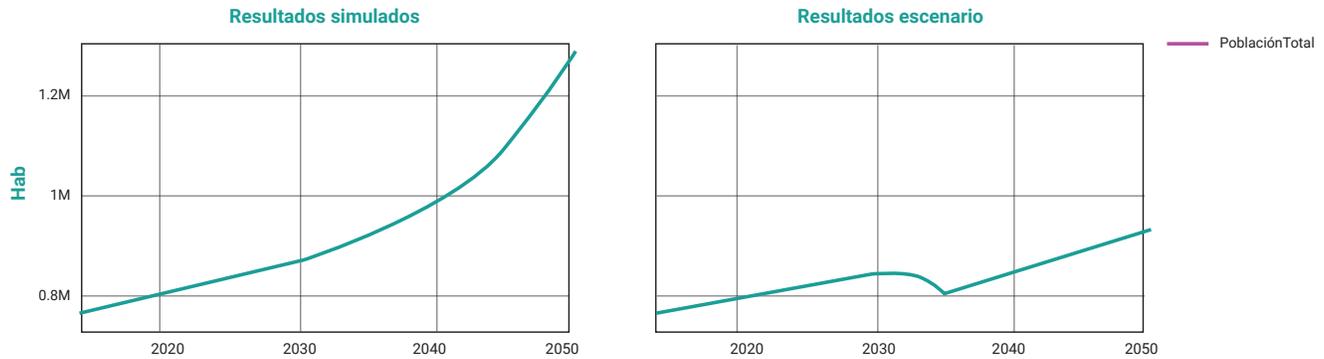


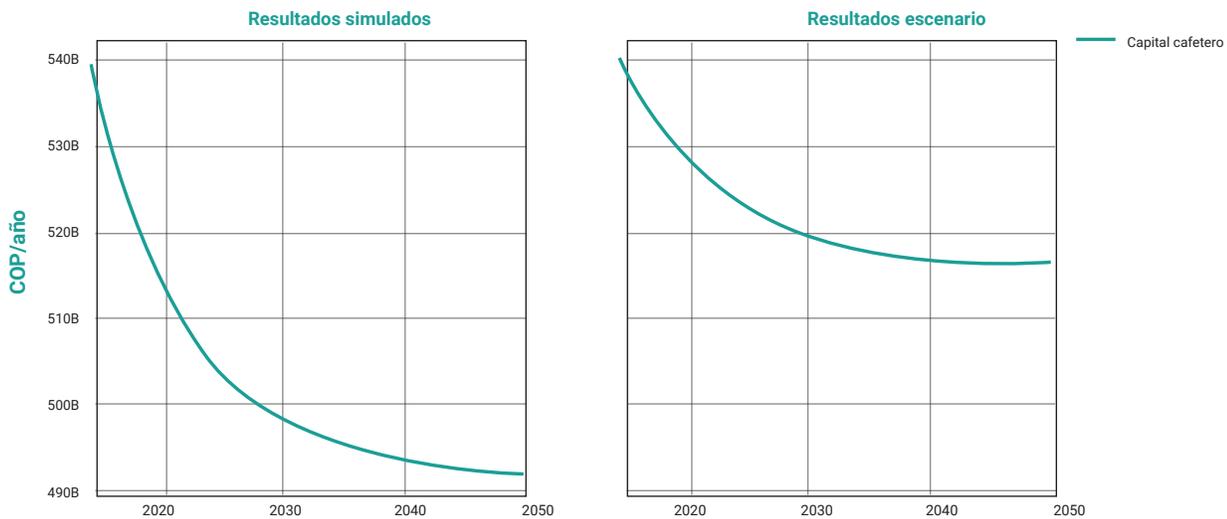
Figura 56. Población de turistas.

## Cambio de la población en el tiempo



**Figura 57.** Población total.

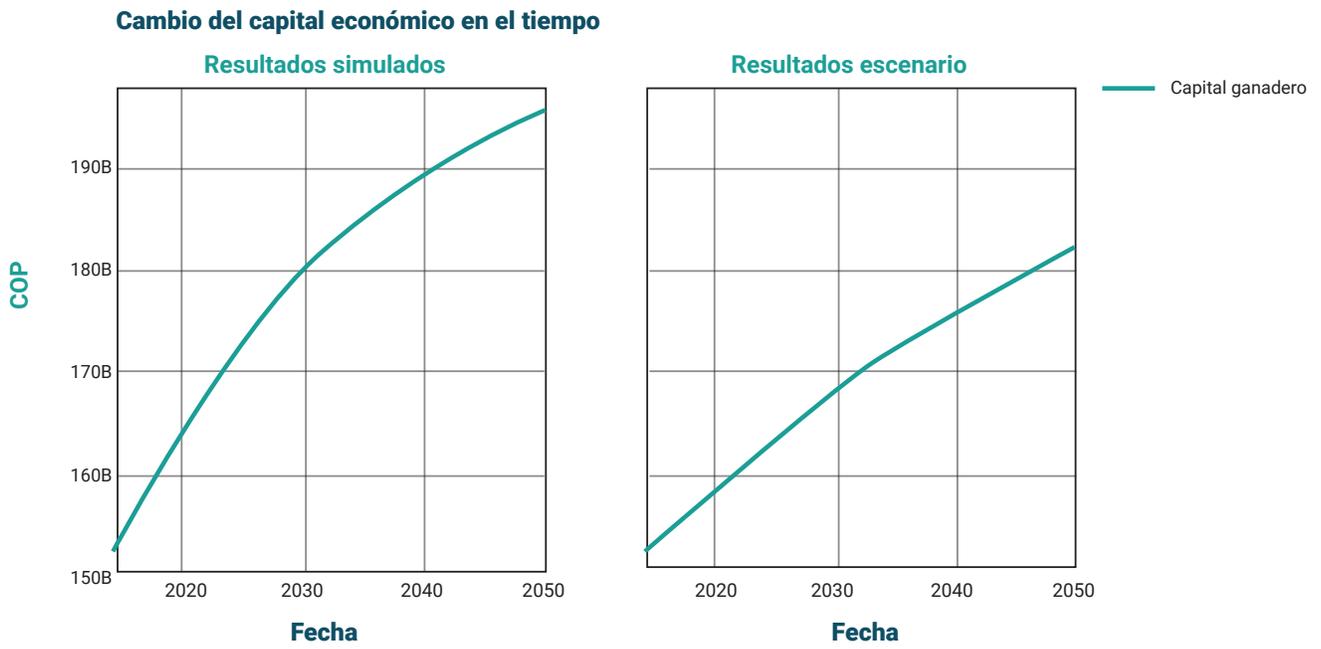
## Cambio del capital económico en el tiempo



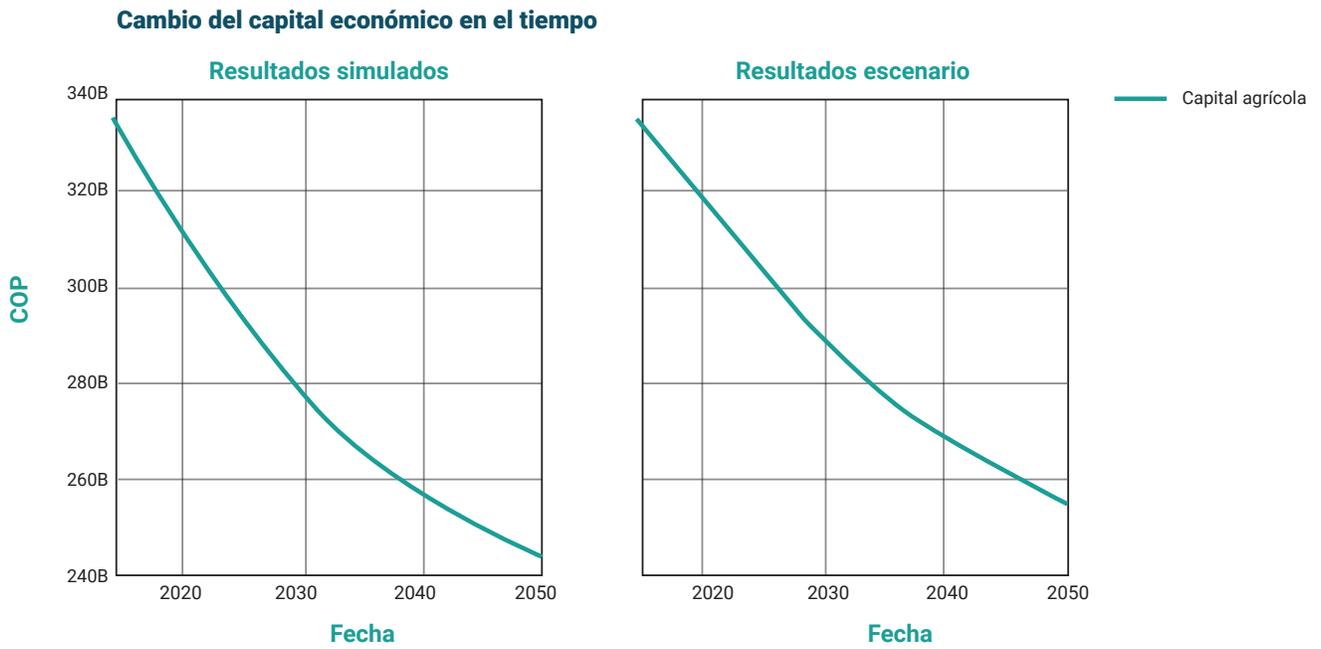
**Figura 58.** Ingresos por café.

Se mantiene y aumenta la producción de café, baja la tasa de desempleo y aumenta el turismo relacionado al Paisaje Cultural Cafetero (PCC). La agricultura y la ganadería son poco viables por su regulación y control, pero aún atraen a la población.

La apuesta por el turismo (asociado al PCC y a otras formas de turismo) es una opción generadora de ingresos y de empleo; debe ser controlada y sostenible para bajar su impacto.



**Figura 59.** Ingresos por ganadería (Reina PMEH 2021).



**Figura 60.** Ingresos por agricultura.

## 6. Lineamientos



El PMEH planteó que se cuantificaran y analizaran variables determinantes en la salud de los hidrosistemas, a través del modelamiento hidrológico, hidrodinámico, socioecológico y trófico. Además, evaluó las amenazas asociadas a la sedimentación, alteración del régimen hídrico, cambio climático y otras presiones sobre el recurso hídrico, para comprender la dinámica de los ecosistemas acuáticos de la macrocuenca, tomando de referencia tres ventanas como sitios representativos de diferentes sectores de ella (complejos cenagosos de Ayapel, Zapatosa y cuenca río La Vieja). También, brindó insumos a procesos de política e instrumentos que orientan y fortalecen la gobernanza y capacidades locales en la gestión de ecosistemas dulceacuícolas, incorporando la salud de los mismos y la biodiversidad en la toma de decisiones de la planeación ambiental y del territorio.

Los enfoques y resultados del PMEH son contribuciones de información actualizada, relevante e integral, enfocada en el recurso hídrico, sus dinámicas ecosistémicas, conductas y acciones sociales, a partir de bases técnicas y científicas consistentes para la gestión de ecosistemas dulceacuícolas, que brindan o complementan fundamentos a instituciones públicas, a otros actores sectoriales y de la sociedad en general, para fundamentar análisis y directrices/lineamientos de gestión ambiental, territorial y de gobernanza efectiva.

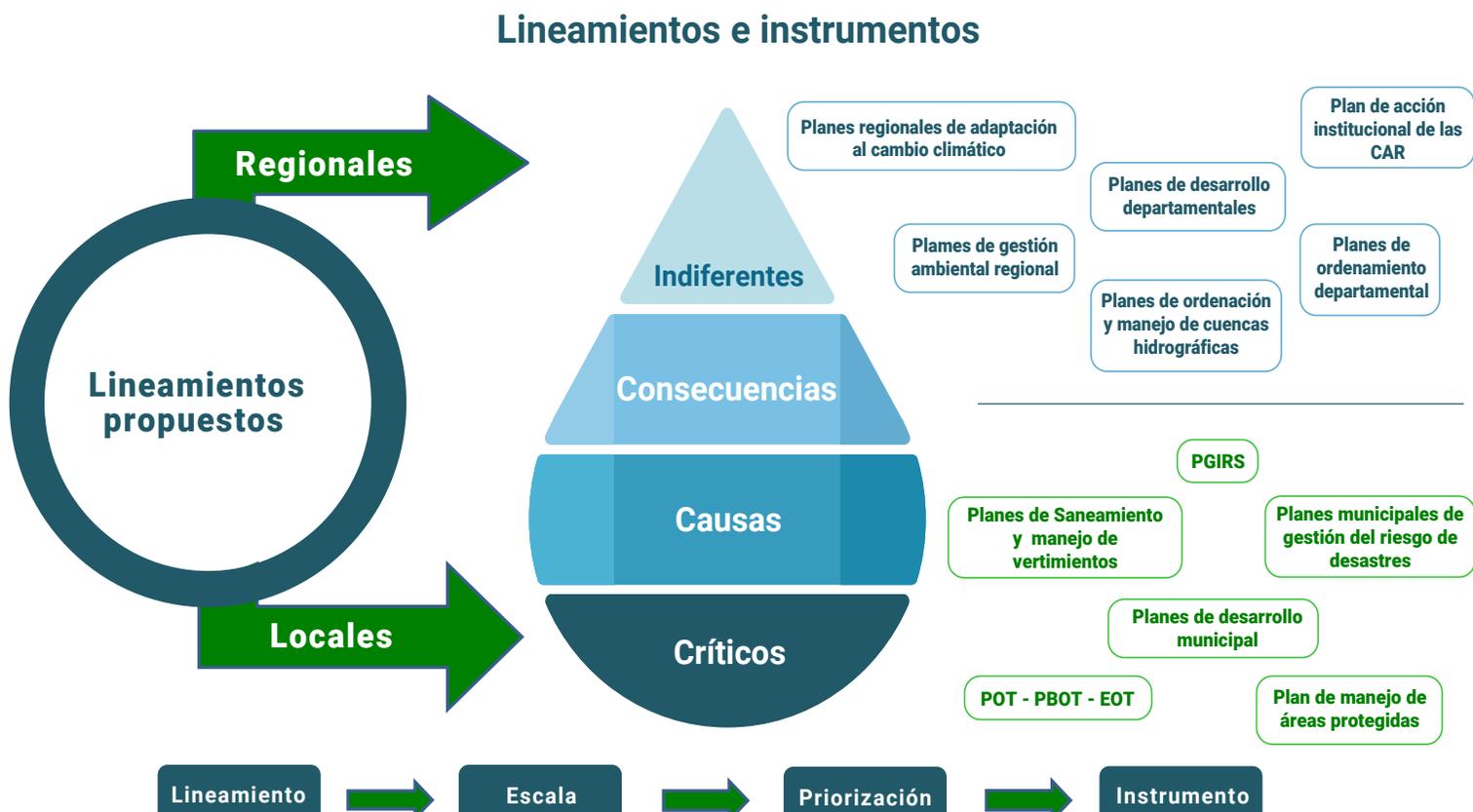
Los documentos y procedimientos detallados utilizados para elaborar las propuestas de lineamientos por parte del equipo se encuentran en el siguiente enlace:



Para mayor información descarga el documento adjunto. Este material hace parte de los informes técnicos del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive y no cuenta con un proceso de edición y corrección de estilo.

## 6.1. Metodología para consecución y revisión de información

Para las tres ventanas de trabajo se aplicó el esquema metodológico de la Figura 61, se analizaron los instrumentos de gestión ambiental, ordenamiento y planificación; se identificaron los actores del territorio y se obtuvieron insumos a través de una matriz DOFA, por parte de las entidades formuladoras de políticas en cada ventana estudiada.



**Figura 61.** Esquema metodológico, formulación y lineamientos en territorio PMEH (Pineda, 2021).

Con la matriz Vester y la revisión de resultados de las modelaciones, se hizo un ejercicio de marco lógico y propusieron lineamientos para aportar de manera específica al uso, manejo y conservación de los ecosistemas dulceacuícolas, por medio de talleres, reuniones, conversatorios, intercambio de información y experiencias, diligenciamiento de encuestas y formularios, matrices relacionadas con el desarrollo, articulación, eficiencia, aplicación, evaluación, seguimiento y control en la implementación de normativa, instrumentos de planificación ambiental y territorial y políticas, con actores institucionales, comunitarios y académicos.

## 6.2. Enfoque ecohidrológico para estimar y promover la salud de los ecosistemas

Las capacidades y recursos con las que cuentan las entidades ejecutoras de políticas e instrumentos son factores que afectan el éxito en la ejecución de políticas y sus instrumentos. A partir de los enfoques y resultados del PME H se brindan aportes, con información y conocimiento de rigor técnico y científico, que facilita y promueve la construcción y análisis de argumentos en la toma de decisiones, para mejorar la efectividad de instrumentos, particularmente en los municipios/territorios donde se hizo la modelación, así como en el planteamiento de políticas locales-regionales ajustadas a las necesidades y problemáticas priorizadas, que estratégicamente deban tener enfoques hacia la salud de los ecosistemas.

Los resultados de la modelación ecohidrológica presenta potencial de uso, entre otros, en:

- Diagnósticos ambientales de instrumentos de planificación ambiental y territorial. Manejo, planeación y mantenimiento de cuencas (evaluación de infraestructura, escenarios futuros, cambio climático).
- Pronóstico (tránsito de niveles y cotas de inundación).
- Determinación de la demanda y distribución de agua (abastecimiento y riego).
- Construcción de mapas y definición de zonas de riesgo por inundaciones (crecientes súbitas y lentas, impactos por fenómenos de inundación, mapas de amenaza, obras de protección y/o mitigación, planes de ordenamiento, pronóstico y prevención).
- Directrices en la regulación de caudales.
- Caracterización geomorfología y dinámica fluvial (erosión - sedimentación).
- Análisis de calidad de agua (transporte de sedimentos, difusión de contaminantes, cambios en la temperatura, eutrofización).
- Geomorfología y dinámica fluvial (procesos de erosión, sedimentación, socavación).
- Verificación en el análisis y consistencia de datos hidrométricos y de calidad de agua.
- Diseño de estructuras hidráulicas (protecciones, regulación, drenaje rural y urbano).
- Diseñar e implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

- Orientar el ordenamiento ambiental del territorio al uso sostenible y conservación de ecosistemas estratégicos, como medio para asegurar bienes y servicios ambientales.
- Respaldo el direccionamiento estratégico (políticas e instrumentos) y concertación en el ordenamiento territorial (determinantes ambientales).
- Diseñar e incorporar líneas estratégicas por parte de los entes territoriales, articuladas en los instrumentos de ordenamiento, planificación y gestión ambiental, para la generación de acciones que mitiguen y controlen los impactos en la cuenca.
- Promover medidas de adaptación basada en ecosistemas, a través de rehabilitar canales naturales, mantener los ya existentes y recuperar ecosistemas.
- Promover el monitoreo a largo plazo de sedimentos, y generar estrategias para detectar las áreas fuentes de aporte en los planes de acción de instrumentos de planeación.

### 6.2.1. Línea socioecológica

El desarrollo de la caracterización de cada uno de los ecosistemas (complejo cenagoso de Zapatosa, complejo cenagoso de Ayapel y cuenca del río La Vieja), permite evidenciar posibles tendencias y rupturas en la realidad social, económica y cultural de cada una de estas áreas, y conocer las condiciones de vida de las poblaciones asentadas allí. La caracterización se basó en la revisión de fuentes secundarias, como artículos, capítulos de libros, documentos de políticas públicas, información estadística disponible, programas, proyectos, planes, entre otros, del DANE, la UPRA, la Aunap, el ICA y otras entidades. Esto, para saber cómo es el sistema de gobernanza de los ecosistemas estudiados.

La conceptualización de los sistemas sociales de cada una de las áreas presenta un enfoque socioecológico, pues el objetivo final consistió en estudiar las interacciones entre el sistema social y el ecológico de cada uno de los hidrosistemas del proyecto (ventanas).

## 6.2.2. Líneas hidrológica e hidrodinámica

El PMEH plantea propuestas de lineamientos y recomendaciones generales desde el análisis de resultados de las líneas de hidrología e hidrodinámica, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Tabla 24).

**Tabla 24.** Lineamientos y recomendaciones propuestos desde el enfoque y análisis de resultados de las líneas de hidrología e hidrodinámica del PMEH, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Machado, 2021).

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo PMEH
Uso del suelo	Fortalecer la normatividad y vigilancia del uso del suelo, rondas hídricas. Sensibilizar la importancia de su conservación y preservación.	Implementar jornadas de monitoreo y restauración de la vegetación ribereña y establecimiento de límites para la actividad antrópica.	Mapas y análisis multitemporal de coberturas del suelo Ayapel, cuencas de los ríos Cesar, San Jorge y La Vieja, 2002 al 2020.
	Implementación de modelos participativos de ordenación y ocupación del suelo de la cuenca.	Conocer e identificar las amenazas que representan para las cuencas los escenarios tendenciales RCP 8.5 del uso y cobertura del suelo, trabajados por el PMEH. Se recomienda realizar las modelaciones de cambio de coberturas de la tierra, con capas más detalladas y de periodos de tiempo más cortos, para poder evaluar la dinámica de algunas coberturas de reciente aparición en las cuencas.	Escenarios tendenciales de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, relacionados con las variables que aceleran el efecto de los gases de efecto invernadero (GEI).  Modelos de cambio climático con información de los RCP 4.5 y 8.5 para las ventanas de las ciénagas de Ayapel, Zapatosa y cuenca del río La vieja.
	Uso y manejo integral del suelo de la cuenca, por su vocación y necesidades de conservación, y recuperación de recursos naturales conexos.		
Direccionamiento estratégico	Formulación de lineamientos para el pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica.	Evaluar los servicios ambientales que ofrecen las ciénagas, relacionados con la calidad hídrica (propiedades fisicoquímicas).	Documento Análisis integral de la calidad del agua en el complejo cenagoso de Zapatosa.
Concertación en el ordenamiento territorial	Armonización de instrumentos de planificación, con los lineamientos del Pomca y su implementación.	Incorporar los resultados obtenidos por el PMEH, relacionados con la modelación hidrológica en las tres ventanas, a partir del ejercicio de los escenarios de uso del suelo y de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5).	resultados del PMEH de los modelos hidrológicos en las tres ventanas, escenarios de uso y cobertura del suelo y de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5).

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo PME H
Pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos	Evaluar la disminución del aporte del río San Jorge dentro del dominio de la ciénaga.	Realizar estudios de disponibilidad de fitoplancton y nutrientes, con respecto a los cambios en las variaciones de área y volumen de la ciénaga de Ayapel, ya que estos componentes afectan la biodiversidad acuática.	Resultados estudios de disponibilidad de nutrientes y fitoplancton, respecto a cambios en las variaciones de área y volumen de la ciénaga de Ayapel, pues afectan su biodiversidad.
Gestión del riesgo	Mejorar la capacidad de adaptación del ecosistema para mitigar el riesgo que representan los escenarios de cambio climático 8.5; así como sus amenazas que afectan el volumen de agua, el área de inundación, la disposición de nutrientes, sedimentos y de fitoplancton.	<p>Conocer e identificar las amenazas que representa el cambio climático. Formular, aplicar, publicar y actualizar programas con medidas orientadas a mitigar y facilitar la adaptación adecuada al cambio climático.</p> <p>Promover y apoyar el desarrollo y la aplicación de tecnologías, prácticas y procesos que reduzcan o prevengan las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), en sectores como el energético, el industrial, la agricultura y la gestión de desechos que se generen en la región.</p> <p>Promover la gestión sostenible y apoyar la conservación de los bosques y ecosistemas acuáticos como sumideros de GEI.</p>	Resultados de las simulaciones hidrológicas hidrodinámicas, tróficas y sociales del PME H, para diversas posibilidades de las tres ventanas de trabajo, con énfasis en los escenarios de cambio climático, uso y cobertura del suelo.
	Fortalecer el monitoreo de variables climatológicas en las redes hidroclimáticas, y en algunos casos de morfo dinámicos (red de monitoreo de laderas y taludes).	<p>Realizar registros y monitoreo de calidad de agua con fines de calibración del modelo hidrológico en fuentes importantes.</p> <p>Estimar demanda de agua por sector, con mejor información de la cuenca.</p>	
Sedimentación	Monitorear y evaluar la entrada de sedimentos al ecosistema y su efecto en la conectividad, así como en las condiciones ambientales locales.	<p>Mejorar acople en modelación de sedimentos, pues un modelo hidrológico no explica su dinámica en la cuenca.</p> <p>Mejorar la red hidrométrica de caudales y sedimentos: hay pocas estaciones con registros para calibrar los modelos.</p>	

### 6.2.3. Línea biótica

El PME H plantea propuestas de lineamientos y recomendaciones generales desde el análisis de resultados de la línea biótica del PME H, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Tabla 25).

**Tabla 25.** Lineamientos y recomendaciones propuestos desde el enfoque y análisis de resultados de línea biótica del PMEH, respecto a problemáticas socioambientales que inciden en la salud de los ecosistemas dulceacuícolas (Machado, 2021).

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo del PMEH
Uso del suelo	Fortalecimiento de la normatividad y vigilancia del uso del suelo de la ronda hídrica. Sensibilización de la importancia de su conservación y preservación.	Implementar jornadas de monitoreo y restauración de la vegetación ribereña y establecimiento de límites para la actividad antrópica.	Coberturas del suelo de las cuencas de los ríos Cesar, San Jorge y La Vieja, en el periodo de 2002 a 2020. Mapas y análisis multitemporal de coberturas del suelo: Ayapel 2002 - 2020. Zapatoza 2002 - 2020. La Vieja 2002 - 2020.
Pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos	Identificar, gestionar y conservar los ecosistemas estratégicos dentro del complejo cenagoso de Zapatoza, controlar las poblaciones de especies de peces introducidas y establecidas, y evitar la llegada de especies nuevas. Identificar las variables que permitan monitorear los efectos del cambio climático y su efecto en las comunidades hidrobiológicas.	Realizar inventarios y monitoreos de los ecosistemas de transición entre las fases terrestre y acuática en el complejo cenagoso.	Escenarios de modelación trófica: variables forzantes.  Comportamiento de los grupos funcionales en el tiempo, afectados por la variabilidad de la calidad del agua (sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos, oxígeno disuelto, temperatura del agua), cuyos datos son obtenidos del escenario de cambio climático 4.5.  Escenarios de modelación trófica con variables forzantes y análisis que afectan la calidad de agua, con un tiempo proyectados a 35 años (Ayapel).
		Realizar monitoreos de la estructura de las comunidades hidrobiológicas y la configuración de la red trófica, que permita registrar las respuestas de las comunidades hidrobiológicas a los cambios ambientales.	Producto final (análisis de resultados escenarios Ecosim).  Análisis del escenario de la modelación trófica de la variabilidad en la calidad del agua en el escenario 4.5 (Zapatoza y Ayapel).  Escenarios de modelación trófica con variables forzantes y análisis que afectan la calidad de agua, con una proyección a 35 años (Zapatoza).
		Monitorear y establecer medidas de control de las poblaciones de especies invasoras, como estimular su pesca.	Resúmenes ejecutivos de la modelación trófica para las ventanas de estudio (Zapatoza, Ayapel y La Vieja).  Análisis integral de la calidad del agua en Zapatoza.

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo del PME H
Pérdida de la biodiversidad y servicios ecosistémicos	Fortalecimiento en el monitoreo y evaluación del impacto en la red trófica, causado por el vertimiento de sustancias en el agua, ricos en nitrógeno y fósforo, que puede ocasionar eutrofización y pérdida de la calidad del agua y de la biodiversidad acuática.	Identificar y hacer un seguimiento de los descargues de aguas residuales al cuerpo de agua.	Escenarios de modelación trófica: variables forzantes. Comportamiento de los grupos funcionales en el tiempo, afectados por la variación de la calidad del agua (sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos, oxígeno disuelto, temperatura del agua); datos obtenidos escenario de cambio climático 4.5. Escenarios de modelación trófica con variables forzantes y análisis que afectan la calidad de agua, con una proyección a 35 años (Ayapel).
		Tomar muestras de aguas residuales, para su análisis en el laboratorio, y verificar que se cumpla con la normativa para descargues de aguas en el sistema.	Producto final (análisis de resultados escenarios Ecosim). Análisis del escenario de la modelación trófica de la variabilidad en la calidad del agua en el escenario 4.5 (Zapatoza y Ayapel). Escenarios de modelación trófica con variables forzantes y análisis que afectan la calidad de agua, con una proyección a 35 años (Zapatoza).
		Muestrear el estado de las comunidades hidrobiológicas e identificar los grupos que pueden ser bioindicadores de la calidad del agua.	Resúmenes ejecutivos de la modelación trófica para las ventanas de estudio (Zapatoza, Ayapel y La Vieja). Análisis integral de la calidad del agua en Zapatoza.
		Modelar el ensamblaje trófico de acuerdo a las variables forzantes que juegan un papel importante en los grupos funcionales, como la concentración de nitrógeno y de fósforo.	

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo del PME H
Pesca indiscriminada - sobrepesca	Regulación del uso de los artes de pesca usados en el complejo cenagoso, considerando las especies que son impactadas directamente por la extracción pesquera, e indirectamente por la disminución de las poblaciones de los depredadores.	Concertación con las comunidades para regular la frecuencia y la intensidad del uso de los artes de pesca que causan mayor impacto en el ecosistema a mediano y largo plazo, como es el caso específico de la red de enmalle fijo.	Escenarios de modelación trófica: uso de las artes de pesca.  Comportamiento de los grupos funcionales en el tiempo afectados por el uso de los diferentes artes de pesca empleados en las ventanas de estudio de Zapatos y Ayapel (redes de enmalle de deriva y fija continental, atarraya, palangre calendario).  Escenarios de actividad de las artes de pesca y su efecto sobre la dinámica de la red trófica, proyectado a 15 años y análisis (Zapatos)
	Regular y sensibilizar a la comunidad sobre el uso de los artes de pesca en la ciénaga y su efecto a mediano y largo plazo, del uso de la red de enmalle fijo, la más usada y la que más impacta el ecosistema acuático, afectando la configuración de la red trófica sobre las poblaciones de peces de interés comercial.	Establecer mecanismos de incentivo económico para desestimular el uso de artes de pesca muy impactantes y poco selectivas.	Datos históricos de desembarcos (Zapatos y Ayapel) de los artes de pesca 2013 - 2019.  Registros históricos de las especies de peces de interés pesquero con mayor incidencia de captura, para los artes de pesca usados en las ciénagas de Zapatos y de Ayapel, comprendidos entre los años 2013 a 2019 (información proporcionada por el Sepec y trabajada por el PME H).  Escenarios de actividad de las artes de pesca y su efecto sobre la dinámica de la red trófica, proyectado a 15 años y análisis (Ayapel).
		Evaluar el efecto que tienen las artes de pesca extensivas como las redes de enmalle sobre las poblaciones de los peces y su impacto sobre la red trófica del sistema (en el tiempo y en la intensidad de las actividades pesqueras).	Producto final (análisis de resultados escenarios Ecosim).  Análisis de los escenarios de la modelación trófica del uso de las artes de pesca en el tiempo (Zapatos y Ayapel). Comportamiento de la red trófica en función de los muestreos y condiciones medias de las campañas realizadas por el PME H (Zapatos).
		Realizar estudios de la estructura y la composición de la comunidad de las especies de peces modeladas.	Resúmenes ejecutivos de la modelación trófica para las ventanas de estudio (Zapatos, Ayapel y La Vieja).  Comportamiento de la red trófica en función de los periodos hidrológicos y condiciones medias de las ciénagas.
		Buscar y generar otras alternativas de subsistencia para controlar el uso de artes de pesca invasivos y destructivos para el ecosistema, a lo largo de todo ciclo hidrológico. Que haya un período hidrológico para que las poblaciones de peces se recuperen del efecto de la pesca y mantener el recurso.	Modelación trófica por periodo hidrológico (Ayapel) y por campaña (Zapatos).  Descripción: índice de especies clave por periodo hidrológico (Ayapel) y por campaña (Zapatos), mostrando el impacto en la red trófica que tienen aquellas especies de peces que mantienen la integridad del ecosistema.

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones	Insumo del PMEIH
Alternativas económicas con sostenibilidad financiera	El monitoreo periódico del ecosistema acuático y sus ambientes estratégicos permiten registrar los cambios ocurridos como respuesta a actividades antrópicas y su afectación a los servicios ecosistémicos.	Promover la implementación de proyectos productivos sostenibles, enmarcados en el contexto del cambio climático y los conflictos ambientales de la región.	Análisis integral de las comunidades hidrobiológicas en la ciénaga de Zapatosa.  Resultados obtenidos de la estructura y composición de las comunidades hidrobiológicas (fitoplancton, perifiton, zooplancton, macroinvertebrados asociados a fondos blandos y a macrófitas, peces, macrófitas) y su correlación con las variables fisicoquímicas analizadas por el PMEIH en Zapatosa en los tres muestreos.
		Empoderar a la ciudadanía, de manera que se apropie de los recursos naturales y su potencial productivo.	Resultados de los análisis de las comunidades hidrobiológicas (Aquarius Sampler, Ideam).
Expansión de la frontera agrícola y ganadera	Identificar con claridad los suelos de las rondas hídricas, como ambientes estratégicos del complejo cenagoso, considerando su importancia ecológica en época de aguas altas, de manera que no sean utilizados con otros fines como el gramaloteo o la ganadería.	Sensibilizar a la población en lo que tiene que ver con la importancia ecológica que representan las franjas de transición entre la fase acuática y la terrestre del ecosistema, e involucrarlos en su cuidado y conservación.	Mapas de frecuencia de inundación (mes a mes), a lo largo del ciclo hidrológico).
		Implementación de proyectos productivos sustentables.	Uso de coberturas del suelo (Zapatosa, Ayapel, La Vieja).  Mapas de coberturas del suelo y análisis temporal de los cambios que han experimentado los mismos en La Vieja, Ayapel y Zapatosa.  Mapas y análisis multitemporal de coberturas del suelo en La Vieja, Ayapel y Zapatosa, 2002 – 2020.
Sedimentación	Monitorear y evaluar la entrada de sedimentos al ecosistema y su efecto en la conectividad, así como en las condiciones ambientales locales	Promover e implementar el control de entrada de sedimentos al complejo cenagoso, así como su efecto directo en los ambientes estratégicos encargados de proveer refugio y alimento a especies clave (en términos ecológicos), de importancia económica o cultural.	Resultados de la concentración de sedimentos en las tres campañas realizadas en Zapatosa.  Resultados de la concentración de sedimentos en junio, noviembre de 2019, y marzo de 2020.
			Escenarios de modelación trófica: variables forzantes.  Comportamiento de grupos funcionales en el tiempo, afectados por la variabilidad de la calidad del agua (sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánicos, oxígeno disuelto, temperatura del agua), cuyos datos son obtenidos del escenario de cambio climático 4.5.  Escenario del comportamiento de la red trófica a partir de variables ambientales obtenidas de cambio climático RCP 4.5, proyectada a 35 años para las ciénagas de Zapatosa y Ayapel.

## 6.3. Aportes del PMEHE para la capacidad institucional

La oferta de resultados y/o productos del PMEHE es importante referencia que retroalimenta algunos proyectos e iniciativas relacionadas con recuperación de cuerpos de agua, manejo pesquero y alternativas socioecológicas vigentes a 2021, implementadas por entidades como autoridades ambientales o territoriales, de los tres socioecosistemas, en el sentido de que se pueden mejorar sus enfoques, así como evaluar el logro de metas u objetivos, para tomar decisiones respecto a su continuidad, reactivación o redireccionamiento.

De las experiencias con los actores territoriales surgen las siguientes propuestas:

### 6.3.1. Aportes del PMEHE para ODS

Acorde con ONU (2017), los principales aspectos en materia de agua dulce quedan cubiertos en el contexto del desarrollo sostenible con el ODS 6: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, amplía integralmente su entendimiento y logro al reconocer la directa relación del agua con los ecosistemas, junto con la meta 11.5 de los ODS sobre los desastres relacionados con el agua (ONU, 2017).

El ODS 6 no se centra en el agua potable y el saneamiento básico, sino que integralmente, se liga a la seguridad hídrica. La meta 6.3 va a mejorar la calidad de las aguas, esencial para proteger tanto la salud de los ecosistemas (alineado con meta 6.6 y ODS 14 y 15), como la salud humana (fuentes de agua potable, agua como servicio cultural).

En este contexto, los resultados del PMEHE aportan al conocimiento y hacen un análisis en estos aspectos del recurso para cada sistema estudiado. Asimismo, suministra información relacionada con el indicador mundial 6.3.2. “Porcentaje de cuerpos de agua de buena calidad” (ONU, 2017).

### 6.3.2. Para el fortalecimiento de lineamientos de políticas e instrumentos sectoriales

En las tablas de lineamientos ya mencionadas se aprecia el aporte que se hace a estos instrumentos de planificación, tanto nacional, como territorial.

### 6.3.3. Propuestas medidas de gestión hídrica

Los resultados del Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH) del proyecto se disponen en la Subdirección de Hidrología del Ideam, para promover su uso y manejo en el marco de los objetivos del sistema de información ambiental de Colombia (SIAC) (Tabla 26).

A continuación, se relacionan los principales lineamientos que se consideran pertinentes:

**Tabla 26.** Lineamientos hacia medidas de gestión hídrica con destino al SIAC.

Problemáticas asociadas a ecosistemas dulceacuícolas	Lineamiento	Recomendaciones
<b>Gestión del riesgo</b>	<p>Establecer mecanismos que permitan a los municipios aledaños a las ventanas de trabajo (ciénagas Zapatosa, Ayapel y río La Vieja) evaluar amenazas de inundación, para sus procesos de ordenamiento territorial y manejo de cuencas, identificando las zonas con riesgo, dentro de las áreas de influencia de los cuerpos de agua.</p>	<p>Identificar las áreas inundables de los complejos cenagosos, a partir del análisis de frecuencia de máximos, para los periodos de inundación.</p> <p>Evaluar y retroalimentar planes de emergencia para controlar las inundaciones en esas áreas.</p> <p>Realizar actividades de prevención, para eliminar o bajar las incidencias por inundaciones, analizando la infraestructura, el uso del suelo, la economía y el manejo de riesgos por crecientes para los periodos de inundación en los complejos cenagosos (destaponamiento de los <i>box coulvert</i>, paso del agua de la Zapatosa al río Magdalena en niveles máximos).</p>
<b>Gestión del riesgo</b>	<p>Garantizar acciones para conservar la conectividad hídrica natural de ríos, afluentes principales de complejos cenagosos y otros ríos, basados en caudales mínimos.</p> <p>Evaluar dicho caudal, para que no pierda su conectividad hídrica natural: ríos Cesar, San Jorge (principales afluentes de los complejos cenagosos Zapatosa y Ayapel y río La Vieja).</p>	<p>Considerar el valor de caudal mínimo, necesario para regular las concesiones de agua destinadas al riego de cultivos de palma, minería, actividades agrícolas, entre otras.</p> <p>Identificado el ecosistema clave de las cuencas, evaluar el impacto de concesiones de agua sobre el río tributario de los complejos cenagosos, o ecosistemas transicionales o lenticos.</p>

<p><b>Biodiversidad y servicios ecosistémicos – riesgo de pérdida</b></p>	<p>Incluir, dentro de los proyectos productivos que reactivan la economía sectorial, estudios con los análisis de costo-beneficio que afecta la salud de los ecosistemas dulceacuícolas, biodiversidad y servicios ecosistémicos de los complejos de Zapatosa y Ayapel, en especial los dirigidos a la producción de peces no nativos, que impactan los ecosistemas por ser especies introducidas invasoras.</p>	<p>Monitorear el estado de las comunidades hidrobiológicas que conforman los ecosistemas Controlar y supervisar actividades de jaulas pesqueras que se encuentran dentro de las ciénagas, donde se cultivan especies no nativas para su consumo.</p> <p>Incluir en instrumentos de producción basada en naturaleza el fortalecimiento del valor público de los ecosistemas y la responsabilidad sectorial en la conservación o recuperación de los sistemas ecológicos ofertantes, asignando responsabilidades institucionales.</p>
<p><b>Uso del suelo, Gestión del riesgo</b></p>	<p>Fortalecimiento de la vigilancia del uso del suelo de la ronda hídrica, considerando la variabilidad de la zona de riesgo de inundación; difundir la importancia de su preservación y conservación en complejos cenagosos Ayapel, Zapatosa y río La Vieja.</p>	<p>Zonificar el uso del suelo, desde el riesgo de inundación, según los niveles máximos que alcanzan las ciénagas y el impacto que generan las actividades antrópicas (cultivos de corto plazo y ganadería) sobre la ronda hídrica, para Zapatosa, Ayapel y La Vieja.</p> <p>Reglamentar y garantizar la observancia del uso del suelo, integrando el reglamento a la legislación municipal, relacionado con construcciones, propiedad de lotes y viviendas.</p> <p>Evaluar y controlar el impacto que genera la pérdida de las coberturas naturales aledañas a la ronda hídrica, donde se ha generado la expansión de los cultivos agroforestales y de palma. Identificar, estudiar y zonificar los hábitats preferidos por los peces para vivir en las dos ciénagas, y conservar las poblaciones de peces de interés comercial.</p> <p>Evaluar el menor impacto que pueda ocasionar, en el suelo de la ronda hídrica de las ciénagas, un número limitado de reses presente en el área permitida, en la zona inundable.</p>
<p><b>Concertación en el ordenamiento territorial</b></p>	<p>Incluir en los proyectos de restauración de rondas los resultados de la modelación hidrológica e hidrodinámica de las ventanas de estudio, considerando los criterios sociales, de biodiversidad o económicos, según las características de los ecosistemas.</p>	<p>La restauración debe enfocarse a temas de cobertura vegetal y de suelos.</p>

# 7. Conclusiones

- Los resultados de los escenarios futuros donde se combina clima y coberturas del suelo tienen un gran impacto sobre la recarga y la regulación hídrica; son útiles porque brindan orientación en la planificación del recurso; por tanto, se debe priorizar su uso.
- La respuesta hidrológica del modelo río San Jorge, involucra la precipitación, evapotranspiración real, escorrentía directa y caudal subsuperficial por tipo de cobertura. Allí, las coberturas altas y densas permiten un mayor caudal subsuperficial y menor escorrentía frente a coberturas de manto rocoso, afloramientos o de minería en los caudales superficiales, los cuales son mayores.
- De manera general para las cuencas de análisis, se requiere mejorar el cubrimiento de la red hidrométrica de niveles, caudales, climatología (lluvia, temperatura, radiación, velocidad del viento entre otras), calidad de agua, sedimentos, aguas subterráneas, para disponer de más datos que permitan aplicar diversas metodologías, fortalecer el conocimiento de los ecosistemas y robustecer los modelos construidos.
- Se recomienda realizar las modelaciones de cambio de coberturas de la tierra con capas más detalladas y de periodos de tiempo más cortos, para poder evaluar la dinámica de algunas de reciente aparición como el aguacate Hass (cuenca del río La Vieja).
- Muchos otros casos se pueden estudiar a partir de los modelos hidrodinámicos construidos, base para la comprensión de los ecosistemas acuáticos. En los complejos cenagosos Zapatos y Ayapel, se presentan como un todo, en el que se puede apreciar la propagación de efectos locales a zonas mayores, caso de la bifurcación en la ciénaga de Zapatos (caño Cachaco-río Cesar) y sus efectos aguas abajo; o la doble conexión de la ciénaga de Saloa con el río Cesar, que genera condiciones especiales. El modelo hidrodinámico construido debe avanzar en la incorporación de procesos físicos de interés, como la calibración del modelo de fitoplancton. Así, las estimaciones de los nutrientes tendrán una interpretación cuantitativa, y no solo reproducción de patrones. Se necesita un ejercicio de calibración más exhaustivo, limitado aquí por los altos requerimientos computacionales de un dominio extenso y refinado.
- Otra ruta a seguir se da por el estudio de la variación en profundidad de la temperatura, perfiles de oxígeno, fitoplancton y otros, que lleva a construir un modelo tridimensional, posible en Telemac. Los altos costos computacionales sugieren seleccionar un dominio reducido, a partir del modelo actual que les da condiciones de frontera.
- Desde la perspectiva de la información producto de los modelos hidrológicos, hay un alto potencial de aplicación de los índices o indicadores de salud del ecosistema disponibles.
- La correcta representación de la concentración de sedimentos en las ciénagas mejora la capacidad predictiva de otras variables fundamentales, como la biomasa de fitoplancton.

- Con la modelación hidrodinámica se comprenden muchos de los fenómenos presentes; los escenarios permiten anticiparse a los efectos de intervenciones en el hidrosistema.
- A partir de los modelos sociales elaborados por el proyecto, y ante la carencia de herramientas computacionales disponibles para dicha modelación, se requiere avanzar en su construcción y uso, vinculando y fortaleciendo a las ciencias sociales y humanas a ello.
- La ausencia de mediciones cuantitativas en aspectos como, la cohesión social de la comunidad o la percepción de gobernabilidad y de sus datos históricos, entre otros, evidencia la urgencia de iniciar la generación de esa información y disponer de herramientas para su recolección y almacenamiento, necesaria para entender los territorios desde lo socioeconómico y apoyar el refinamiento de futuras modelaciones sociales.
- Una importante contribución al conocimiento de los sistemas ecológicos se hace con la modelación matemática, con una interpretación cuantitativa de los fenómenos que ocurren, contribuyendo a plantear políticas de conservación y manejo más eficientes, ajustadas a la realidad del ecosistema y en un marco de sostenibilidad.
- La modelación ecotrófica identifica las especies clave en la configuración de la red trófica; permite formular soluciones de protección y conservación de ellas, de la funcionalidad integral del ecosistema y sus procesos ecológicos fundamentales.
- La actividad pesquera contribuye a la cohesión social, fomentando identidad y responsabilidad que ayuda a los individuos a sentirse miembros de una o varias comunidades y de la sociedad en general. Además, resulta muy importante para las comunidades ribereñas de las ciénagas por: a) ser recurso de uso común, fuente de trabajo para cualquier individuo o grupo, reconocida actividad de su capital económico que crea medios de vida; b) incidir en la seguridad alimentaria de la población; c) ser patrimonio cultural inmaterial (Fundación Alma, 2020).

La red de enmalle fijo es el arte de pesca más utilizado en las ciénagas de Zapatosa y Ayapel, y el que más impacta el ecosistema. Al plantear restricciones en su uso, la modelación muestra el beneficio de la medida para toda la red trófica (biomasas y ensamblaje trófico). La mayoría de las especies de interés pesquero son depredadoras y generan un impacto en los niveles tróficos inferiores (sus presas). Al plantear estrategias de uso sostenible de los artes de pesca se protege el recurso pesquero y la red trófica en general.

- La modelación referida a pesca para las ciénagas es un aporte a las autoridades pesqueras para evaluar el impacto que pueden ocasionar los diferentes artes de pesca, recopilar datos de campo y tomar decisiones encaminadas a la conservación del recurso pesquero.
- La ciénaga de Ayapel está regida por un control de tipo *top-down*, en el que los máximos depredadores, como peces carnívoros y mamíferos, controlan los flujos energéticos del sistema, manteniendo estable la dinámica de sus presas y los niveles tróficos basales.

- Los resultados obtenidos por el programa de modelación ecohidrológica son un aporte a la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), directamente relacionados con la salud de los ecosistemas dulceacuícolas y la seguridad hídrica, a los principios y enfoques de planificación de cuencas, que trasciende de las entidades del sector ambiental, a la **corresponsabilidad sectorial y social**, que exige el relacionamiento directo de actores y la coordinación interinstitucional, acción a fortalecer y hacer efectiva si se quiere lograr el **arraigo del valor público que representan en las cuencas, los ecosistemas, sus recursos naturales y los servicios ecosistémicos**; necesario en una gestión y gobernanza efectiva.
- Existen políticas públicas nacionales dirigidas a la gestión integral de los recursos naturales, como las referidas al recurso hídrico, los ecosistemas de humedales interiores y la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos. Las configuraciones y representaciones que se evidencian a lo largo del tiempo en el estado de los ecosistemas y el agua misma en los territorios denotan la **necesidad de reevaluar y replantear** la aplicación de responsabilidades de su uso y manejo, para mejorar la gobernanza, **garantizar el acceso al agua y el saneamiento básico**, así como avanzar en acciones para un **equilibrio entre la conservación el desarrollo social y económico**, acorde con la seguridad hídrica que el país necesita.
- Para la formulación de las propuestas de lineamientos hacia el sector agua y saneamiento básico se consideraron aspectos sobre los que se reflexiona aquí:

**1.** La información disponible en fuentes oficiales requiere integrar o articular los mecanismos de colecta y sistemas de información que llenen vacíos y reduzcan las brechas existentes, sobre los lineamientos de planificación e indicadores que evalúa su evolución.

**2.** Coordinación territorial e intersectorial. Conceptualmente se reconoce la interrelación entre el sector agua y saneamiento básico, con el ambiental, el de salud y productivos. En la práctica **se evidencia una desarticulación** con los aspectos que involucra la gestión integral del recurso hídrico. Esto lleva al **cruce o desconocimiento de roles y competencias y falencias** en los procesos de planeación y ejecución de los proyectos.

**3.** Fortalecimiento de los procesos de formulación e implementación de proyectos. La asistencia técnica por parte del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio y las autoridades ambientales a los entes territoriales y prestadores de servicios técnicos debe ser más **amplia y estratégica a los territorios**, para orientar las diferentes etapas de los proyectos del sector, y garantizar el cumplimiento de los mínimos ambientales.

- Promover estrategias de arriba hacia abajo, como de abajo hacia arriba, para la planeación, gestión y/o toma de decisiones multi-actores, desde el ámbito nacional, hasta el regional y local, en la cuenca hidrográfica, poniendo en práctica y evaluando la efectividad de los lineamientos de política existentes, y subsanando limitantes, brechas o vacíos en los contextos locales o particulares de cada territorio, que no se percatan desde lo nacional:

**1.** Deben darse decisiones vinculadas al agua tomadas en el ámbito local, alineadas con el logro de objetivos que respondan a nivel de macrocuenca y nacional con la **visión, convicción y conciencia** de que las acciones de cada actor y sector **afectan e impactan**, desde las microcuencas, sobre la cuenca, el acuífero, el río y la macrocuenca. Por tanto, las decisiones deben asumir el rol y competencia en un **marco de comunicación y coordinación multinivel**.

**2.** Las instituciones locales y regionales deben reconocer y apropiarse sus responsabilidades, operar bajo directrices propias en sus jurisdicciones, **garantizando alineación y retroalimentación** con políticas y lineamientos de nivel superior, bajo los principios de **coordinación, concurrencia y subsidiariedad**, con armonía regional y normativa.

**3. Adelantar participativamente el escalamiento** de políticas e instrumentos nacionales de gestión integral del recurso hídrico y de la biodiversidad y servicios ecosistémicos enfocados en la **seguridad hídrica y salud de los ecosistemas** en el ámbito municipal, dentro de la normativa vigente, **alineados** con otras políticas sectoriales; con compromisos y metas de país, y liderado por los gobiernos municipales y/departamentales.

- Los resultados del proyecto brindan información y comparten conocimiento de variables ecohidrológicas y socioecológicas ante escenarios de variabilidad, cambio climático y riesgo, como aporte para aumentar la conciencia pública sobre los problemas de degradación de ecosistemas y el recurso hídrico, tratando el agua como un bien social y económico y dando valor público a los ecosistemas.
- Generar y transmitir conocimiento para: i) desarrollar la capacidad de los diversos actores; ii) comprender mejor los desafíos de la salud de los ecosistemas y la seguridad hídrica; iii) evaluar económicamente afectaciones a los recursos hidrobiológicos, daños a los ecosistemas dulceacuícolas y a servicios ecosistémicos; iv) fortalecer y constituir alianzas multiescala, así como mejorar enfoques de financiación y de sostenibilidad financiera.

## 8. Referencias bibliográficas

Aguilera-Díaz, M. (2009). *Ciénaga de Ayapel: riqueza en biodiversidad y recursos hídricos*. Banco de la República.

Angelini, R., Aloísio, G. R., Carvalho, A. R. (2010). Mixed food web control and stability in a Cerrado river (Brazil). *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5 (3), 421– 431.

Arias, M., Chadid, M., González, J. Cubillos, A., Cubillos, A., Joubert, Zúñiga, E. (2018). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005 – 2015*. FAO

Ayivi, F., Jha, M. K. (2018). Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT. *International Soil and Water Conservation Research*, 6 (3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>

Barros, M. (2021). *Calibración del modelo hidrodinámico de la ciénaga de Ayapel* [proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Bonilla-Pérez, L. (2021). Productos 9 y 10. Modelamiento hidrológico cuenca del río La Vieja (junio y agosto de 2021). [Contrato FN-039-20, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Cañón-Hernández, J. (2021). Productos 5, 7, 9 y 10. Modelo hidrológico refinado en la cuenca del río Cesar (marzo, mayo, julio y agosto de 2021). [Contrato FN-041-20, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Carder (2020). Corporación Autónoma Regional de Risaralda. <http://www.carder.gov.co/index.php/#inicio>

Carrasco Villota L. E., (octubre de 2021). *Ventana de proyecto río la Vieja para el PMEh, informe de resultados, mes 5*. [Contrato FN-078-21, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Cortés-Castillo, D. y J.O. Rangel-Ch. (2007). Vegetación acuática y de pantano de las ciénagas del departamento de Cesar (Colombia). *Colombia Diversidad Biótica XIII*.

Corporación Autónoma Regional de Quindío. (2008). El rejuvenecimiento de La Vieja. *Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río La Vieja, Pomca*.

Corporación del Valle del Sinú Y del San Jorge (CVS). (2007). *Plan del manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel*. Grupo de investigación en modelación y gestión ambiental.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2018). *Censo nacional de población y vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). *Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural*. República de Colombia. Conpes 3810.

Duarte, L. O., Manjarrés-Martínez, L., Reyes-Ardila, H. (2019). *Estadísticas de desembarco y esfuerzo de las pesquerías artesanales e industriales de Colombia entre febrero y diciembre de 2019*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap).

Duque-Gardeázabal, N. (2019). *Estimación de campos de precipitación en cuencas hidrográficas colombianas con escasez de datos, combinando datos teledetectados y estaciones en tierra, usando funciones de kernel*. Universidad Nacional de Colombia.

Fuentes Cabrejo, C. A. (enero, abril, junio, septiembre y noviembre de 2020; enero, marzo, mayo, agosto y de noviembre, 2021). *Quinto a decimocuarto informe de avance*. [Contrato FN-035-2019, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Grass (2017). Geographic Resources Analysis Support, System (Grass Gis) Software. V 7.2

Gutiérrez Cortés, A. L. (2021). *Modelación trófica en el sitio demostrativo ecohidrológico UNESCO-PHI, complejo cenagoso ciénaga de Zapatosa – Ecopath* [Contrato No. FN-037-20, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Hernández C. B., Gómez F., Linda, I. (2021). *Diseño y formulación de lineamientos que fortalecen las políticas e instrumentos orientados a aportar en la seguridad hídrica en la Macrocuenca Magdalena-Cauca, incorporando los resultados de los modelos ecohidrológicos, para los sectores ambiente, agropecuario, vivienda, ciudad y territorio*. [Hito 3, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Hernández C. B., Machado H. J. (2021). *Formulación de lineamientos técnicos de gestión salud de los ecosistemas en la macrocuenca Magdalena-Cauca, incorporando los resultados de los modelos ecohidrológicos, sectores ambiente, agropecuario, vivienda, ciudad y territorio*. [Producto 5. Marco regulatorio diseñado, hito 3, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Hernández C. B., Pérez A. W. (2021). *Marco regulatorio diseñado, H2: Identificación de medidas de gestión hídricas de las ciénagas /Lóticos Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH), del proyecto GEF Magdalena-Cauca* [proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Hernández, E., Aguirre, N. J., Palacio, J. A. (2011). Relación entre la determinación del pigmento clorofila a y el biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (ciénaga de Ayapel, Córdoba - Colombia). *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 60, 159-169.

Heymans, J.J., Coll, M., Libralato, S. y V. Christensen. (2011). *Ecopath Theory, Modeling, and Application to Coastal Ecosystems*. Elsevier.

IGAC. (2018). *Estudio semidetallado de suelos y zonificación de tierras del departamento del Quindío*. IGAC, Subdirección de Agrología.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (Diciembre de 2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (eto) para Colombia (ideam-meteo/002-2018)*.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Cartilla ENA 2018.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. ISBN: 978-958-5489-09-7. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Evapotranspiracion+de+Referencia+ETo+para+Colombia.pdf/12700c18-c492-40cc-8971-46f48f144824>

Jaramillo-Londoño, J. C. (2012). Cambios espacio-temporales del plancton en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) durante la época de menor nivel de agua. *Caldasia*, 34 (1), 213–226.

Lang, P., (octubre de 2010). *Telemac-2D Software Release 7.0, user manual*.

Marín, C. (2012). *Interacciones tróficas y productividad íctica en el sistema cenagoso de Ayapel, Córdoba, Colombia* [tesis de doctorado]. Universidad de Antioquia.

Machado H. J. M. (2021). *Aportes a la gestión de ecosistemas dulceacuícolas en la planificación ambiental y territorial con el modelamiento ecohidrológico* [proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Meneses, A. (2021). *Mapas cartográficos para la cuenca del río La Vieja. Proyecto Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad en la cuenca del río Magdalena* [proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos*. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/politica-nacional-de-biodiversidad>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2009). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico–PNGIRH*. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Palomares, M. L. D., Pauly, D. (1998). *Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity*. *Marine and Freshwater Research*, 49, 447- 453.

Pérez Ascanio, W. (Octubre de 2021). *Ventana de proyecto ciénaga de Zapatosa para el PMEHE GEF MCV, informe de resultados, mes 5* [Contrato No. FN-079-21, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Pineda Cardona, Y. (Octubre de 2021). *Ventana de proyecto ciénaga de Ayapel para el PMEHE GEF MCV, informe de resultados, mes 5*. [Contrato No. FN-109-21, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Poloche–Hernández, J. F. 2021. (Septiembre de 2021) *Producto 14. Modelamiento ecohidrológico* [Contrato FN-080-201, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Reina-Mora, I. H. (2021). *I). Caracterización social y cultural para los hidrosistemas. II). Conceptualización social de cada hidrosistema* [Contrato FN-139-19, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

Reina–Mora, I. H. (2021). *Memoria de la modelación social desarrollada en el PMEHE* [Contrato FN-139-19, proyecto GEF Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad cuenca del río Magdalena]. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia.

# Agradecimientos



**Capitanía de Puerto,  
El Banco- Magdalena**

**Pescadores y  
comunidad ribereña de  
la ciénaga de Zapatosa**



**Laboratorio de Calidad  
Ambiental del Ideam**

**Centro Nacional de  
Modelación del Ideam**



**Programa de Modelación  
Ecohidrológica (PMEH)**

