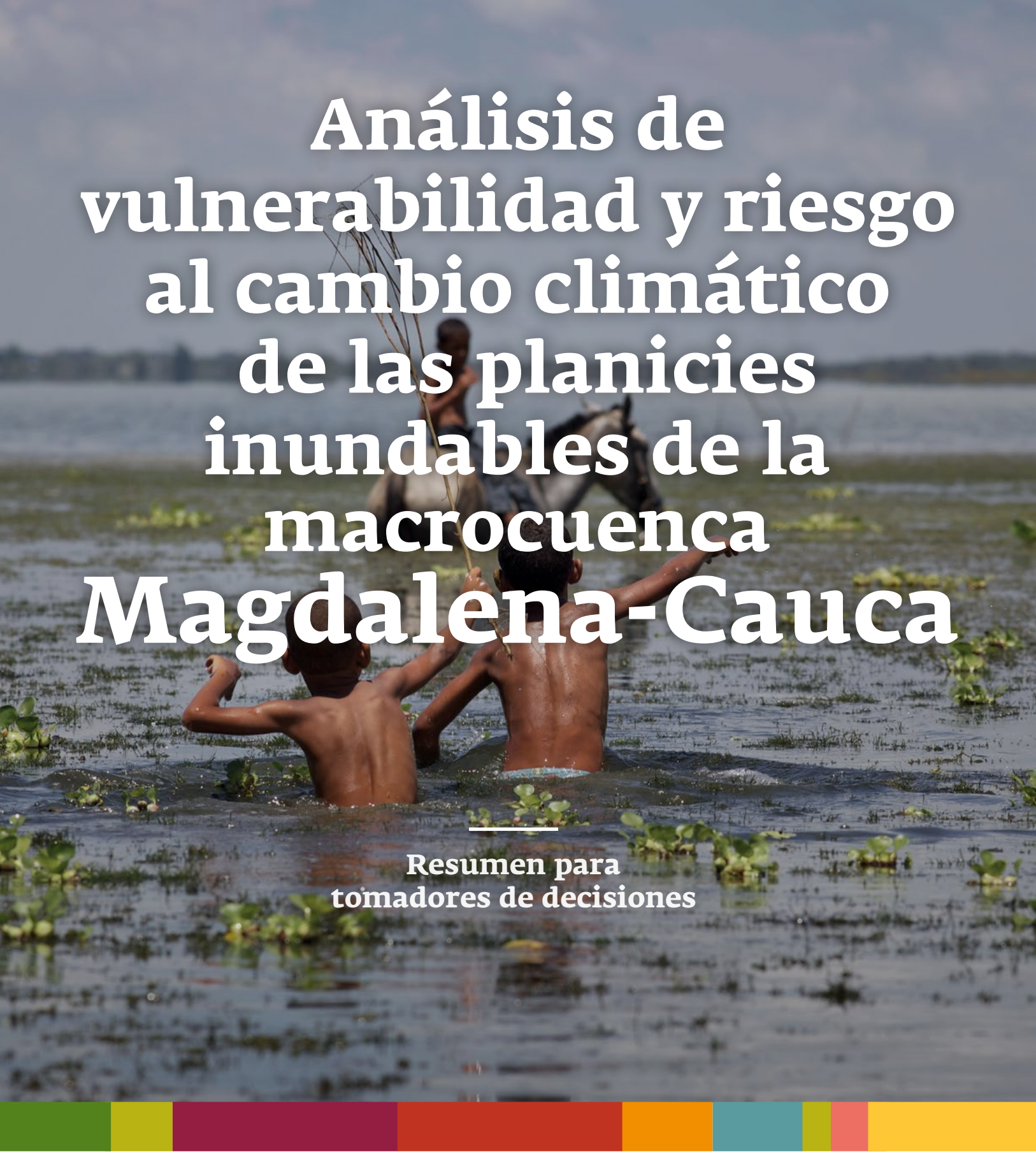


Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca

Resumen para tomadores de decisiones

The Nature Conservancy

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Supported by:
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
based on a decision of the German Bundestag

Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca

Resumen para tomadores de decisiones

The Nature Conservancy

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Supported by:
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
based on a decision of the German Bundestag

Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca

Resumen para tomadores de decisiones

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

The Nature Conservancy (TNC)

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2019
© The Nature Conservancy (TNC), 2019

ISBN versión impresa: 978-958-5489-13-4
ISBN versión digital: 978-958-5489-14-1

.Puntoaparte bookvertising

Diseño y diagramación
.Puntoaparte

Corrección de estilo
Pilar Pardo Herrero

'This project is part of the International Climate Initiative (IKI). The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) supports this initiative on the basis of a decision adopted by the German Bundestag.'

Autores

Vulnerabilidad y riesgo
Diana Carolina Useche Rodríguez, consultor
Andrés Carvajal, consultor
María Patricia Cuervo Cuéllar, IDEAM
Juanita González Lamus, TNC
Liliana Vanessa Celis, consultor

Hidrología
John Chavarro, CENIGAA
Nelsy Verdugo, IDEAM
Héctor Angarita, TNC
Carlos Rogéliz, TNC

Meteorología
Daniel Ruiz-Carrascal, Columbia University y Universidad EIA
Guillermo E. Armenta Porras, consultor
José Franklyn Ruiz Murcia, IDEAM
Héctor Angarita, TNC
Nicholas Depsky, consultor
David Yates, National Center for Atmospheric Research (NCAR)
Daniel González Duque, Universidad EIA
Luis A. López Álvarez, IDEAM
Jennifer Dorado Delgado, consultor

Ictiología
Guido A. Herrera-R., Université Paul Sabatier y Pontificia Universidad Javeriana
Javier A. Maldonado-Ocampo (q.e.p.d.), Pontificia Universidad Javeriana
Silvia López-Casas, TNC

Agradecimientos

Al Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, al Ministerio de Cultura (Oficina de Patrimonio Inmaterial de Colombia), a la Confederación de pescadores artesanales de Colombia, a la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) y a otras instituciones que nos brindaron información para el desarrollo de esta investigación.

A Javier Mendoza, Jorge Gutiérrez, Juliana Rodríguez y Mauricio Estupiñán, de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

A las Corporaciones Autónomas y otras entidades que facilitaron los datos hidrometeorológicos de sus entidades para este estudio, lo que permitió obtener un mayor número de datos para analizar.

A la Universidad Tecnológica de Pereira y el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI) por facilitarnos el modelo WEAP de la cuenca del río Otún.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y a la Fundación Alma, que como socios del proyecto acompañaron el proceso y brindaron información. A los funcionarios y directivas del IDEAM, por sus orientaciones, discusiones técnicas e información que hizo posible el desarrollo de esta investigación.

A Mauricio Echeverry, Jonathan Nogales, Diana Hernández y Juan Sebastián Sánchez, de TNC, por su apoyo en el desarrollo de esta publicación.

Contenido

Pág.

5 **Introducción**

6 **Capítulo 1**
Contexto y área de estudio

24 **Capítulo 2**
Marco conceptual y metodología

40 **Capítulo 3**
Escenarios de cambio climático y variabilidad climática en la macrocuenca Magdalena-Cauca para el horizonte prospectivo 2015-2040

50 **Capítulo 4**
Escenarios de amenaza hidroclimática de las planicies inundables de la cuenca del río Magdalena por efecto del cambio climático

62 **Capítulo 5**
Resultados del análisis de la vulnerabilidad y el riesgo al cambio climático a la luz de los servicios ecosistémicos en las planicies inundables de la cuenca del río Magdalena

114 **Capítulo 6**
Análisis de vulnerabilidad de especies de peces por pérdida de área de distribución debido al cambio climático en la macrocuenca Magdalena-Cauca

120 **Capítulo 7**
Recomendaciones para la gestión de sistemas socioecológicos inmersos en planicies de inundación en contexto de cambio climático

122 **Capítulo 8**
Retos del estudio y lecciones aprendidas

124 **Anexos**

126 **Bibliografía**

Introducción

Las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca son estratégicas para el país, no solo por su alta biodiversidad, sino, además, por los múltiples servicios ecosistémicos que proveen. Desde la época prehispánica se reconocen como áreas de abundante riqueza, por lo que muchas comunidades las habitaban y convivían con la dinámica hidrológica aprovechándola para su bienestar.

Actualmente, dicha dinámica hidrológica de la macrocuenca Magdalena-Cauca se está viendo modificada no solamente por factores antrópicos (como embalses, actividades agropecuarias y minería, entre otros), sino por las dinámicas climáticas regionales y globales. Ante esta realidad, The Nature Conservancy (TNC) junto con el IDEAM decidieron aunar esfuerzos para realizar un análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca, entendidas como sistemas socioecológicos, a la luz de cuatro servicios ecosistémicos: provisión de alimentos asociados a cultivos agrícolas y pesca, abastecimiento de agua, control de inundaciones y servicios culturales. Este análisis hace parte del proyecto Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) en la cuenca del río Magdalena —financiado por la International Climate Initiative (IKI) del Ministerio Federal Alemán de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU, por sus siglas en alemán)—, el cual implementa TNC de la mano con sus socios IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Fundación Alma.

El presente documento incluye una breve descripción del área de estudio, el marco conceptual y la metodología que guiaron el análisis, los escenarios de cambio climático utilizados, el análisis hidrológico realizado para obtener los indicadores de amenaza, los resultados del análisis de riesgo realizado en cuatro ventanas de análisis que representan las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca, un análisis específico sobre el riesgo de extinción de peces en la macrocuenca bajo escenarios de cambio climático y unas recomendaciones para la gestión de los servicios ecosistémicos en las planicies de esta cuenca. Adicionalmente, el documento cuenta con unos anexos digitales que permiten ampliar la información contenida y tener acceso a los análisis detallados.

A través de este estudio, el lector podrá comprender mejor el riesgo de cada sistema socioecológico analizado, así como los componentes de amenaza y vulnerabilidad (sensibilidad y capacidad de adaptación), lo que aporta elementos clave para la toma de decisiones encaminadas a la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo. Estos resultados sirven como una orientación que, junto con otra información de las regiones y el saber de los actores locales, ha de facilitar la identificación y priorización de medidas de adaptación a la variabilidad y el cambio climático.

Capítulo 1

Contexto y área de estudio

Diana Carolina Useche Rodríguez, Héctor Angarita, John Chavarro, Nelsy Verdugo, Carlos Rogéliz

1.1. Descripción general de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca

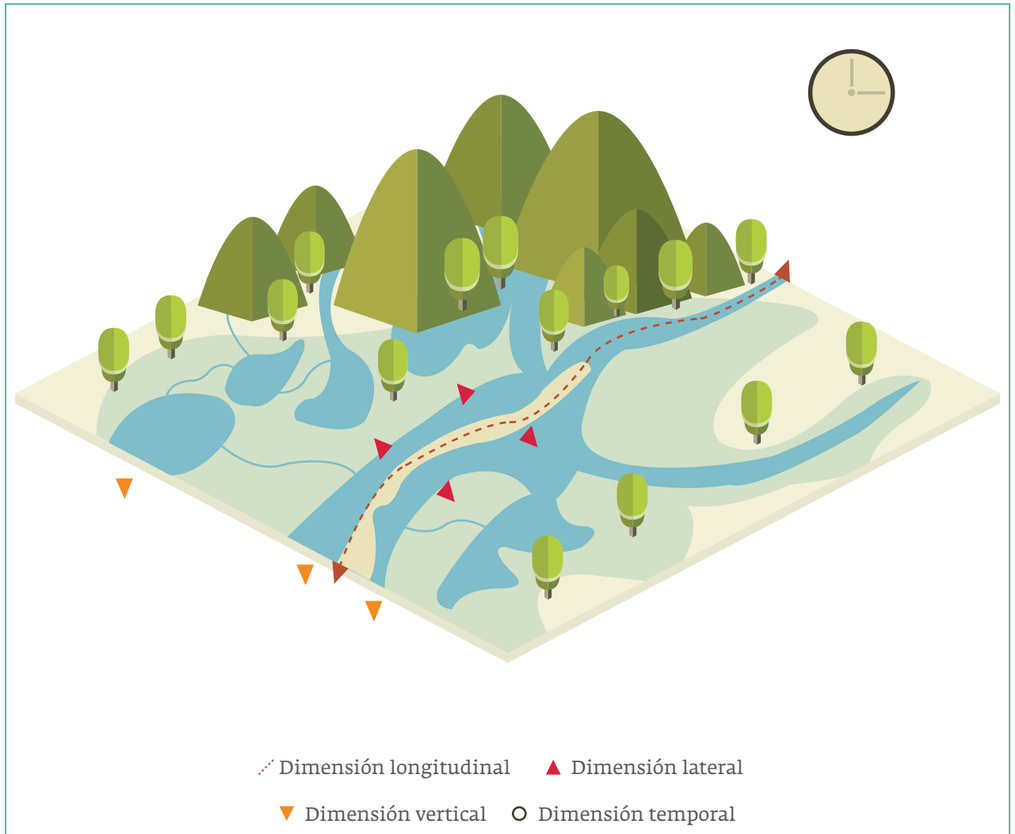
Las planicies inundables son humedales que comprenden cuerpos de agua como ciénagas, ríos, caños, quebradas y meandros, así como otros hábitats anfibios como sabanas, playones, vegetación y bosques inundables (TNC et al., 2016).

Las planicies inundables de la cuenca Magdalena-Cauca ocupan una extensión de 2 621 400 hectáreas (ha), correspondientes al 9,7 % del área de la macrocuenca, en donde se encuentran 293 municipios de 17 departamentos del país. Las áreas de influencia directa de las planicies abarcan 14 241 200 ha y representan las zonas de ladera. Estas áreas de planicies e influencia directa ocupan 16 862 700 ha, equivalentes al 62 % de la cuenca y al 15 % del área continental del país (TNC et al., 2016). Dichas áreas proveen importantes servicios ecosistémicos, como su capacidad para retener sedimentos y albergar gran biodiversidad que depende de estas en sus ciclos de reproducción, crianza y migración. Asimismo, este tipo de ecosistemas son estratégicos en la adaptación a la variabilidad y cambio climático, ya que amortiguan los impactos causados por inundaciones y sequías, reduciendo la vulnerabilidad de las poblaciones humanas (TNC et al., 2016).

La macrocuenca Magdalena-Cauca se caracteriza por su dinámica espacio-temporal y heterogeneidad a lo largo del curso en cuatro dimensiones: longitudinal, lateral, vertical y temporal (Figura 1.1). La dimensión longitudinal comprende las dinámicas que ocurren a lo largo del río, desde su nacimiento hasta su desembocadura; la dimensión lateral comprende

el intercambio de materia y energía entre el canal del río y las áreas inundables, tales como bosques y planicies inundables, meandros, ciénagas, lagunas, etc. En la dimensión vertical interactúan las aguas superficiales y las subterráneas, mientras que la dimensión temporal es integradora y permite entender el funcionamiento y la dinámica del río con su entorno (TNC et al. 2016).

Figura 1.1. Dimensiones espaciales y temporal que determinan el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos



Fuente: modificado de TNC et al. (2016).

De acuerdo con TNC et al. (2016), el uso pecuario, los embalses e hidroeléctricas, la agroindustria, la minería, la infraestructura vial, la expansión urbana, la explotación de hidrocarburos y la introducción de especies e invasiones biológicas, junto con la variabilidad y el cambio climático, son los motores de transformación de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca.

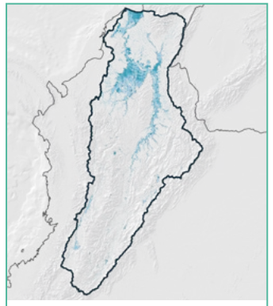
La macrocuenca Magdalena-Cauca presenta cerca de 5,7 millones de hectáreas en cuerpos de agua continental con presencia de humedales permanentes abiertos (991 146 ha), humedales permanentemente bajo dosel (97 626 ha), temporales (2 003 322 ha), potencial medio (1 159 893 ha) y potencial bajo (1 419 114 ha). Asimismo, el área hidrográfica Magdalena-Cauca se caracteriza por la variedad de relieves, que da lugar a humedales de alta montaña (como lagunas de origen glaciar y turberas) hasta sistemas cenagosos como los complejos de Zapatosa y La Mojana, y sistemas estuarios como la Ciénaga Grande de Santa Marta (Flórez-Ayala et al., 2015).

De igual manera, la presencia de pueblos indígenas y comunidades afrodescendientes ha mostrado cómo se han adaptado históricamente a esa dinámica hidrológica, qué factores han provocado su desplazamiento, desaparición, y cómo algunas culturas han sobrevivido a pesar de los cambios socioambientales (Plazas y Falchetti, 1981; Plazas C, y Van Der Hammen, 1988; Borda Fals, 1989; IDEAM, 2002; Castaño Uribe, 2003).

1.2. Selección de áreas de estudio o hidrosistemas

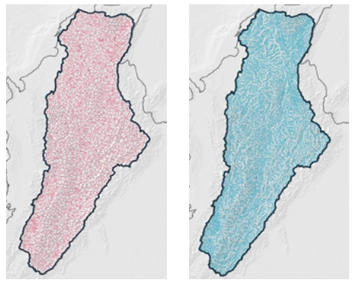
Considerando la gran diversidad, complejidad y heterogeneidad de humedales en la macrocuenca Magdalena-Cauca se decidió enfocar esta investigación en unas áreas específicas o hidrosistemas que sirvieran de ventanas de análisis de los posibles tipos de planicies inundables que tiene la cuenca, como son las planicies en la vertiente del río Cauca, en el Magdalena Medio, el bajo Magdalena y el alto Magdalena. De esta forma, se realizó una lista corta de posibles hidrosistemas teniendo en cuenta los criterios señalados en la Figura 1.2: tipologías de humedales de Colombia junto con características geomorfológicas, el área de drenaje aguas arriba y aguas abajo, el área de intercambio lateral (corriente principal–planicie de inundación), la oferta hídrica aguas arriba, la disponibilidad de información hidrometeorológica, la presencia de zonas pertenecientes al sistema nacional de áreas protegidas y los escenarios de cambio climático. La lista corta incluyó: la ciénaga Chircal, el río Guarapas, el río Lebrija, el canal del Dique, el Bajo Magdalena (Magangué-Calamar), la Depresión Momposina, el río Nechí, la ciénaga del Opón, el río Otún, el río Páez, el río Carare, la ciénaga de Barbacoas y la Ciénaga Grande de Santa Marta. Posteriormente, un grupo de expertos del IDEAM y TNC evaluaron la información disponible para cada criterio y se priorizaron cuatro áreas o hidrosistemas: (i) la Depresión Momposina, (ii) la cuenca del río Nechí, (iii) las ciénagas El Llanito y San Silvestre y (iv) la parte alta de la cuenca del río Otún; seleccionadas dado que contaban con la mejor información oficial disponible y con diversidad en tipología de planicie (de la parte alta, media y baja de la cuenca).

Figura 1.2. Criterios utilizados para la priorización de áreas de estudio o hidrosistemas en la macrocuenca Magdalena-Cauca



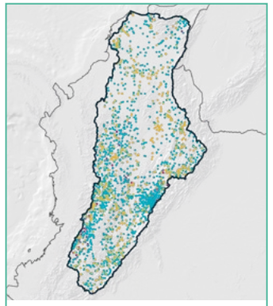
Cuerpos de agua
Humedales
(Humboldt, 2015)

Criterios:
Presencia de humedales tipo:
- Abiertos
- Bajo dosel
- Potenciales (bajo)
- Temporales



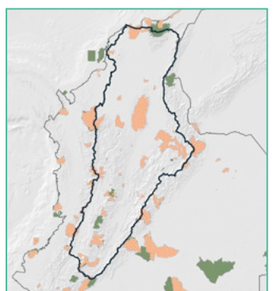
Tipología
Aguas arriba-aguas abajo
(Lehner et al., 2008)

Criterios:
- Área de drenaje aguas arriba
- Área de drenaje lateral
- Oferta hídrica aguas arriba
- Área de drenaje lateral



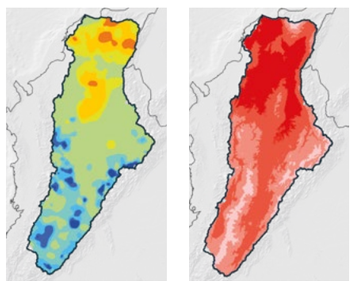
Disponibilidad de información hidrometeorológica IDEAM

Criterios:
- Estaciones hidrológicas con registro > 30 años y menos del 30% de datos faltantes



Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP)

Criterios:
- Presencia de zonas protegidas dentro del hidrosistema

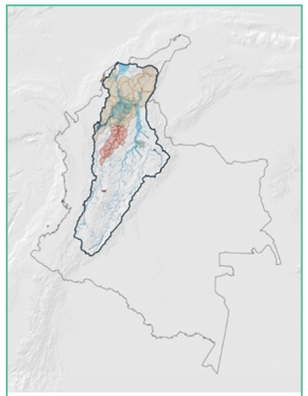


Escenarios de cambio climático
(IDEAM et al., 2015)

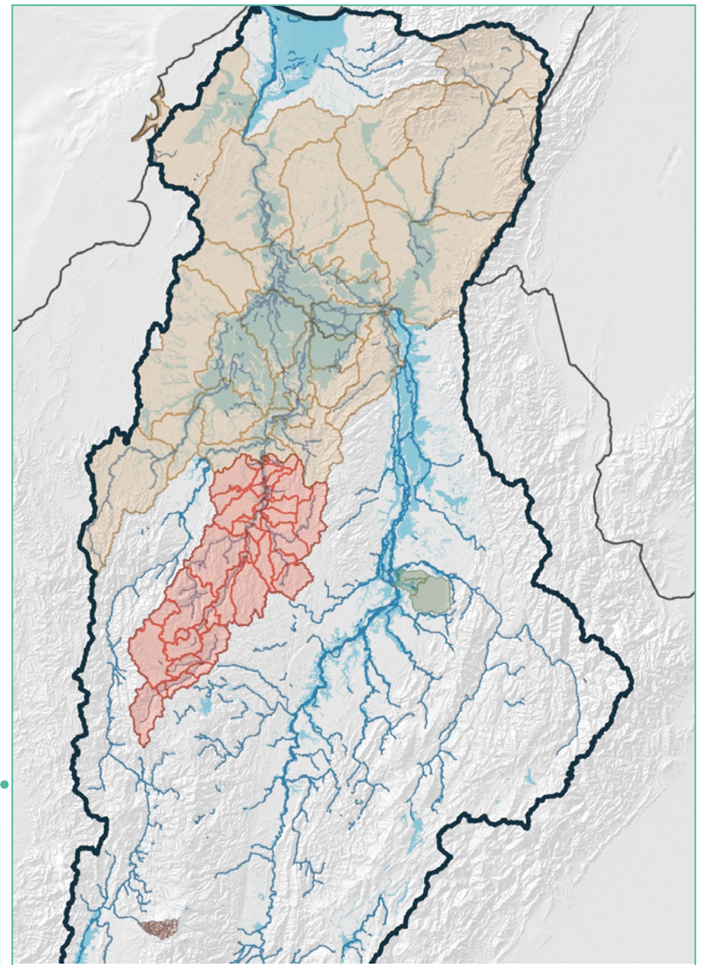
Criterios:
- Indicadores de cambio en temperatura (ºC) y porcentaje de cambio en precipitación

Fuente:
Elaboración propia.

1.3. Descripción de cada área de estudio o hidrosistema



Ubicación nacional



Ubicación en la macrocuenca Magdalena-Cauca

Área de estudio
- Depresión Momposina
- Río Nechí
- El Llanito y San Silvestre
- Río Otún

Figura 1.3.1. Depresión Momposina

Con una extensión de 6 867 105 ha, este hidrosistema se encuentra localizado en el norte de Colombia e incluye cinco departamentos: Magdalena, Atlántico, Bolívar, Cesar y Córdoba, y 139 municipios.

Se distribuye altitudinalmente desde cotas inferiores a los 500 msnm hasta más allá de los 3000 msnm en la Sierra Nevada de Santa Marta.

Las principales coberturas de la tierra son: los pastos limpios, que ocupan la mayor área de la superficie del hidrosistema con el 29 %; seguida de los pastos enmalezados con el 8,9 %.

Tiene población urbana de 3 980 221 habitantes y rural de 1 791 030.

De acuerdo con el Ministerio del Interior, presenta 17 resguardos indígenas y tres consejos comunitarios.

El hidrosistema está compuesto por 25 subunidades o sistemas socioecológicos, de los cuales 13 están ubicados en planicies de inundación.

Figura 1.3.2. Río Nechí

El hidrosistema Río Nechí tiene una extensión de 1 406 783 ha, se encuentra localizado en el departamento de Antioquia y se distribuye en 50 de sus municipios. Su distribución altitudinal se encuentra desde > 500 msnm al norte del hidrosistema, en la zona límite con el Caribe, hasta los 2000 msnm, próximo a la región Andina.

El hidrosistema del Río Nechí cuenta con 34 coberturas de uso del suelo, donde la vegetación secundaria o en transición es la que cuenta con mayor porcentaje de área en la superficie del hidrosistema con el 40,03 %, seguida por los cuerpos de agua artificiales con el 11,96 %.

Tiene población urbana de 3 578 866 habitantes y rural de 568 482.

De acuerdo con el Ministerio del Interior, presenta cuatro resguardos indígenas y ocho consejos comunitarios.

Las coberturas relacionadas con cuerpos de aguas artificiales y obras hidráulicas se encuentran localizadas hacia el nororiente del hidrosistema, y corresponden a las centrales hidroeléctricas de ISAGÉN en los municipios de El Bagre, Santa Rosa del Sur, Montecristo y Remedios. Por otra parte, las zonas de extracción minera se encuentran localizadas hacia el sur del hidrosistema, en inmediaciones de los municipios de Medellín y Caldas.

El hidrosistema está compuesto por 38 subunidades o sistemas socioecológicos, de los cuales siete están ubicados en planicies de inundación.

Figura 1.3.3. El Llanito y San Silvestre

Este hidrosistema tiene una extensión de 90 244 ha, se encuentra localizado en el departamento de Santander e incluye los municipios de Barrancabermeja y San Vicente de Chucurí. Cuenta con altitudes inferiores a los 500 msnm. Presenta una amplia red hídrica que incluye las ciénagas de El Llanito y San Silvestre, quebradas, ríos y caños que se conectan con el río Magdalena y el río Sogamoso.

Las principales coberturas de este hidrosistema son los sistemas hídricos con el 26,8 % del área, seguidos por los pastos enmalezados con el 15,61 %. En este hidrosistema predominan las áreas de pastos, lo cual parece estar relacionado con el alto grado de intervención que se presenta en esta región, en forma de ganadería y con la exploración y explotación petrolera en el municipio de Barrancabermeja; además, estas áreas son vecinas de los humedales y ciénagas.

Tiene población urbana de 192 184 habitantes y rural de 54 930.

El hidrosistema está compuesto por tres sistemas socioecológicos o subunidades, de los cuales dos son en planicies de inundación.

Figura 1.3.4. Río Otún[1]

Cuenta con una extensión de 27 532,5 ha en la cuenca del río Cauca y se localiza entre los departamentos de Risaralda, Quindío y Tolima, siendo el primero el de mayor representación de área con el 99,3 %. El hidrosistema incluye un pequeño porcentaje del área rural de Pereira. Su rango altitudinal se encuentra entre los 1571 y 4900 msnm y recibe el aporte de las masas glaciares del Nevado Santa Isabel.

El hidrosistema cuenta con 16 ecosistemas; el 40 % del área contiene los ecosistemas de bosques naturales, los cuales se encuentran localizados al occidente de la zona. Los arbustales del orobioma alto de los Andes, localizados al oriente del hidrosistema, ocupan el segundo lugar en área con el 32,1 %.

El 60,23 % de la superficie del hidrosistema del Río Otún tiene un uso adecuado o sin conflicto.

La zona, por otra parte, tiene cuatro áreas protegidas: el Parque Nacional Natural Los Nevados, el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya, el Parque Regional Natural Ucumarí y el Distrito de Conservación de Suelos Campoalegre.

Tiene población urbana de 450 392 habitantes y rural de 98 676.

El hidrosistema presenta 24 subunidades hidrológicas que incluyen la laguna del Otún (aquí entendida como planicie de inundación de alta montaña).

[1] El análisis consideró los humedales como parte de la categoría de planicies inundables, por lo cual la laguna del Otún, que hace parte de este hidrosistema, está considerada dentro de este estudio. Esta recibe el agua de escorrentía del glaciar y regula el recurso hídrico hacia aguas abajo. Adicionalmente, este hidrosistema contaba con información disponible y un modelo hidrológico ya desarrollado por la Universidad Tecnológica de Pereira y el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés). Cabe señalar que el análisis de este hidrosistema difirió de los otros priorizados en este estudio, dado que no hay población humana en las subunidades hidrológicas y la mayor parte del territorio es área protegida.

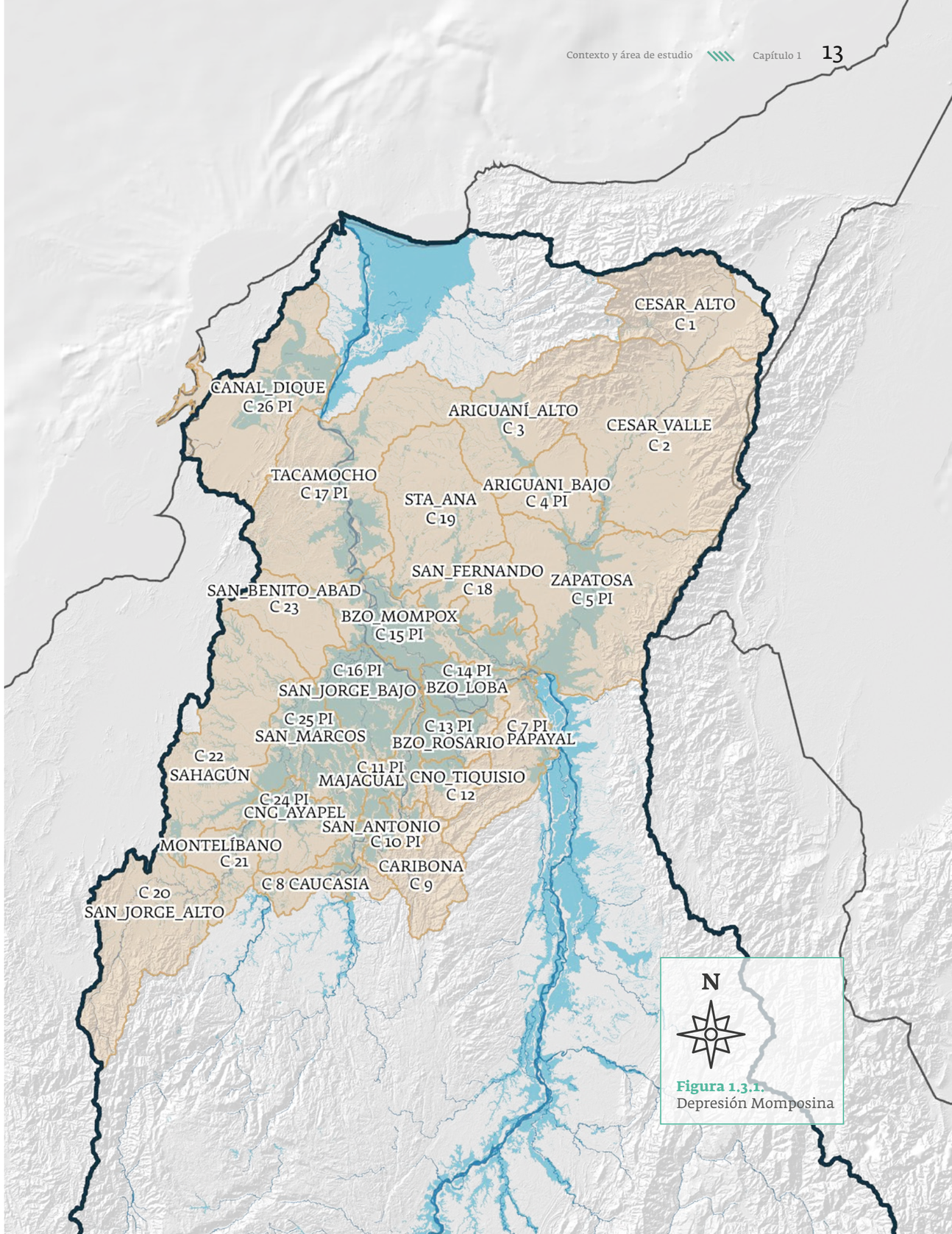


Figura 1.3.1.
Depresión Momposina

El Sapo
San Pedro
Nechí después Cacerí
Nechí (arriba)
Santa Bárbara
Carerí Bajo
Amaceri
Nechí después Santa Bárbara
Carerí Alto
Nechi antes Cuturi
Santa Isabel
Cuturí
Villa
Nechí (abajo)
Tigui Alto
Nechí antes Sardina
Tigui
C_Porce (arriba)
C_Ermitaño
El Bagre
C_Est_SanJuan
Pocune
C_Mata
Estrategia_1
C_Porce (abajo)
C_Est_Media Luna
C_Brisas Nechi
C_Porce_III
C_Guadalupe
C_Miraflores
C_Porce II
C_Troneras
C_Riogrande II
C_Riogrande II 2
C_Gabino
C_Carlos Lleras
C_Girardota
C_Ancón Norte

N

Figura 1.3.2.
Río Nechí

CNA_EL_LLANITO
CNA_SAN_SILVESTRE
QDA_VIZCAÍNA

N

Figura 1.3.3.
El Llanito y San Silvestre

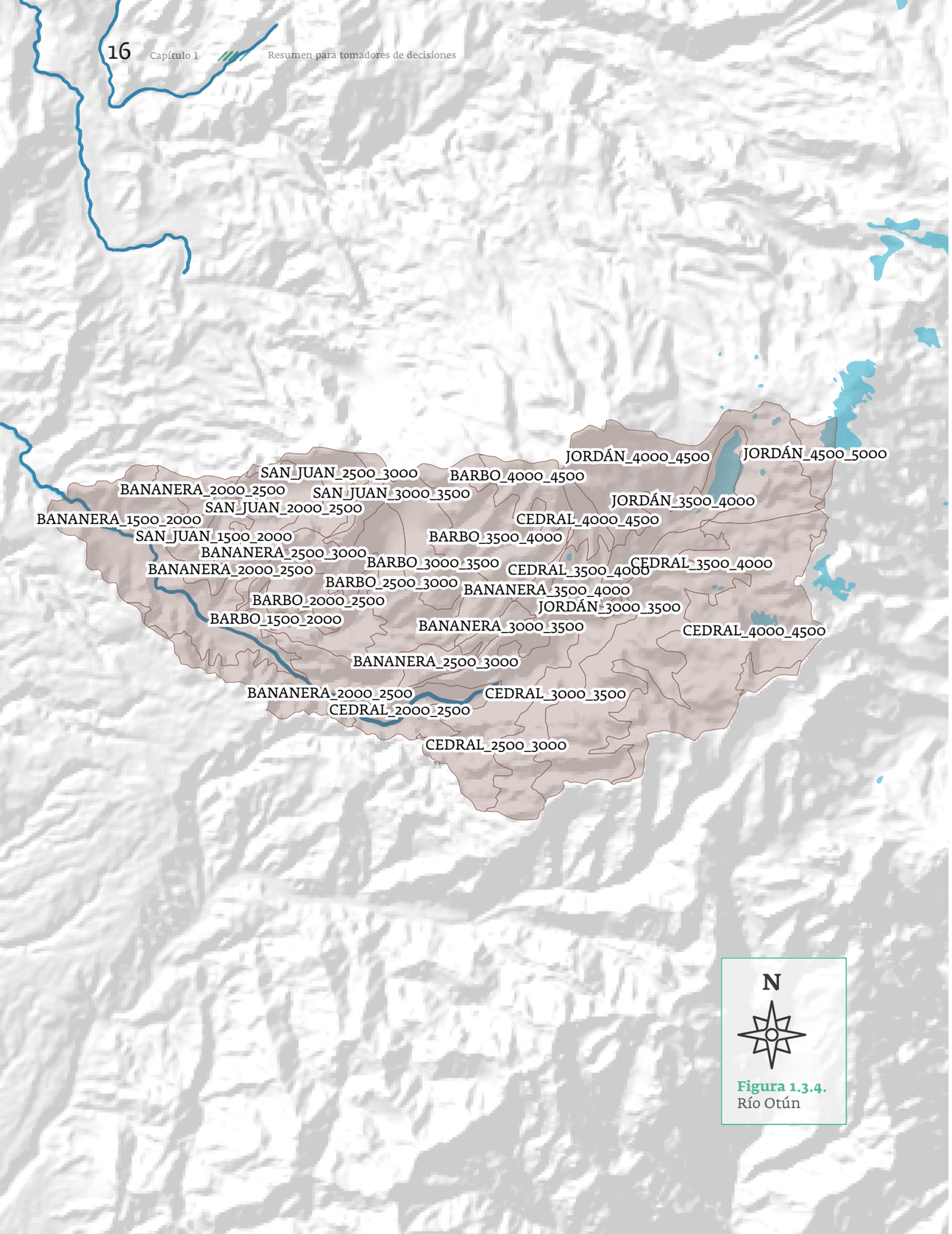


Figura 1.3.4.
Río Otún

Tabla 1.1. Municipios presentes en cada una de las subunidades de análisis

Subunidad		Municipio	Departamento	Porcentaje del municipio por subunidad (%)
Depresión Momposina				
C1	CESAR_ALTO	EL MOLINO	LA GUAJIRA	72,7
		LA JAGUA DEL PILAR	LA GUAJIRA	69,6
		PUEBLO BELLO	CESAR	17,1
		SAN JUAN DEL CESAR	LA GUAJIRA	61,3
		URUMITA	LA GUAJIRA	88,4
		VALLEDUPAR	CESAR	39,8
		VILLANUEVA	LA GUAJIRA	99,9
C10	SAN_ANTONIO	GUARANDA	SUCRE	12,4
		MONTECRISTO	BOLÍVAR	10,5
		NECHÍ	ANTIOQUIA	12,3
		SAN JACINTO DEL CAUCA	BOLÍVAR	63,1
C11	MAJAGUAL	ACHÍ	BOLÍVAR	49,5
		GUARANDA	SUCRE	62,4
		MAJAGUAL	SUCRE	27,4
C12	CNO_TIQUISIO	ACHÍ	BOLÍVAR	17,4
		NOROSI	BOLÍVAR	15,1
		TIQUISIO (Puerto Rico)	BOLÍVAR	75,9
C13	BZO_ROSARIO	ACHÍ	BOLÍVAR	28,8
		ALTOS DEL ROSARIO	BOLÍVAR	67,4
		PINILLOS	BOLÍVAR	31,2
		TIQUISIO (Puerto Rico)	BOLÍVAR	21,9
C14	BZO_LOBA	ALTOS DEL ROSARIO	BOLÍVAR	32,2
		BARRANCO DE LOBA	BOLÍVAR	72,9
		HATILLO DE LOBA	BOLÍVAR	83,1
		MARGARITA	BOLÍVAR	29,9
		PINILLOS	BOLÍVAR	50,3
		SAN FERNANDO	BOLÍVAR	23,7
C15	BZO_MOMPOS	CICUCO	BOLÍVAR	100,0
		EL BANCO	MAGDALENA	46,0
		GUAMAL	MAGDALENA	21,5
		HATILLO DE LOBA	BOLÍVAR	16,8

C15	BZO_MOMPOS	MAGANGUÉ	BOLÍVAR	51,4
		MARGARITA	BOLÍVAR	70,1
		MOMPÓS	BOLÍVAR	96,0
		PINILLOS	BOLÍVAR	12,5
		SAN FERNANDO	BOLÍVAR	76,3
		SAN SEBASTIÁN DE BUENAVISTA	MAGDALENA	22,6
		SAN ZENÓN	MAGDALENA	22,6
		SANTA BÁRBARA DE PINTO	MAGDALENA	28,0
		TALAIGUA NUEVO	BOLÍVAR	100,0
C16	SAN_JORGE_BAJO	MAGANGUÉ	BOLÍVAR	32,0
		MAJAGUAL	SUCRE	39,4
		SAN BENITO ABAD	SUCRE	22,0
		SUCRE	SUCRE	82,9
C17	TACAMOCHO	BUENAVISTA	SUCRE	30,5
		CALAMAR	BOLÍVAR	44,3
		CHIVOLO	MAGDALENA	55,8
		CONCORDIA	MAGDALENA	43,0
		CÓRDOBA	BOLÍVAR	100,0
		EL CARMEN DE BOLÍVAR	BOLÍVAR	70,0
		EL GUAMO	BOLÍVAR	100,0
		EL PIÑÓN	MAGDALENA	45,5
		LOS PALMITOS	SUCRE	13,0
		OVEJAS	SUCRE	84,2
		PEDRAZA	MAGDALENA	68,8
		PIVIJAY	MAGDALENA	23,2
		PLATO	MAGDALENA	38,9
		SABANAS DE SAN ANGEL	MAGDALENA	18,1
		SAN JACINTO	BOLÍVAR	82,0
		SAN JUAN NEPOMUCENO	BOLÍVAR	69,6
		SAN PEDRO	SUCRE	43,3
		SANTA BÁRBARA DE PINTO	MAGDALENA	45,3
		TENERIFE	MAGDALENA	76,6
		ZAMBRANO	BOLÍVAR	100,0
		ZAPAYÁN	MAGDALENA	100,0
C18	SAN_FERNANDO	ASTREA	CESAR	11,7
		EL BANCO	MAGDALENA	17,4
		GUAMAL	MAGDALENA	72,7
		PIJIÑO DEL CARMEN	MAGDALENA	50,2

C18	SAN_FERNANDO	SAN SEBASTIÁN DE BUENAVISTA	MAGDALENA	73,3
		SAN ZENÓN	MAGDALENA	77,4
C19	STA_ANA	ARIGUANÍ (El Difícil)	MAGDALENA	25,6
		CHIVOLO	MAGDALENA	44,2
		NUEVA GRANADA	MAGDALENA	100,0
		PLATO	MAGDALENA	61,1
		SABANAS DE SAN ANGEL	MAGDALENA	28,6
		SANTA ANA	MAGDALENA	73,9
		SANTA BÁRBARA DE PINTO	MAGDALENA	26,8
		TENERIFE	MAGDALENA	23,4
C2	CESAR_VALLE	AGUSTÍN CODAZZI	CESAR	99,8
		BECERRILL	CESAR	90,8
		LA JAGUA DEL PILAR	LA GUAJIRA	30,4
		LA PAZ	CESAR	95,9
		MANAURE BALCÓN DEL CESAR	CESAR	99,6
		PUEBLO BELLO	CESAR	34,6
		SAN DIEGO	CESAR	100,0
		URUMITA	LA GUAJIRA	11,4
		VALLEDUPAR	CESAR	56,2
C20	SAN_JORGE_ALTO	ITUANGO	ANTIOQUIA	11,8
		MONTELÍBANO	CÓRDOBA	88,0
		PLANETA RICA	CÓRDOBA	12,8
		PUERTO LIBERTADOR	CÓRDOBA	99,8
		SAN JOSE DE URE	CÓRDOBA	97,9
C21	MONTELÍBANO	AYAPEL	CÓRDOBA	10,4
		BUENAVISTA	CÓRDOBA	65,1
		LA APARTADA	CÓRDOBA	84,8
		MONTELÍBANO	CÓRDOBA	10,4
C22	SAHAGÚN	BUENAVISTA	CÓRDOBA	31,8
		CAIMITO	SUCRE	41,8
		CHINÚ	CÓRDOBA	78,6
		CIÉNAGA DE ORO	CÓRDOBA	17,6
		COROZAL	SUCRE	67,7
		EL ROBLE	SUCRE	90,5
		LA UNIÓN	SUCRE	100,0
		PLANETA RICA	CÓRDOBA	64,2
		PUEBLO NUEVO	CÓRDOBA	94,8

C22	SAHAGÚN	SAHAGÚN	CÓRDOBA	75,8
		SAMPUÉS	SUCRE	74,1
		SAN BENITO ABAD	SUCRE	14,2
		SAN MARCOS	SUCRE	41,0
		SINCELEJO	SUCRE	13,1
C23	SAN_BENITO_ ABAD	BUENAVISTA	SUCRE	65,0
		COROZAL	SUCRE	32,3
		GALERAS	SUCRE	98,6
		LOS PALMITOS	SUCRE	58,5
		MORROA	SUCRE	16,4
		SAN JUAN DE BETULIA (Betulia)	SUCRE	91,1
		SAN PEDRO	SUCRE	56,7
		SINCÉ	SUCRE	98,8
		SINCELEJO	SUCRE	16,0
C24	CNG_AYAPEL	AYAPEL	CÓRDOBA	75,6
		LA APARTADA	CÓRDOBA	12,3
C25	SAN_MARCOS	CAIMITO	SUCRE	58,2
		GUARANDA	SUCRE	25,2
		MAJAGUAL	SUCRE	33,2
		SAN BENITO ABAD	SUCRE	56,4
		SAN MARCOS	SUCRE	53,0
		SUCRE	SUCRE	17,1
C26	CANAL_DIQUE	ARJONA	BOLÍVAR	100,0
		ARROYOHONDO	BOLÍVAR	98,6
		CALAMAR	BOLÍVAR	46,4
		CAMPO DE LA CRUZ	ATLÁNTICO	64,0
		CANDELARIA	ATLÁNTICO	37,8
		CARTAGENA DE INDIAS	BOLÍVAR	33,4
		EL CARMEN DE BOLÍVAR	BOLÍVAR	13,9
		LURUACO	ATLÁNTICO	32,1
		MAHATES	BOLÍVAR	98,8
		MANATÍ	ATLÁNTICO	99,2
		MARÍA LA BAJA	BOLÍVAR	100,0
		PIOJÓ	ATLÁNTICO	19,4
		REPELÓN	ATLÁNTICO	92,7
		SABANALARGA	ATLÁNTICO	63,5
		SAN CRISTOBAL	BOLÍVAR	100,0
		SAN ESTANISLAO	BOLÍVAR	99,8
		SAN JACINTO	BOLÍVAR	18,0

C26	CANAL_DIQUE	SAN JUAN NEPOMUCENO	BOLÍVAR	30,4
		SAN ONOFRE	SUCRE	25,9
		SANTA LUCÍA	ATLÁNTICO	100,0
		SOPLAVIENTO	BOLÍVAR	100,0
		SUAN	ATLÁNTICO	77,0
		TURBACO	BOLÍVAR	52,1
		TURBANA	BOLÍVAR	99,9
		USIACURÍ	ATLÁNTICO	85,3
		VILLANUEVA	BOLÍVAR	23,1
C3	ARIGUANI_ALTO	ALGARROBO	MAGDALENA	98,1
		ARIGUANÍ (El Difícil)	MAGDALENA	36,1
		BOSCONIA	CESAR	24,9
		EL COPEY	CESAR	94,0
		FUNDACIÓN	MAGDALENA	46,7
		PUEBLO BELLO	CESAR	38,3
		SABANAS DE SAN ANGEL	MAGDALENA	48,9
C4	ARIGUANI_BAJO	ARIGUANÍ (El Difícil)	MAGDALENA	38,1
		BOSCONIA	CESAR	75,1
		EL PASO	CESAR	71,1
C5	ZAPATOSA	ASTREA	CESAR	88,0
		CHIMICHAGUA	CESAR	98,7
		CHIRIGUANÁ	CESAR	100,0
		CURUMANÍ	CESAR	99,8
		EL BANCO	MAGDALENA	32,3
		EL PASO	CESAR	21,2
		LA JAGUA DE IBIRICO	CESAR	91,3
		PAILITAS	CESAR	65,0
		PIJIÑO DEL CARMEN	MAGDALENA	35,8
		TAMALAMEQUE	CESAR	53,0
C7	PAPAYAL	ARENAL	BOLÍVAR	81,3
		BARRANCO DE LOBA	BOLÍVAR	20,4
		EL PEÑÓN	BOLÍVAR	37,3
		NOROSI	BOLÍVAR	84,9
		REGIDOR	BOLÍVAR	20,2
		RIOVIEJO	BOLÍVAR	67,7
		SAN MARTÍN DE LOBA	BOLÍVAR	93,6
C8	CAUCASIA	CAUCASIA	ANTIOQUIA	37,7

C8	CAUCASIA	NECHÍ	ANTIOQUIA	51,8
C9	CARIBONA	MONTECRISTO	BOLÍVAR	74,5
		SAN JACINTO DEL CAUCA	BOLÍVAR	26,2
Río Nechí				
C 01	C_Ancón Norte	BELLO	ANTIOQUIA	94,4
		CALDAS	ANTIOQUIA	74,1
		COPACABANA	ANTIOQUIA	35,3
		ENVIGADO	ANTIOQUIA	98,5
		ITAGÜÍ	ANTIOQUIA	100,0
		LA ESTRELLA	ANTIOQUIA	99,6
		MEDELLÍN	ANTIOQUIA	84,4
		SABANETA	ANTIOQUIA	100,0
C 02	C_Girardota	COPACABANA	ANTIOQUIA	63,3
		GIRARDOTA	ANTIOQUIA	31,7
C 03	C_Carlos Lleras	BARBOSA	ANTIOQUIA	81,4
		GIRARDOTA	ANTIOQUIA	67,8
C 04	C_Gabino	BARBOSA	ANTIOQUIA	15,9
		DON MATÍAS	ANTIOQUIA	17,1
		SANTO DOMINGO	ANTIOQUIA	25,8
C 05	C_Riogrande II 2	DON MATÍAS	ANTIOQUIA	63,8
		SANTA ROSA DE OSOS	ANTIOQUIA	14,2
C 06	C_Porce II	GÓMEZ PLATA	ANTIOQUIA	62,3
		YOLOMBÓ	ANTIOQUIA	19,7
C 07	C_Miraflores	CAROLINA	ANTIOQUIA	33,4
C 08	C_Troneras	CAROLINA	ANTIOQUIA	42,6
		GÓMEZ PLATA	ANTIOQUIA	20,2
		SANTA ROSA DE OSOS	ANTIOQUIA	29,4
C 09	C_Guadalupe	GÓMEZ PLATA	ANTIOQUIA	12,7
		GUADALUPE	ANTIOQUIA	21,0
C 10	C_ Porce_III	GUADALUPE	ANTIOQUIA	19,3
C 11	C_Porce (Abajo)	AMALFI	ANTIOQUIA	26,2
		ANORÍ	ANTIOQUIA	10,4
C 12	C_ Mata	AMALFI	ANTIOQUIA	56,2
C 14	Estrategia_1	REMEDIOS	ANTIOQUIA	17,8
		SEGOVIA	ANTIOQUIA	13,6
C 15	El Bagre	SEGOVIA	ANTIOQUIA	20,4
C 16	Pocune	SEGOVIA	ANTIOQUIA	17,1
		ZARAGOZA	ANTIOQUIA	12,2
C 18	C_Riogrande II	BELMIRA	ANTIOQUIA	91,0
		DON MATÍAS	ANTIOQUIA	18,8
		ENTRERRIOS	ANTIOQUIA	100,0

C 18	C_Riogrande II	SAN PEDRO	ANTIOQUIA	75,2
		SANTA ROSA DE OSOS	ANTIOQUIA	37,8
C 19	C_Brisas Nechi	YARUMAL	ANTIOQUIA	32,6
C 20	C_Est_Media Luna	ANGOSTURA	ANTIOQUIA	99,1
		ANORÍ	ANTIOQUIA	16,3
		CAMPAMENTO	ANTIOQUIA	100,0
		CAROLINA	ANTIOQUIA	19,5
		GUADALUPE	ANTIOQUIA	59,8
		SANTA ROSA DE OSOS	ANTIOQUIA	11,0
		YARUMAL	ANTIOQUIA	40,1
C 21	C_Est_SanJuan	ANORÍ	ANTIOQUIA	67,8
		CÁCERES	ANTIOQUIA	12,0
C 22	Tigui	EL BAGRE	ANTIOQUIA	12,9
		SEGOVIA	ANTIOQUIA	18,4
		ZARAGOZA	ANTIOQUIA	15,6
C 23	Tigui Alto	MONTECRISTO	BOLÍVAR	11,7
		SANTA ROSA DEL SUR	BOLÍVAR	22,4
C 24	Villa	EL BAGRE	ANTIOQUIA	14,2
C 25	Santa Isabel	EL BAGRE	ANTIOQUIA	13,8
C 26	Amacerí	EL BAGRE	ANTIOQUIA	32,0
C 27	Nechí Antes Sardina	ZARAGOZA	ANTIOQUIA	19,2
C 28	Nechí (Abajo)	ZARAGOZA	ANTIOQUIA	10,3
C 31	Cuturi	CAUCASIA	ANTIOQUIA	15,0
		ZARAGOZA	ANTIOQUIA	22,8
C 33	Caceri Bajo	CAUCASIA	ANTIOQUIA	29,5
		NECHÍ	ANTIOQUIA	10,3
El Llanito y San Silvestre				
CNA_SAN_SILVESTRE		BARRANCABER-MEJA	SANTANDER	10,5
QDA_VIZCAINA		BARRANCABER-MEJA	SANTANDER	25,7
		SAN VICENTE DE CHUCURÍ	SANTANDER	26,3
Río Otún				
CEDRAL_3500_4000		PEREIRA	RISARALDA	4,2
CEDRAL_4000_4500		PEREIRA	RISARALDA	5,4

Capítulo 2

Marco conceptual y metodología

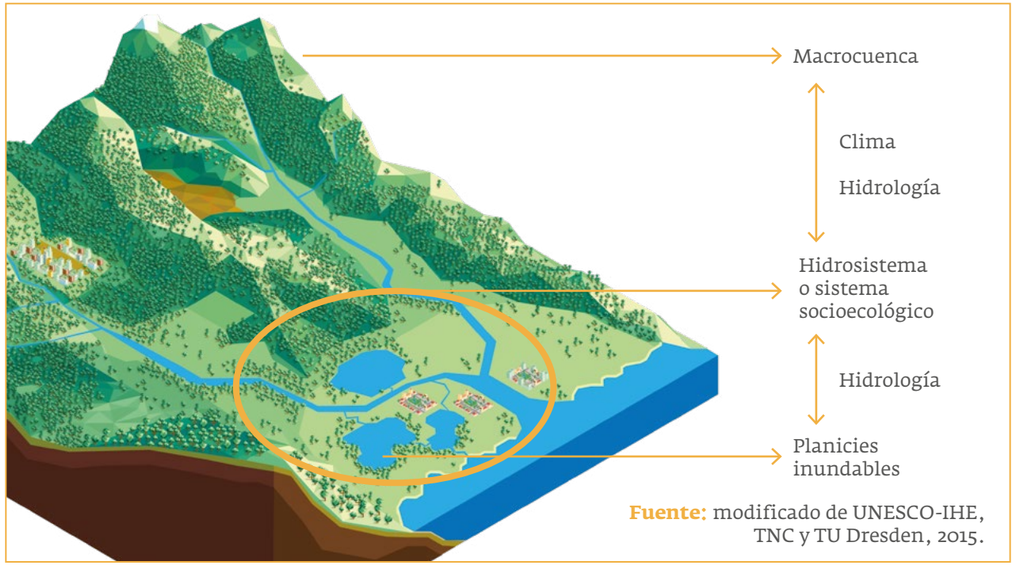
Diana Carolina Useche Rodríguez, Andrés Carvajal, Patricia Cuervo, Juanita González Lamus, Héctor Angarita, Carlos Rogéliz, Liliana Vanessa Celis

Las planicies inundables en Colombia presentan profundas interdependencias ecológicas y sociales que son indisolubles.

El componente ecológico se refiere a los ecosistemas (y su composición biótica) y el social incluye a los habitantes y usuarios de los servicios de dichos ecosistemas, su distribución en el territorio, las organizaciones e instituciones que conforman y las actividades que realizan (Vilardy et al., 2014). Es por esto que los humedales son considerados sistemas socioecológicos o socioecosistemas, por el vínculo interdependiente e inquebrantable entre los sistemas sociales y ecológicos que conviven en este espacio acuático.

Siguiendo las recomendaciones de Vilardy et al. (2014): «Al estudiar los humedales en Colombia se debe tener en cuenta los límites de estos socioecosistemas, los cuales deben ser concebidos como membranas funcionales dentro de una estructura ecológica superior que los integra, que es la cuenca. La selección del área de estudio debe basarse en límites funcionales más no jurídicos o administrativos». Ante lo anterior, el presente estudio entiende los hidrosistemas seleccionados y sus subunidades hidrológicas como sistemas socioecológicos donde la dinámica hidrológica se ve influenciada por las características climáticas de la macrocuenca Magdalena-Cauca y de la región en la que se ubica, así como por las características ecológicas y socioeconómicas del territorio. En consonancia con esto, el análisis de riesgo tuvo en cuenta los atributos de los sistemas sociales, ecológicos e hidrológicos de cada subunidad hidrológica para comprender el riesgo de los sistemas socioecológicos implicados (Figura 2.1).

Figura 2.1. Planicies inundables dentro de hidrosistemas o sistemas socioecológicos



Fuente: modificado de UNESCO-IHE, TNC y TU Dresden, 2015.

2.1. Vulnerabilidad y riesgo de sistemas socioecológicos

El presente estudio, basado en un informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) de 2014 (IPCC, 2014) y en la Tercera Comunicación Nacional de Colombia sobre Cambio Climático (IDEAM et al., 2017), tiene como objetivo realizar el análisis de riesgo al cambio climático de los sistemas socioecológicos seleccionados considerando las siguientes definiciones:

1. **Riesgo:** potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosas sobre los sistemas socioecológicos inmersos en los hidrosistemas que contienen las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca por cambios hidroclimáticos, y se establece a partir de la interacción entre la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (Figura 2.2).

2. **Amenaza (Peligro[2]):** acaecimiento potencial de un cambio en la dinámica hidrológica de la macrocuenca Magdalena-Cauca, dado por el cambio climático, que puede causar pérdidas o efectos negativos sobre los sistemas socioecológicos inmersos en los hidrosistemas que contienen las planicies inundables de dicha macrocuenca.
Dado que la amenaza está en función del elemento expuesto, esta investigación considera que el elemento expuesto es la dinámica hidrológica[3].

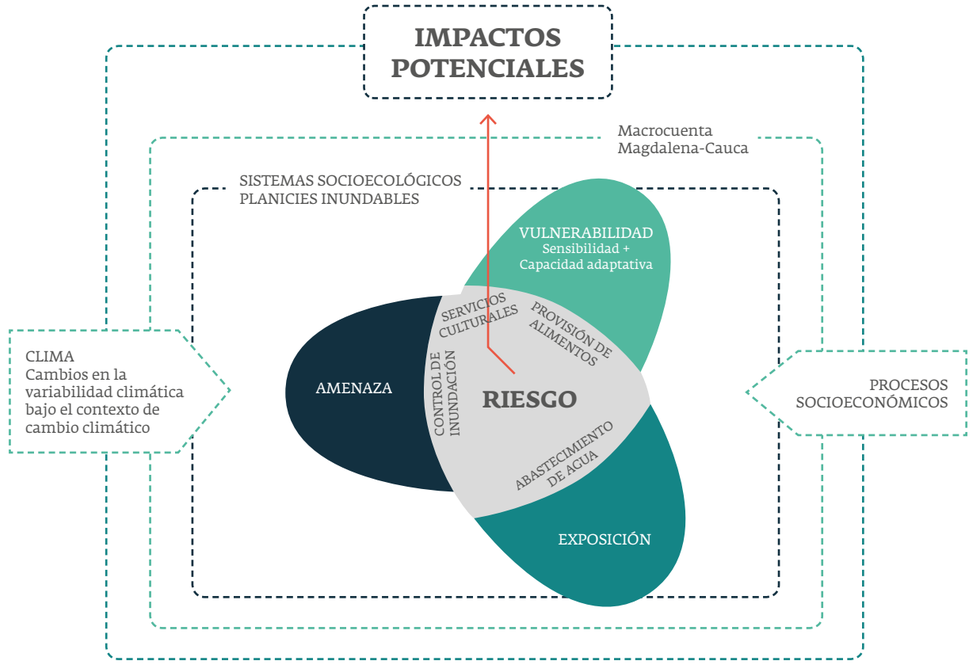
3. **Vulnerabilidad:** propensión o predisposición de los sistemas socioecológicos inmersos en los hidrosistemas que contienen las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca a verse afectados negativamente por cambio climático. Incluye la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la capacidad de respuesta y adaptación frente al cambio climático.

4. **Sensibilidad:** grado por el que están afectados los sistemas socioecológicos, en sentido perjudicial o en sentido beneficioso, por razón de estímulos relacionados con el clima.

5. **Capacidad de adaptación:** se entiende como la habilidad de los sistemas socioeconómicos para ajustarse a los daños potenciales, favorecerse de las oportunidades o responder a las consecuencias de la afectación de los servicios ecosistémicos a causa del cambio climático.

[2] De acuerdo con la traducción al español del Quinto Informe del IPCC 2014, *hazards* corresponde a *peligro*, sin embargo, este componente se refiere a la amenaza.
[3] La obtención de indicadores de amenaza a partir de escenarios de cambio climático en el modelamiento hidrológico es un aporte valioso para los análisis de riesgo al cambio climático.

Figura 2.2. Marco conceptual del análisis de vulnerabilidad y riesgo



Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2014) y Vilardy et al. (2014).

El riesgo se calculó de la siguiente forma, teniendo en cuenta la Tercera Comunicación Nacional de Colombia sobre Cambio Climático (IDEAM et al., 2017): $R=\Delta A^{*}V$ donde $V=(S/CA)$, donde R es riesgo, A es amenaza, V es vulnerabilidad, S es sensibilidad y CA es capacidad de adaptación, siguiendo las definiciones anteriormente dadas.

Este estudio se enfocó en analizar el riesgo al cambio climático de las planicies inundables, entendidas como sistemas socioecológicos, a la luz de algunos de los servicios ecosistémicos que estas prestan. Se seleccionaron los siguientes, los cuales se entienden del modo aquí presentado:

1. **Provisión de alimentos,** entendido como los beneficios generados por los productos derivados de la biodiversidad y su gestión de interés alimentario (Martín-López et al., 2012).
2. **Abastecimiento de agua,** entendido como el beneficio de obtener agua dulce para uso doméstico, industrial y agrícola (Kosmus et al., 2012).
3. **Control de inundaciones,** entendido como el beneficio que se percibe de la capacidad de los ecosistemas para reducir las inundaciones y aumentar la resistencia de los territorios a los cambios en el clima (Kosmus et al., 2012).
4. **Servicios culturales,** relacionados con el significado espiritual, conocimiento, información e importancia paisajística que tienen estos ecosistemas para sus poblaciones humanas y que hacen parte de su cosmovisión y plan de vida (MEA, 2005). Asimismo, el disfrute estético consiste en la apreciación de especies, paisajes o lugares determinados que generan satisfacción por su inspiración espiritual y placidez por su estética (Martín-López et al., 2012).

2.2. Alcance del estudio

El análisis de riesgo al cambio climático de las planicies inundables, entendidas como sistemas socioecológicos, es un insumo importante para la identificación y priorización de medidas y acciones de adaptación y gestión del riesgo a la variabilidad y cambio climático. Este análisis se constituye en una herramienta que habrá de facilitar la toma de decisiones encaminada a la reducción de la vulnerabilidad de dichos sistemas ante los posibles efectos del clima, desde una perspectiva de la prevención. Estos resultados son indicativos y, por tanto, deben complementarse con otra información de las regiones y el saber de los actores locales. El análisis de riesgo elaborado se caracteriza por lo siguiente:

1. Se realizó a partir de información primaria y secundaria: datos hidrológicos, meteorológicos y socioeconómicos de fuentes oficiales. Los datos ecológicos fueron calculados por el equipo de trabajo a partir de cartografía disponible en el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC).

2. El análisis no contempla un análisis de oferta o demanda de servicios ecosistémicos. Los indicadores fueron seleccionados de manera que fuesen coherentes con el servicio ecosistémico que se quiso explorar. En consecuencia, es un ejercicio exploratorio del riesgo «a la luz» de los servicios ecosistémicos, pero no responde a la vulnerabilidad o al riesgo del servicio *per se*, ya que se desconoce en Colombia el estado de la oferta y demanda de los servicios ecosistémicos seleccionados.

3. Aunque el informe del IPCC de 2014 (IPCC, 2014) sugiere el cálculo de impactos, esta investigación no llegó a calcularlos.

4. El estudio del riesgo a la luz de los servicios culturales con información secundaria implicó un reto por la baja disponibilidad de datos y por las múltiples aristas que contempla un análisis de este tipo. A pesar de estas limitaciones, era necesario darle visibilidad a la dimensión cultural en el análisis de riesgo, por su importancia tanto en términos de sensibilidad como de capacidad de adaptación, desde una perspectiva de cambio. En este sentido, la selección de indicadores permitió una aproximación al estado de la biodiversidad, las poblaciones humanas y los territorios que conforman el sistema socioecológico, donde tienen lugar los servicios culturales.

5. Algunos indicadores de capacidad de adaptación hacen referencia a la inversión financiera de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y los entes territoriales. Estos indicadores reflejan solo en parte la capacidad de respuesta o de adaptación. Sin embargo, es información actualizada y disponible para todos los municipios del país.

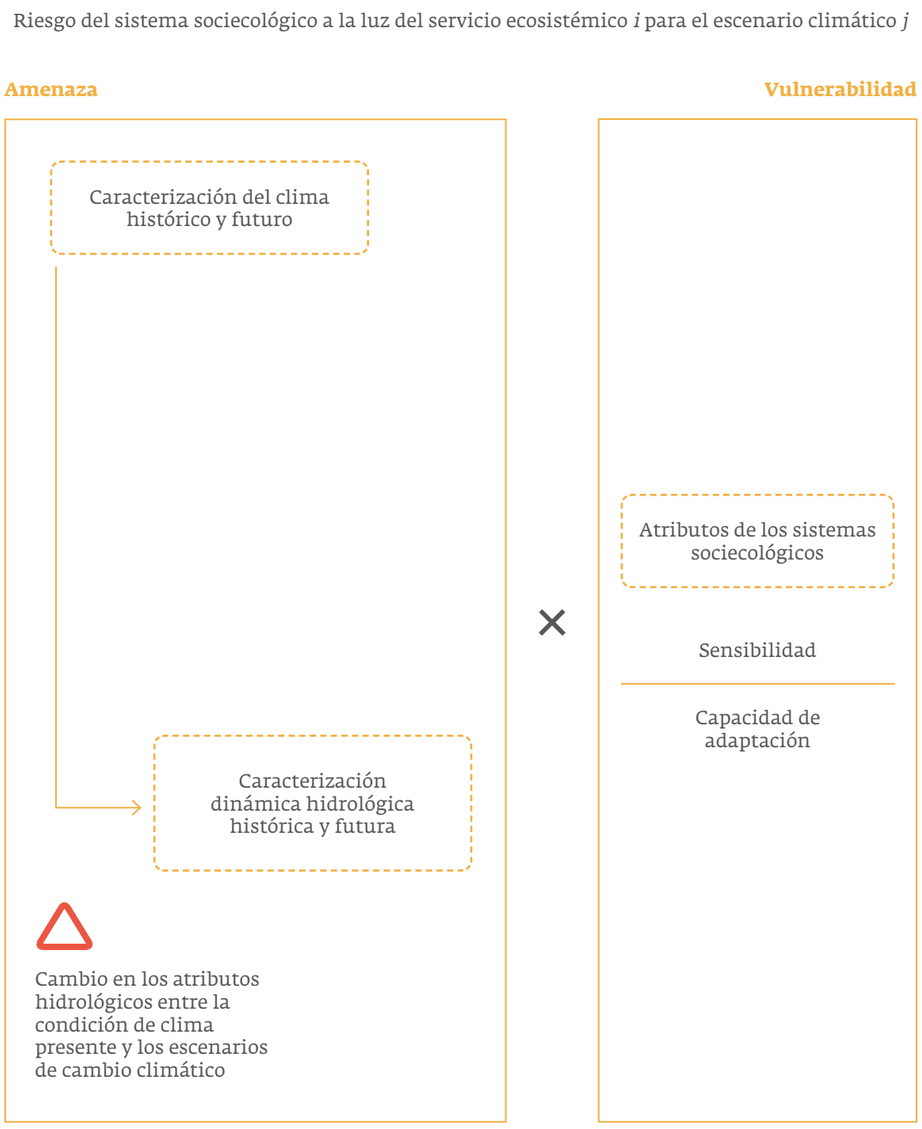
6. La información a escala municipal requirió de un tratamiento especial para llevarla a nivel de subunidades hidrológicas o socioecosistemas, para lo cual se tuvieron en cuenta criterios específicos de acuerdo a cada indicador (características y alcance).

2.3. Proceso metodológico para el análisis de riesgo de sistemas socioecológicos a la luz de servicios ecosistémicos priorizados

El análisis de riesgo es una relación entre la amenaza y la vulnerabilidad. Para el cálculo de la amenaza se requirió realizar una caracterización del clima histórico (1981-2005) y futuro (2015- 2040) que permitiera evaluar la respuesta hidrológica ante un cambio en las variables climáticas (precipitación y temperatura) (Figura 2.3). El estudio generó unos escenarios de cambio climático de los que se obtuvo la caracterización del clima futuro. La información climática histórica y futura se incorporó en WEAP (Water Evaluation And Planning System, por sus siglas en inglés; *software* conocido en español como Sistema de Evaluación y Planificación del Agua) para obtener una simulación de la respuesta hidrológica en los hidrosistemas en un escenario más húmedo y otro más seco con respecto a la condición histórica. De este modo se obtuvieron los indicadores de amenaza a partir de cada servicio ecosistémico. Adicionalmente, se definieron unos indicadores de sensibilidad y capacidad de adaptación con base en información disponible a nivel municipal,que fue ajustada a los hidrosistemas y sus subunidades de análisis. Además, algunos indicadores de sensibilidad relacionados con paisaje y peces fueron obtenidos en el mismo estudio gracias a los contribuidores.

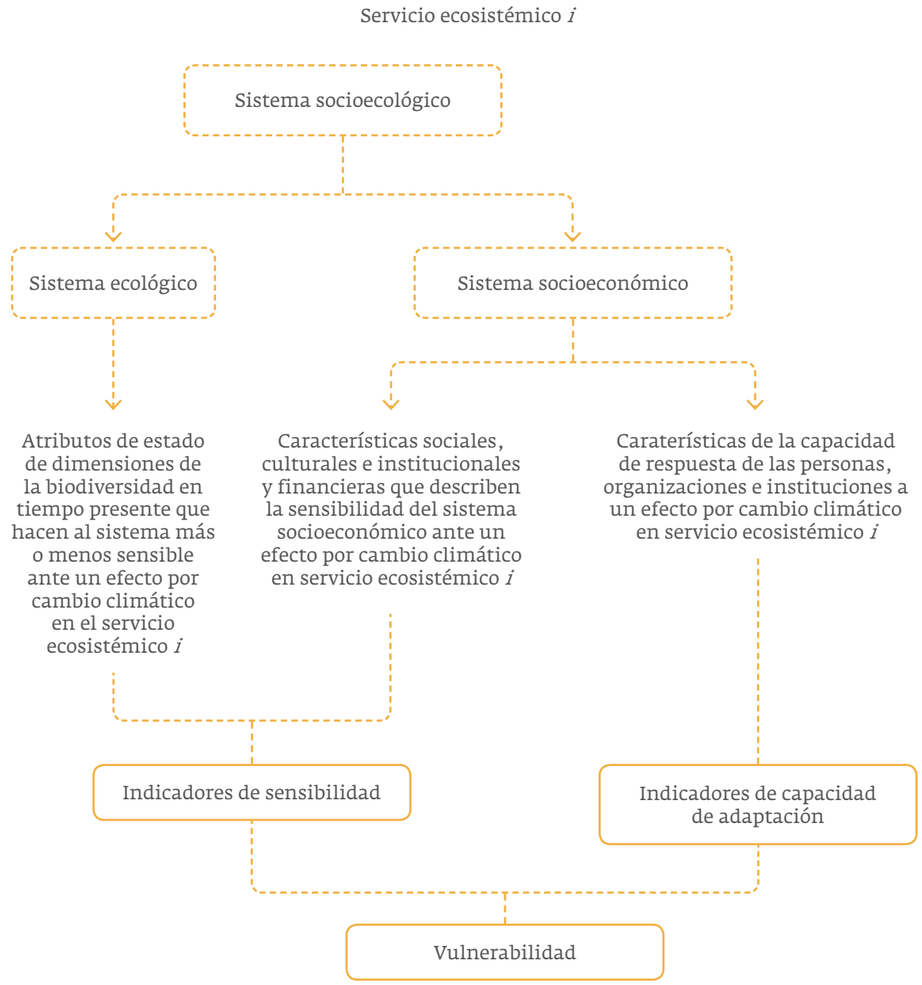
Es la primera vez en el país que un análisis de vulnerabilidad y riesgo se enfoca en servicios ecosistémicos y utiliza modelamiento hidrológico para entender la respuesta de las planicies al cambio en el clima, lo que posibilitó la obtención de los indicadores de amenaza.

Figura 2.3. Esquema general conceptual y metodológico del análisis de riesgo de los sistemas socioecológicos al cambio climático



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.4. Esquema general conceptual de la vulnerabilidad de sistemas socioecológicos[4]



Fuente: Elaboración propia.

[4] Para mayor información sobre los cálculos realizados para obtener los diferentes indicadores utilizados, revisar los anexos digitales.

2.4. Descripción de indicadores de riesgo a la luz de cada servicio ecosistémico

A continuación, se presentan cada uno de los indicadores utilizados en el análisis, partiendo de cada servicio ecosistémico para cada escenario climático estudiado (más seco y más húmedo). En los anexos digitales se encuentra la interpretación de cada indicador de amenaza y vulnerabilidad.

Tabla 2.1. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco a la luz de la provisión de alimentos (pesca)

Servicio ecosistémico	Amenaza ESCENARIO MÁS SECO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Provisión de alimentos (pesca)	A.SQ.PA-P.02 Cambio en el volumen almacenado en la planicie correspondiente al percentil del 95 % de la curva de duración de volúmenes	S.PA-P.01. Número de especies de peces de importancia pesquera	S.PA-P.03. Toneladas de pesca para consumo por municipio	CA.PA-P.01. Número de asociaciones de pescadores artesanales
		S.PA-P.02. Área de humedales transformados		

Tabla 2.2. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más húmedo a la luz de la provisión de alimentos (cultivos)

Servicio ecosistémico	Amenaza ESCENARIO MÁS HÚMEDO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica	Socioeconómica	
Provisión de alimentos (cultivos)	A.IN.PA-C.01. Cambio en la frecuencia de las rachas húmedas del SPEI correspondiente al percentil 50 % de la curva de duración (frecuencias)	S.PA-C.01. Área en conflicto de uso del suelo en zonas agrícolas	S.PA-C.07. Población rural pobre (índice multidimensional de pobreza)	CA.PA-C.01. Número de UPA que recibieron asistencia técnica para el total en el área rural dispersa censada en el municipio
		S.PA-C.02. Área de suelos degradados por erosión	S.PA-C.08 Área agrícola en zonas con estacionalidad hidrológica (humedales potenciales y temporales)	CA.PA-C.02. Número de productores que no pertenecen a ningún tipo de asociación
		S.PA-C.03. Área en grado de salinización de suelos moderado, severo y muy severo	S. PA-C.09. Número de Unidades de Producción Agrícola (UPA) que tienen dificultades en el uso del agua para las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada en el municipio	
		S.PA-C.06 Grado de heterogeneidad del paisaje (índice de diversidad de Shannon)	S. PA-C.10. Número de UPA que realizaron prácticas de protección del suelo en el desarrollo de las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada en el municipio	

Tabla 2.3. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco a la luz de la provisión de alimentos (cultivos)

Servicio ecosistémico	Amenaza ESCENARIO MÁS SECO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica	Socioeconómica	
Provisión de alimentos (cultivos)	A.SQ.PA-C.01. Cambio en la frecuencia de las rachas secas del SPEI correspondiente al percentil 50 % de la curva de duración (frecuencias)	S.PA-C.01. Áreas en conflicto de uso del suelo en zonas agrícolas	S.PA-C.07. Población rural pobre (índice multidimensional de pobreza)	CA.PA-C.01. Número de UPA que recibieron asistencia técnica para el total en el área rural dispersa censada en el municipio
		S.PA-C.02. Áreas de suelos degradados por erosión	S.PA-C.09. Número de UPA que tienen dificultades en el uso del agua para las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada en el municipio	CA.PA-C.02. Número de productores que no pertenecen a ningún tipo de asociación
		S.PA-C.03. Área en grado de salinización de suelos moderado, severo y muy severo	S.PA-C.10. Número de UPA que realizaron prácticas de protección del suelo en el desarrollo de las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada en el municipio	
		S.PA-C.06. Grado de heterogeneidad del paisaje (índice de diversidad de Shannon)		

Tabla 2.4. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco a la luz del abastecimiento de agua

Servicios ecosistémicos	Amenaza ESCENARIO MÁS SECO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad adaptativa (CA)
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Abastecimiento de agua	A.SQ.AA.02. Cambio en los aportes de escorrentía de cuenca propia correspondiente al percentil del 95 % de la curva de duración de caudales	S.AA.01. Tasa de deforestación periodo 2010-2012	S.AA.05. Índice del uso del agua superficial	CA.AA.01. Inversión de las CAR en restauración/ reforestación por área
		S.AA.02. Área en conflicto de uso del suelo	S.AA.06. Número de UPA que hacen protección al agua en las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada por municipio	CA.AA.02 Inversión total en restauración/ reforestación
		S.AA.03. Área de cobertura natural		
		S.AA.04. Índice de integridad ecológica (índice de proximidad de parches de coberturas naturales)		

Tabla 2.5. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más húmedo a la luz del abastecimiento de agua

Servicios ecosistémicos	Amenaza ESCENARIO MÁS HÚMEDO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Abastecimiento de agua	A.IN.AA.02. Cambio en los aportes de escorrentía de cuenca propia correspondiente al percentil del 5 % de la curva de duración de caudales	S.AA.01. Tasa de deforestación periodo 2010-2012	S. AA. 05. Índice del uso del agua superficial	CA.AA.01. Inversión de las CAR en restauración/ reforestación en cuencas hidrográficas
		S.AA.02. Área en conflicto de uso del suelo	S.AA.06. Número de UPA que hacen protección al agua en las actividades agropecuarias para el total en el área rural dispersa censada por municipio	CA.AA.02. Inversión por municipio en restauración/ reforestación
		S.AA.03. Área de cobertura natural		
		S.AA.04. Índice de integridad ecológica (índice de proximidad de parches de coberturas naturales)		

Tabla 2.6. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático húmedo a la luz del control de inundaciones

Servicios ecosistémicos	Amenaza ESCENARIO MÁS HÚMEDO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Control de inundaciones	A.IN.CI.01. Cambio en el volumen almacenado en la planicie correspondiente al percentil del 5 % de la curva de duración de volúmenes	S.CI.01. Áreas en conflicto de uso del suelo	S.CI.05. Número total de personas afectadas y damnificadas por fenómenos naturales hidrometeorológicos y climáticos por municipio	CA.CI.01. Inversión de las CAR en medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático
		S.CI.02. Área de cobertura vegetal natural en área de humedales temporales y potenciales		CA.CI.02. Inversión total por municipio en restauración/ reforestación
		S.CI.03. Área de humedales transformados		
		S.CI.04. Índice de integridad ecológica de los ecosistemas terrestres (índice de proximidad de parches de coberturas naturales)		

Tabla 2.7. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más húmedo a la luz de los servicios culturales

Servicios ecosistémicos	Amenaza ESCENARIO MÁS HÚMEDO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Servicios culturales	A.IN.SC.02. Cambio en la distancia de Kullback-Leibler del caudal	S.SC.01. Número de especies de peces de importancia pesquera	S.SC.08. Área agrícola	CA.SC.01. Área bajo alguna categoría de protección/conservación en el territorio
		S.SC.02. Número de especies amenazadas y de uso	S.SC.10. Número de sitios arqueológicos	CA.SC.02. Área de territorio étnico legal
		S.SC.03. Índice de integridad ecológica-índice de diversidad de Shannon a escala de paisaje	S.SC.12. Número de Bienes de Interés Cultural (BIC)	CA.SC.04. Número de reservas de la sociedad civil
		S.SC.04. Área de transformación de humedales por subunidad	S.SC.13. Número de UPA con aprovechamiento de productos del bosque natural y vegetación de páramo (flora, resinas, fauna) para el total en el área rural dispersa censada	CA.SC.05. Número de asociaciones comunitarias para la gobernanza del territorio (asociaciones de productores campesinos, consejos comunitarios, resguardos indígenas y asociaciones de pescadores artesanales)
		S.SC.07. Áreas en conflicto de uso del suelo	S.SC.15. Población rural pobre (índice multidimensional de pobreza)	CA.SC.06. Número de estrategias de protección de patrimonio cultural (Planes Estratégicos de Salvaguarda-PES)
		S.SC.14. Área de suelos degradados por erosión		CA.SC.03. Inversión en restauración/ reforestación por CAR[5]

[5] Este indicador solo se utilizó para el hidrosistema río Otún.

Tabla 2.8. Indicadores seleccionados para evaluar el riesgo de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco a la luz de los servicios culturales

Servicios ecosistémicos	Amenaza ESCENARIO MÁS SECO	Vulnerabilidad		
		Sensibilidad socioecológica		Capacidad de adaptación
		Biofísica y ecológica	Socioeconómica	
Servicios culturales	A.SQ.SC.01. Cambio en la distancia de Kullback-Leibler del caudal	S.SC.01. Número de especies de peces de importancia pesquera	S.SC.08. Área agrícola	CA.SC.01. Área bajo alguna categoría de protección/ conservación en el territorio
		S.SC.02. Número de especies amenazadas y de uso	S.SC.10. Número de sitios arqueológicos	CA.SC.02. Área de territorio étnico legal
		S.SC.03. Índice de integridad ecológica-índice de diversidad de Shannon a escala de paisaje	S.SC.12. Número de Bienes de Interés Cultural (BIC)	CA.SC.04. Número de reservas de la sociedad civil
		S.SC.04. Área de transformación de humedales por subunidad	S.SC.13. Número de UPA con aprovechamiento de productos del bosque natural y vegetación de páramo (flora, resinas, fauna) para el total en el área rural dispersa censada	CA.SC.05. Número de asociaciones comunitarias para la gobernanza del territorio (asociaciones de productores campesinos, consejos comunitarios, resguardos indígenas y asociaciones de pescadores artesanales)
		S.SC.07. Áreas en conflicto de uso del suelo	S.SC.15. Población rural pobre (índice multidimensional de pobreza)	CA.SC.06. Número de estrategias de protección de patrimonio cultural (Planes Estratégicos de Salvaguarda-PES)
		S.SC.14. Área de suelos degradados por erosión		CA.SC.03. Inversión en restauración/reforestación por CAR [6]

[6] Este indicador solo se utilizó para el hidrosistema río Otún.

Capítulo 3

Escenarios de cambio climático y variabilidad climática en la macrocuenca Magdalena-Cauca para el horizonte prospectivo 2015-2040

Daniel Ruiz-Carrascal, Guillermo E. Armenta-Porras, Daniel González-Duque, José F. Ruiz-Murcia, Héctor Angarita, Carlos Rogéliz, Nicholas Depsky, David Yates, Luis A. López-Álvarez, Jennifer Dorado-Delgado

3.1. Metodología

Registros de estaciones. Se procesó una base de datos de 955 estaciones que registran precipitación, así como de 92 estaciones con registros de temperatura media del aire cerca de la superficie. Los criterios de selección de las estaciones incluyeron: disponibilidad de registros, longitud de series temporales, continuidad y homogeneidad de datos.

Resultados de simulación de modelos de circulación global. Se descargaron los resultados de simulación a escala diaria de varios modelos de circulación global del proyecto Coupled Model Intercomparison Project Phase 5-CMIP5, los cuales están disponibles en el portal de la NASA dedicado al *dataset* Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) (https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/). Los resultados se obtuvieron tanto para el periodo retrospectivo 1942-2005 como para el horizonte prospectivo 2011-2099 bajo dos trayectorias de concentraciones representativas o RCP (Representative Concentration Pathways 4.5 y 8.5). Se utilizaron, además, los resultados de simulación de trece de los quince modelos usados en la Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (IDEAM et al., 2015a y 2015b), así como los datos de los modelos del Max Planck Institute de Alemania (MPI-ESM-LR y MPI-ESM-MR), los cuales han mostrado buenos resultados en estudios previos (ver Angarita, 2014). Para el estudio, específicamente, se utilizaron como clima presente y clima futuro los horizontes temporales 1942-2005 y 2011-2040, respectivamente.

Criterios de priorización de modelos de circulación global. La evaluación y priorización de modelos de circulación global se basó en la comparación de sus resultados de simulaciones retrospectivas con atributos de variabilidad climática en escalas multianual, interanual e intraanual. Para el caso de precipitación y la **escala multianual**, se evaluó la capacidad individual que los modelos de circulación tienen de representar la señal regional de diferentes atributos del clima, entre ellos: (i) la lluvia total anual, (ii) los percentiles 95 % de precipitación diaria, (iii) el máximo número de días húmedos consecutivos y (iv) el máximo número de días secos consecutivos. La comparación se llevó a cabo tanto para los *gridpoints* de los modelos de circulación que se encuentran al interior de un dominio geográfico que abarca la gran mayoría del territorio colombiano, como para la serie de *gridpoints* que intersectan la macrocuenca Magdalena-Cauca. Para el análisis de la **escala interanual**, se evaluaron los resultados de simulación de los modelos de circulación a partir del análisis de: (i) los espectros de potencias de sus series temporales, (ii) los coeficientes de correlación entre el máximo número de días secos consecutivos por año y los primeros modos de oscilación espacio-temporal de los océanos Indo-Pacífico y Atlántico tropical y (iii) los porcentajes de la variabilidad temporal de las anomalías de precipitación total anual, máxima duración de los periodos húmedos y máxima duración de los periodos secos que son explicados por un promedio móvil de cuatro años, asociado a la frecuencia de ocurrencia de la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Finalmente, a **escala intraanual**, se comparó la estacionalidad (ciclos anuales de la lámina de precipitación y variabilidad natural día a día a escala mensual) de los resultados de simulación con lo observado históricamente a nivel de señales regionales y a nivel de estación.

Para el caso de temperatura media y la **escala multianual**, se evaluó la capacidad que tienen modelos de circulación global individuales de representar la señal regional de diferentes atributos del clima, entre ellos: (i) los percentiles 90 % de temperaturas del aire cerca de la superficie promedio diarias y (ii) los histogramas de frecuencia de datos de temperatura promedio diaria observados. Al igual que en el caso de precipitación, los análisis se adelantaron tanto para todos los *gridpoints* del dominio geográfico colombiano como para aquellos que intersectan la macrocuenca Magdalena-Cauca. En la **escala interanual**, se analizaron los porcentajes de la variabilidad temporal de: (i) las anomalías de percentiles 90 % de temperatura del aire cerca de la superficie promedio diaria (T_{90}), (ii) el número promedio de días por año con temperaturas del aire excediendo el umbral T_{90} y (iii) el número promedio de días consecutivos por año con temperaturas del aire excediendo el umbral T_{90}, que son explicados por tendencias lineales de largo plazo y promedios móviles de 50, 12 y 4 años. Se hizo nuevamente particular énfasis en el promedio móvil de cuatro años, el cual está asociado a la frecuencia de ocurrencia de la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Finalmente, a **escala intraanual**, se comparó la estacionalidad (ciclos anuales de temperaturas medias) de los resultados de simulación con lo observado históricamente a nivel de señales regionales y a nivel de estación.

Como métricas de comparación se implementaron *slope parameters* para el caso de tendencias de largo plazo, errores medio cuadráticos en patrones altitudinales, coeficientes de funciones de distribución de probabilidad, errores típicos, coeficientes de correlación (y sus diferencias) para distintas variables de interés, porcentajes de variabilidad temporal, factor de estacionalidad y *signal-to-noise*-

ratio, entre otros. Se implementó, además, una comparación cualitativa de espectros de potencias. El análisis integrado de capacidades de representación de atributos de variabilidad en las escalas mencionadas sugirió que las siguientes herramientas arrojan resultados satisfactorios para el análisis de las variables climáticas precipitación y temperatura media en la macrocuenca Magdalena-Cauca: bcc-csm1-1-m, CCSM4, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3 y NorESM1-M. Sin embargo, no se usaron todos estos modelos, sino que, a partir de la lista de priorizados, se seleccionaron algunos (GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3) luego de la implementación de métodos de reducción de escala.

Métodos de reducción de escala considerados. Se implementaron tres herramientas de reducción de escala (*downscaling*) a los resultados de simulaciones prospectivas de los modelos de circulación global priorizados. Estas técnicas incluyeron: (i) el método delta basado en cuantiles (Q-Q), (ii) el método no paramétrico/de reordenamiento o *bootstrapping* de k^{th} *nearest neighbor* (k-NN) (Yates et al., 2003; Gangopadhyay et al., 2005) y (iii) la técnica estadística de *Bias-Corrected Statistical Disaggregation* (BCSD) (Wood et al., 2002 y 2004; Pabón, 2011; Walsh et al., 2018 Walsh et al., 2012). Luego de la comparación de los resultados de simulación de los modelos de circulación a nivel de señales regionales y a nivel de estación (siguiendo la misma serie de criterios discutidos en el proceso de priorización de modelos de circulación global), se seleccionó la técnica de reducción de escala de método delta Q-Q. Esta herramienta (Figura 3.1) consiste en revisar la distribución a escalas mensual o diaria del comportamiento de las variables climáticas a través de un mapeo de cuantiles, aplicado tanto a las series observadas como a las series histórica y futura de cada modelo. Se analiza el cambio proyectado en el escenario futuro en comparación con lo proyectado en el periodo de clima presente para cada modelo, y este cambio se aplica a las series observadas, generando así nuevas «series futuras». Ejemplos de los gráficos de cuantiles de la técnica de reducción de escala de método delta Q-Q, así como una breve descripción de las otras dos técnicas de reducción de escala, se incluyen en los anexos.

Figura 3.1. Método delta basado en cuantiles (método delta Q-Q)

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Clima futuro

3.2.1. Atributos multianuales

Temperatura media del aire cerca de la superficie. Las medianas de anomalías del percentil 90 % (T_{90}) de temperaturas medias para el RCP 8.5 alcanzarían +0,84, +1,31 y +0,77 °C a nivel de las unidades de simulación hidrológica, de acuerdo con los resultados de implementación de la técnica de reducción de escala del método delta Q-Q a las simulaciones prospectivas de los modelos de circulación GISS-E2-R, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3, respectivamente. Las medianas de anomalías del percentil 10 % (T_{10}) de temperaturas medias alcanzarían, por su parte, +0,78, +1,07 y +0,67 °C según las herramientas GISS-E2-R, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3, respectivamente. Las anomalías de T_{90} proyectadas al horizonte prospectivo 2016-2040 podrían variar entre +0,23 y +2,93 °C, entre +0,29 y +2,63 °C, y entre +0,13 y +2,31 °C con respecto al periodo base 1978-2015, según las herramientas GISS-E2-R, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3, respectivamente. Las anomalías de T_{10} proyectadas al horizonte prospectivo 2016-2040 podrían variar entre +0,11 y +2,58 °C, entre +0,36 y +1,85 °C, y entre +0,18 y +2,26 °C con respecto al periodo base 1978-2015, según las herramientas GISS-E2-R, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3, respectivamente.

Precipitación. Luego del análisis de los histogramas de frecuencia de anomalías de precipitación total anual sugeridos por los modelos de circulación global GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3 para el RCP 8.5, y considerando específicamente el modelo que muestra condiciones más críticas (MRI-CGCM3), se observa que el 84,3 % de las estaciones meteorológicas podrían experimentar en el mediano plazo condiciones más secas que el valor anual observado en el periodo base 1974-2015. Las reducciones proyectadas alcanzarían valores en el rango de -1,9 a -37,0 %. El 15,7 % de las estaciones podrían experimentar, por su parte, incrementos en la lámina de precipitación total anual entre el +0,5 y el +7,5 % en el horizonte prospectivo de corto a mediano plazo. Con respecto a condiciones extremas, el modelo MRI-CGCM3 sugiere que el 54,2 % de las estaciones meteorológicas podrían exhibir reducciones en la magnitud del percentil 95 % de precipitación diaria (R_{95}) en el rango de -0,6 a -9,1 mm/día, mientras que el 45,8 % de ellas podrían experimentar incrementos en la lámina de R_{95} entre +0,1 y +3,3 mm/día.

3.2.2. Cambios en la variabilidad climática histórica

Temperatura media del aire cerca de la superficie. Los resultados sugieren que la gran mayoría de estaciones de la macrocuenca Magdalena-Cauca podrían experimentar un desplazamiento homogéneo del ciclo anual. Es decir, el incremento en la temperatura media podría ser uniforme todo el año excepto en algunas áreas específicas en donde se aprecia una señal estacional aunque no muy sólida. En estas regiones se observa que los mayores cambios en el ciclo anual podrían presentarse en el segundo semestre del año, en particular en los meses de agosto, septiembre y octubre.

Precipitación. En la Figura 3.2 se muestran, a escala de *gridpoint*, las diferencias en la desviación estándar día a día entre los horizontes prospectivo y retrospectivo del modelo de circulación global MRI-CGCM3. Los incrementos en la variabilidad día a día en las láminas de precipitación a futuro (horizonte de mediano plazo 2011-2040, bajo el RCP 8.5) de este modelo son particularmente altos para la segunda estación lluviosa del año, septiembre-octubre-noviembre. Veintiuno (21) de veintitrés (23) *gridpoints* de la herramienta que se encuentran al interior de la macrocuenca Magdalena-Cauca o intersectan la misma muestran el mismo signo de cambio (+, incremento) en la variabilidad día a día en las láminas de precipitación a futuro en, por ejemplo, el mes de septiembre. En la Figura 3.3 se muestran los

cambios en la varianza, estadísticamente representativos a un nivel de significancia de 0,05, de las series anuales de precipitación total mensual a nivel de *gridpoint* de dos de los modelos priorizados (MRI-CGCM3 en el panel superior y MPI-ESM-MR en el panel inferior) para el horizonte total 1942-2040. La magnitud de cambio en la varianza y su tendencia sugieren que tan sólo se presentan cambios estadísticamente significativos en los *gridpoints* de la macrocuenca Magdalena-Cauca que se resaltan en la figura. Los cambios en la desviación estándar en las series de precipitación total mensual del mes de septiembre varían entre 26,2 mm/mes y 41,2 mm/mes. Finalmente, en la Figura 3.4, se muestra la distribución espacial (a nivel de estación) de los cambios en las láminas de precipitación total mensual del mes de noviembre, según los resultados de simulación de los modelos de circulación GISS-E2, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3, luego de la implementación de la técnica de reducción de escala del método delta Q-Q. Obsérvese la alta heterogeneidad espacial en las anomalías proyectadas. Si se analizan exclusivamente los resultados de simulaciones prospectivas del modelo MRI-CGCM3, parece que la zona baja de la macrocuenca Magdalena-Cauca podría experimentar condiciones más secas de lo normal, mientras que las zonas media y alta podrían experimentar condiciones más húmedas de lo normal.

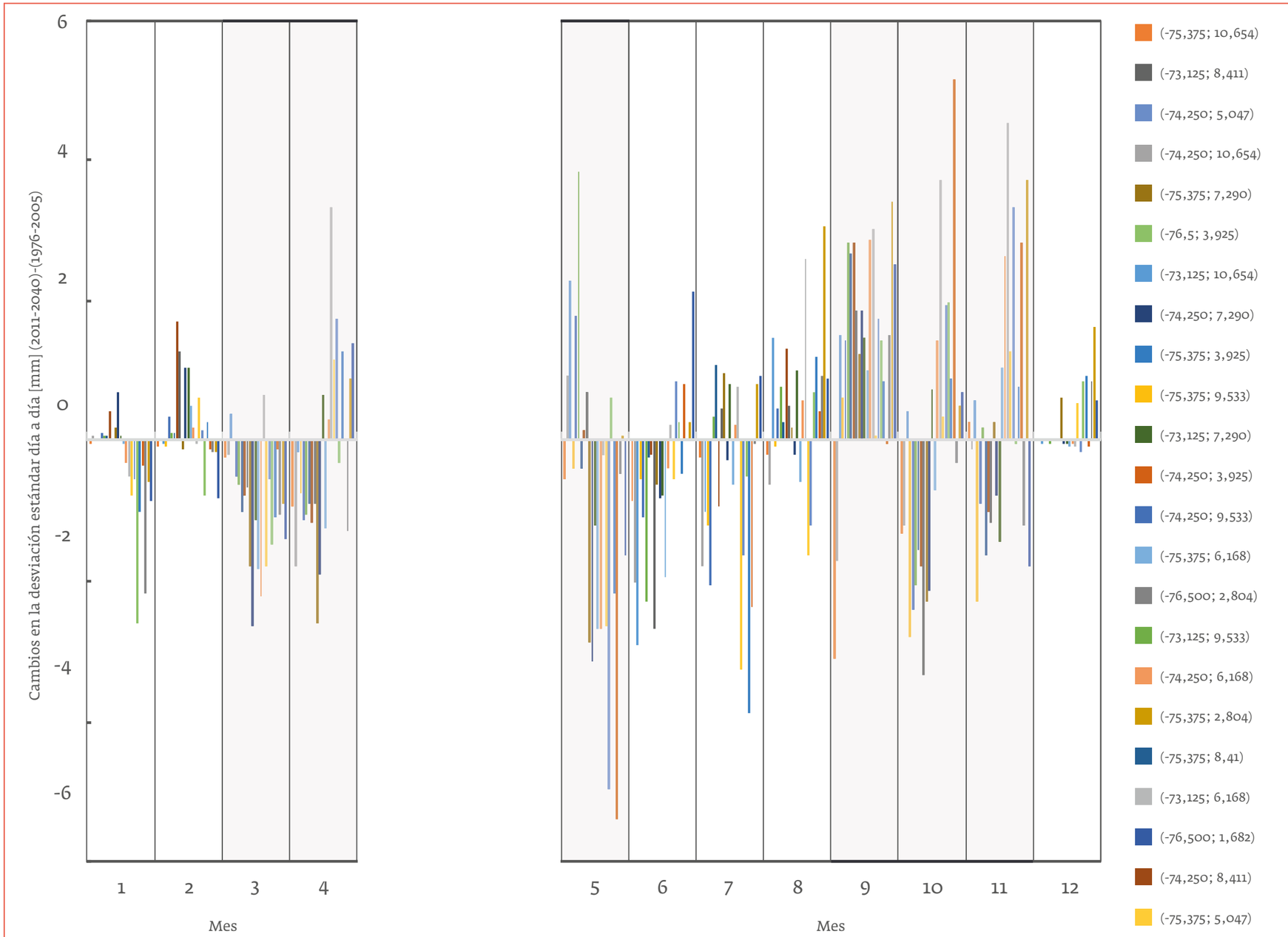
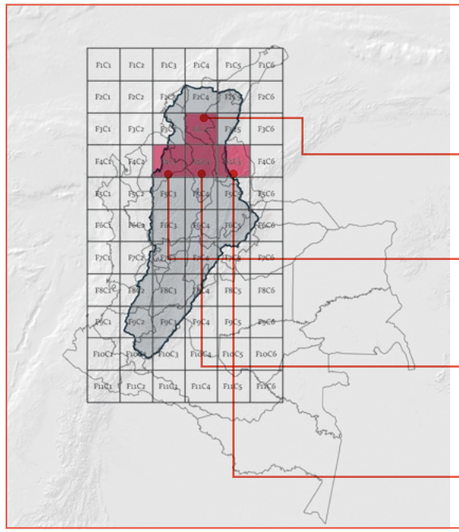


Figura 3.2. Cambios en la desviación estándar día a día de las láminas de precipitación en el horizonte prospectivo 2011-2040 con respecto al histórico retrospectivo 1976-2005, presentados a escala de *gridpoint* del modelo de circulación global MRI-CGCM3

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Cambios en la varianza, estadísticamente significativos a un nivel de significancia de 0,05, de las series anuales de precipitación total mensual (mes de septiembre) a nivel de *gridpoint* de los modelos de circulación global MRI-CGCM3 (panel superior) y MPI-ESM-MR (panel inferior) para el horizonte total 1942-2040



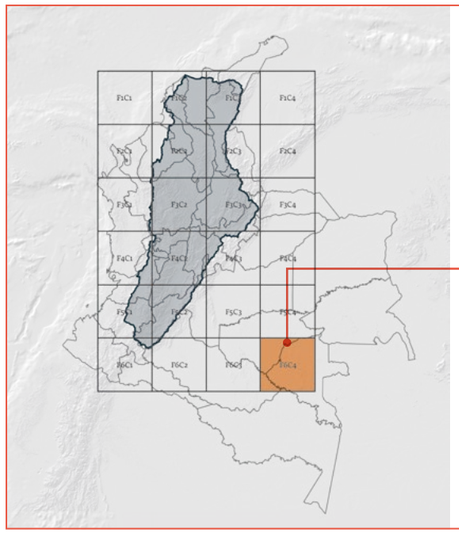
Pixeles modelo MRI-CGCM3

$SD_{1942-2005}$ = 512 mm/mes
$SD_{2011-2040}$ = 77,4 mm/mes

$SD_{1942-2005}$ = 69,5 mm/mes
$SD_{2011-2040}$ = 100,8 mm/mes

$SD_{1942-2005}$ = 63,5 mm/mes
$SD_{2011-2040}$ = 99,1 mm/mes

$SD_{1942-2005}$ = 68,0 mm/mes
$SD_{2011-2040}$ = 109,2 mm/mes

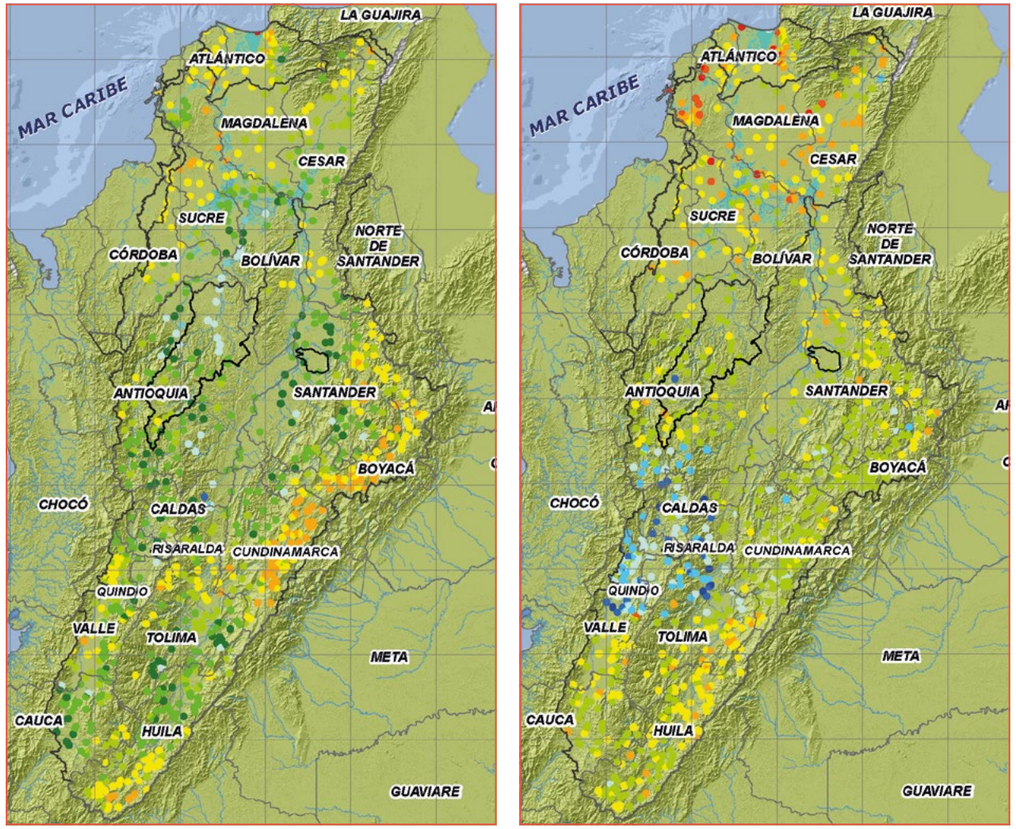


Pixeles modelo MPI-ESM-MR

$SD_{1942-2005}$ = 54,2 mm/mes
$SD_{2011-2040}$ = 78,5 mm/mes

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Cambios porcentuales, a nivel de estación, en la lámina de lluvia total mensual del mes de noviembre, sugeridos por los modelos de circulación global utilizados[7]



Precipitación observada 1991-2015 (mm)

Precipitación (mm)

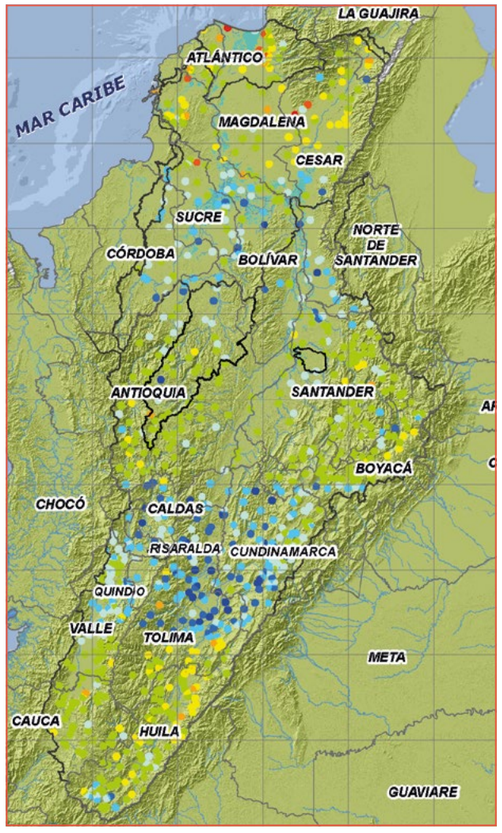
- 0,0 - 50
- 50,1 - 100
- 100,1 - 150
- 150,1 - 200
- 200,1 - 300
- 300,1 - 400
- 400,1 - 600
- 600,1 - 800
- 800,1 - 1000
- > 1000

Cambio porcentual de la precipitación 2016-2040 (%) / Modelo GISS_E2_R

Precipitación (%)

- Menor a -40 %
- -40 % a -30 %
- -30 % a -20 %
- -20 % a -10 %
- -10 % a 10 %
- 10 % a 20 %
- 20 % a 30 %
- 30 % a 40 %
- Mayor a 40 %

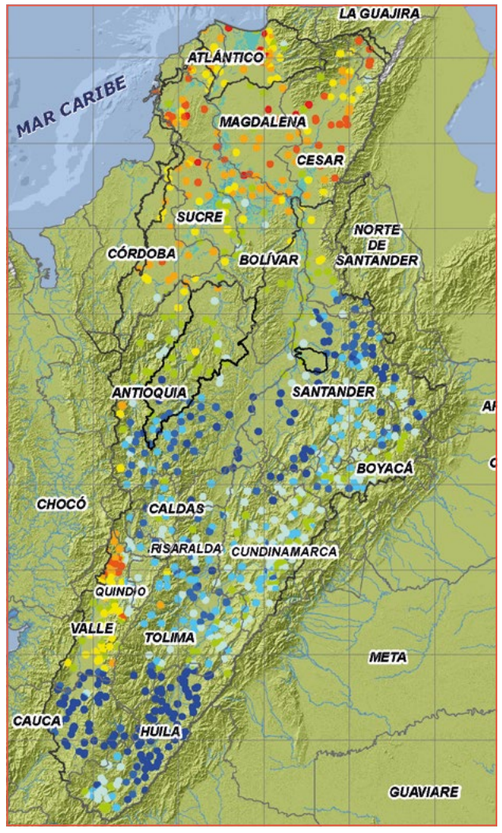
[7] GISS-E2 (segundo panel), MPI-ESM-MR (tercer panel) y MRI-CGCM3 (cuarto panel), con la técnica de reducción de escala del método delta Q-Q, para el horizonte prospectivo 2016-2040 y bajo el RCP 8.5. Los cambios en la lámina de precipitación se expresan con respecto al periodo base correspondiente al horizonte instrumental 1981-2015 (primer panel; lámina de lluvia total mensual —mes de noviembre— multianual observada [mm]).



Cambio porcentual de la precipitación 2016-2040 (%) / Modelo MPI_ESM_MR

Precipitación (%)

- Menor a -40 %
- -40 % a -30 %
- -30 % a -20 %
- -20 % a -10 %
- -10 % a 10 %
- 10 % a 20 %
- 20 % a 30 %
- 30 % a 40 %
- Mayor a 40 %



Cambio porcentual de la precipitación 2016-2040 (%) / Modelo MRI-CGCM3

Precipitación (mm)

- Menor a -40 %
- -40 % a -30 %
- -30 % a -20 %
- -20 % a -10 %
- -10 % a 10 %
- 10 % a 20 %
- 20 % a 30 %
- 30 % a 40 %
- Mayor a 40 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Conclusiones

El análisis integrado de capacidades de representación de atributos de variabilidad en las escalas multianual, interanual e intraanual sugirió que las siguientes herramientas arrojan resultados satisfactorios para el análisis de las variables climáticas precipitación y temperatura media en la macrocuenca Magdalena-Cauca: bcc-csm1-1-m, CCSM4, GFDL-CM3, GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, y NorESM1-M. La posterior implementación de las técnicas de reducción de escala: (i) método delta basado en cuantiles (método delta Q-Q), (ii) método de reordenamiento k-NN y (iii) técnica estadística BCSD, indica que los resultados más interesantes en términos de cambio climático, se obtienen luego de la implementación del método delta Q-Q a las simulaciones prospectivas de los modelos GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3.

Las proyecciones de lámina de precipitación media anual y temperatura del aire media anual sugieren que el centro-norte de la región Andina, la región Orinoquía y casi toda la extensión de la región Caribe experimentarán disminuciones en la lámina de precipitación e incrementos en la temperatura media del aire. Por lo tanto, en un escenario futuro de cambio climático global en el corto a mediano plazo, la macrocuenca Magdalena-Cauca podrá estar expuesta a sequía meteorológica acompañada de olas de calor. Las anomalías del percentil 90 % de temperaturas medias proyectadas para el horizonte prospectivo 2016-2040, con respecto al periodo base 1978-2015, podrían alcanzar valores en los rangos [+0,23; +2,93 °C], [+0,29; +2,63 °C] y [+0,13; +2,31 °C], según las herramientas GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3, respectivamente. Las anomalías del percentil 10 % podrían alcanzar valores en los rangos [+0,11; +2,58 °C], [+0,36; +1,85 °C] y [+0,18; +2,26 °C], respectivamente. En torno a precipitación, el 84,3 % de las estaciones meteorológicas podrían experimentar condiciones más secas en el corto a mediano plazo que el valor anual observado en el periodo base 1974-2015, de acuerdo con los resultados de simulación del modelo de circulación global MRI-CGCM3, el cual muestra las condiciones más críticas. Las reducciones proyectadas alcanzarían valores en el rango de -1,9 a -37,0 %. La herramienta MRI-CGCM3 también sugiere que el 45,8 % de las estaciones con registros de lluvia diaria podrían experimentar incrementos en la lámina del percentil 95 % entre +0,1 y +3,3 mm/día.

Las simulaciones prospectivas y la técnica de reducción de escala implementada sugieren que el incremento en la temperatura media será uniforme todo el año. Los cambios en precipitación, por el contrario, podrán ser particularmente altos en la segunda estación lluviosa del año: el trimestre septiembre-octubre-noviembre. Espacialmente, la zona baja de la macrocuenca Magdalena-Cauca podrá experimentar condiciones más secas de lo normal, mientras que las zonas media y alta podrán experimentar condiciones más húmedas de lo normal.

Capítulo 4

Escenarios de amenaza hidroclimática de las planicies inundables de la cuenca del río Magdalena por efecto del cambio climático

John Chavarro, Nelsy Verdugo, Héctor Angarita, Carlos Rogéliz

El presente capítulo hace referencia a los aspectos metodológicos y resultados relacionados con los ejercicios de modelación hidrológica para la valoración de la amenaza inducida por forzamiento climático en los sistemas de la ecorregión de la Depresión Momposina, la cuenca del río Nechí, la cuenca alta del río Otún y el sistema asociado a las ciénagas El Llanito y San Silvestre.

4.1. Metodología

Los aspectos metodológicos se apoyan en la selección del modelo hidrológico, la definición de atributos para caracterizar la amenaza a los servicios ecosistémicos y la construcción de escenarios hidrológicos basados en el desarrollo de climas prospectivos con atributos de variabilidad interesantes para la evaluación de servicios ecosistémicos.

El modelo hidrológico seleccionado es el modelo WEAP (Water Evaluation And Planning System; www.weap21.org), desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI). La plataforma WEAP busca reproducir la oferta y demanda hídrica en el área de la planicie inundable de tal forma que permita analizar y comparar su comportamiento hidrológico ante diferentes alternativas de intervención en la zona o en sus tributarios en el largo plazo. WEAP es una herramienta computacional basada en sistemas de información geográfica que permite la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca (Yates et al., 2005). El modelo hidrológico incluido en WEAP se han definido características específicas derivadas de la curva de duración (percentiles 5 %, 50 % y 95 %) de algunos atributos hidroclimáticos como el caudal en las corrientes de los ríos, los caudales que ingresan a la planicie de inundación, los volúmenes almacenados en la planicie y la escorrentía total local, además del criterio de convergencia (distancia de Kullback-Liebler o KLD) y el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI), analizado desde sus componentes de intensidad-duración-frecuencia para los eventos de excesos y déficits más representativos en cada hidrosistema. Dichos indicadores fueron estimados para el periodo de referencia (línea base) y para dos escenarios de clima prospectivos: uno con condiciones dominantes más húmedas derivado del modelo global MRI-CGCM3 y el otro con condiciones deficitarias (más secas) derivado del modelo MPI-ESM-MR[8]. Ambos escenarios combinan eventos interesantes más secos y más húmedos, que la condición histórica. Finalmente, los cambios en los atributos hidroclimáticos entre las condiciones de referencia y los escenarios prospectivos definen el grado de amenaza a los servicios ecosistémicos de provisión de alimentos (pesca y cultivos), abastecimiento de agua (centros poblados), control de inundaciones (mitigación de desastres) y servicios culturales.

[8] El detalle de la generación de dichos escenarios fue descrito en el capítulo anterior.

se denomina *Two bucket*, y consiste en un balance de masas en dos capas de suelo: la zona de raíces y la zona profunda. El modelo es aplicado en cada *catchment* (unidad hidrológica mínima de análisis definida por el usuario). Los *catchments* pueden ser diferenciados en tamaño, tipos de suelo según la proporción de cobertura, tipo de cobertura y, por supuesto, el clima. El balance de masas de la humedad en las capas del suelo (zona de raíces y zona profunda) corresponde a sistemas de ecuaciones no lineales. El modelo utiliza la representación de relaciones topológicas entre diferentes *catchments* a través de la red de drenaje. De esta forma, el modelo puede representar diversas interacciones entre tramos de río y planicies inundables. Por ejemplo, casos en los que una planicie de inundación está alimentada por varios ríos, y el retorno de la planicie de inundación ocurre en un río o tramo diferente al tramo donde ocurre el desbordamiento (Angarita et al., 2017). Para el presente estudio, este último elemento incluido en WEAP resulta vital, ya que al menos tres de los cuatro hidrosistemas seleccionados presentan este tipo de topologías (Depresión Momposina, río Nechí y El Llanito y San Silvestre), es decir, intercambian con mayor o menor frecuencia información entre la corriente principal y la planicie de inundación, generando características que definen al sistema como único.

La estimación de indicadores hidrológicos se realiza a partir de la caracterización de variables de estado del sistema hidrológico (caudales, láminas de escurrimiento total, volúmenes de inundación, humedad en el suelo, etc.). En resumen, las estimaciones son basadas en la curva de duración de la variable, la distancia de Kullback-Leibler y el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI), y a partir de esos datos se construyen los índices propuestos para las condiciones de referencia (histórico 1980-2015) y los escenarios futuros (proyecciones climáticas 2015-2040). La diferencia relativa (cambio del atributo hidrológico) entre la batería de índices para la condición de referencia (histórico) y las condiciones proyectadas (futuro) configura entonces el elemento de amenaza para la oferta de servicios ecosistémicos y será la entrada para la estimación del riesgo de dichos servicios.

La **curva de duración** de caudales permite reconocer las condiciones de regulación de la cuenca y los valores característicos de caudales medios y extremos, e interpretar, en forma general, las características del régimen hidrológico de un río y el comportamiento de la retención y la regulación de humedad de la cuenca. La curva de duración o de distribución de frecuencias indica el porcentaje de tiempo durante el cual los caudales igualan o exceden un valor dado (Cigizoglu y Bayazit, 2000). La forma y pendiente de la curva reflejan la capacidad de regulación de la cuenca (o de la unidad hidrológica de análisis) en la unidad de tiempo considerada. Esta curva sintetiza las características y la interacción de las condiciones geomorfológicas, geológicas, del suelo, la vegetación, el clima y la intervención antrópica (IDEAM, 2010). Una curva de duración con pendiente fuerte indica alta variabilidad en el caudal, mientras que una pendiente baja indica mayor efecto regulador (Berhanu et al., 2015; Gordon et al., 2004). En la curva de duración se marcaron también los percentiles Q_{85} y Q_{95}, los cuales han sido ampliamente relacionados con el régimen de caudal ambiental (IDEAM, 2010; ANLA, 2013). Por último, otro indicador importante se relaciona con el caudal característico Q_{10}, que puede dar información acerca de la frecuencia con que las planicies aluviales son inundadas, así como ofrecer una idea de la dimensión de los caudales (Gordon et al., 2004).

La **distancia de Kullback-Leibler** (Kullback y Leibler, 1951) es una medida (no una métrica) de la diferencia que existe entre dos distribuciones de probabilidad *P* y *Q*. Es una medida de la información perdida cuando *Q* es usada para aproximar *P*. En aplicaciones reales, usualmente *P* representa la distribución «verdadera» de los datos observados, mientras que *Q* representa un modelo teórico a comparar. Para el caso de este proyecto, *P* hace referencia a la caracterización de la variable de estado en análisis (caudales, humedad del suelo, volúmenes almacenados, etc.) para el periodo histórico, mientras que *Q* representa los escenarios climáticos futuros.

El **SPEI** es un índice cuya estimación es similar al del SPI (Índice de Precipitación Estandarizado), pero incorporando el efecto de la evapotranspiración, el cual es determinante en la definición de eventos más secos. Este índice, propuesto por Vicente-Serrano (2013), utiliza como valor de entrada el balance hídrico climático entre las entradas y salidas del sistema (diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial). El cálculo de la evapotranspiración potencial es complicado, debido a que implica muchos parámetros, como temperatura, humedad del aire, viento y radiación, entre otros. Existen muchos métodos para su estimación, entre ellos el de Hargreaves, el de Thornthwaite y el de Penman-Monteith (este último implementado en WEAP). Si bien el SPEI se ha desarrollado recientemente, ha venido siendo bastante utilizado para analizar distintas características de los eventos más secos, como son su variabilidad, impactos y los mecanismos atmosféricos que la producen.

Los modelos hidrológicos configurados con los escenarios climáticos futuros hacen parte de este documento y se adjuntan en el anexo 4.1. La construcción de los modelos hidrológicos cumplió a cabalidad con el protocolo de modelación (Domínguez, 2000), el cual incluye el proceso de calibración y validación para distintos periodos con base en registros históricos, tal como se expone en la siguiente tabla (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Principales características de los modelos hidrológicos

Hidrosistema	Área (km²)	Unidades hidrológicas	Periodo de referencia (calibración - validación)	Periodo de escenarios prospectivos de clima	Resolución temporal	Autor del modelo
Depresión Momposina	68 552	25	1982-2015	2016-2040	Mensual	TNC
Río Nechí	13 800	38	1995-2014	2015-2034	Diaria	TNC – Gotta Ingeniería
Ciénagas El Llanito y San Silvestre	902	3	1992-2014	2015-2038	Mensual	TNC – IDEAM
Río Otún	275	25	1988-2012	2016-2040	Diaria	U. Tecnológica de Pereira

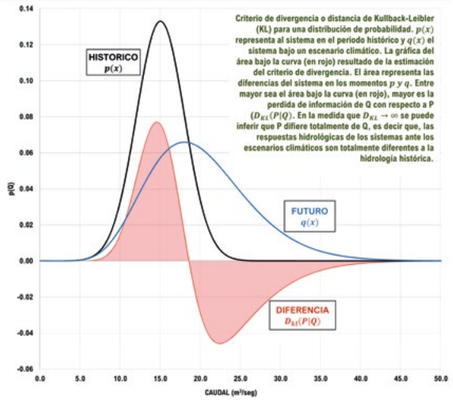
Los escenarios prospectivos de clima fueron detallados en el capítulo anterior, pero vale la pena incidir en que la información prospectiva de clima consiste en series de tiempo de precipitación total diaria o mensual (según el caso) y temperatura superficial media diaria o mensual para cada subunidad de cada hidrosistema de acuerdo con la Tabla 4.1. Según los resultados obtenidos, fueron suministrados tres escenarios prospectivos derivados de un proceso de selección y reducción de escala desde los modelos climáticos de circulación global GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3. Las series de tiempo de precipitación total y temperatura media fueron incorporadas para los tres escenarios en cada uno de los modelos hidrológicos en la plataforma WEAP. Cada escenario en el modelo hidrológico debe considerarse un indicador de potenciales cambios en el clima y no de cambios, por ejemplo, en coberturas vegetales, desarrollo de infraestructura, aumento o disminución de población, etc. La secuencia cronológica del proceso de estimación de la amenaza hidroclimática se describe a continuación en la Figura 4.1.

Figura 4.1. Metodología para la estimación de la amenaza hidroclimática

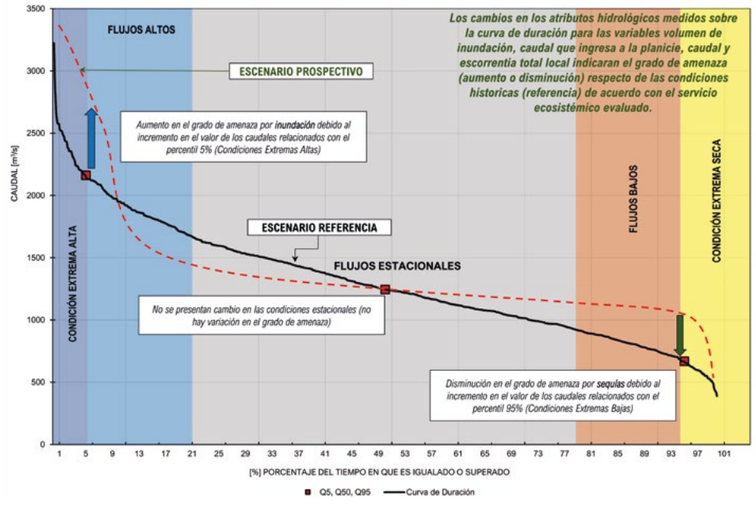
CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA HIDROCLIMÁTICA

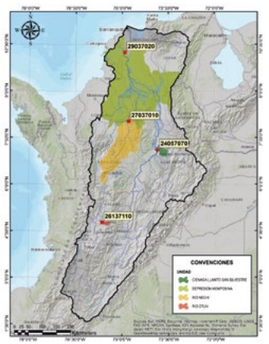
CLIMA
Proyecciones prospectivas de clima (precipitación total y temperatura media superficial)

ESTIMACIÓN DE CAMBIOS EN LOS ATRIBUTOS HIDROCLIMÁTICOS

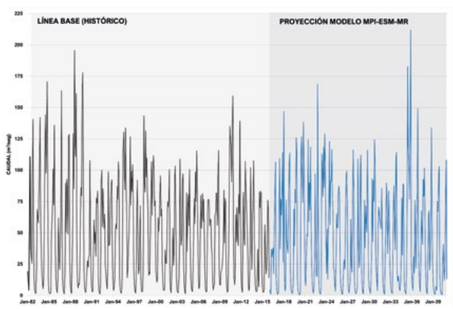


ATRIBUTOS HIDROLÓGICOS
Estimación de los atributos hidrológicos correspondientes a los percentiles del 5 %, 50 % y 95 % de la curva de duración de caudales, distancia de Kullback-Liebler y SPEI tanto para el escenario de referencia como los escenarios prospectivos en cada hidrosistema y para cada variable hidroclimática

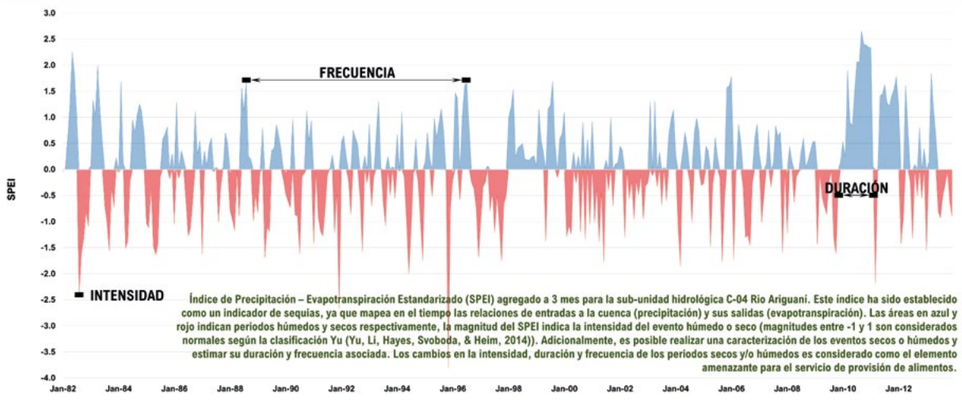




HIDROLOGÍA
Alimentación de los modelos hidrológicos en WEAP con los escenarios climáticos prospectivos generados por meteorología y estimación de las respuestas hidroclimáticas en los hidrosistemas en estudio



SERIES DE TIEMPO
Extracción de series de caudal, escorrentía total en cuenca propia, volúmenes de inundación, caudal que ingresa a la planicie de inundación y evapotranspiración real



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada escenario —más seco y más húmedo— en cada hidrosistema. Para una fácil lectura de los resultados, los datos fueron clasificados en cinco categorías de amenaza (muy baja, baja, media, alta y muy alta). Las clases son determinadas con base en los cuantiles de los datos de las 91 subunidades que conforman los hidrosistemas de la Depresión Momposina, el río Nechí, las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y el río Otún para cada indicador de amenaza, es decir, que las distintas categorías sólo son comparativas entre los hidrosistemas analizados.

En la tabla 4.2 se presentan los indicadores calculados para la caracterización de la amenaza de origen hidroclimático. Se señalan de manera diferenciada los indicadores que posteriormente fueron utilizados en análisis de vulnerabilidad y riesgo, los cuales fueron seleccionados en mesas técnicas con el equipo técnico del proyecto.

Tabla 4.2. Conjunto de indicadores para la caracterización de la amenaza de origen hidroclimático para los servicios ecosistémicos en cuencas hidrográficas de la macrocuenca Magdalena-Cauca

VARIABLE HIDROLÓGICA		Δ	SERVICIO ECOSISTÉMICO									
			PA.P		PA.A		AA		CI		SC	
			(+) seco	(+) húmedo	(+) seco	(+) húmedo	(+) seco	(+) húmedo	(+) seco	(+) húmedo	(+) seco	(+) húmedo
Caudal		P_5										
		P_{95}										
Caudal que ingresa a la planicie		P_5										
		P_{50}										
		P_{95}										
Escorrentía total local		P_5										
		P_{95}										
Volumen inundación		P_5										
		P_{50}										
		P_{95}										
SPEI	Intensidad de rachas secas	P_{50}										
	Duración de rachas secas	P_{50}										
	Frecuencia de rachas secas	P_{50}										
	Intensidad de rachas húmedas	P_{50}										
	Duración de rachas húmedas	P_{50}										
	Frecuencia de rachas húmedas	P_{50}										
Caudal		DKL										
Volumen de inundación		DKL										

Nota: en turquesa oscuro se señalan los indicadores que fueron utilizados para representar la amenaza en el análisis de vulnerabilidad y riesgo. En turquesa claro los indicadores que también se generaron para comprender la amenaza, pero no fueron utilizados posteriormente.

Los servicios ecosistémicos se representan con las siguientes abreviaturas: provisión de alimentos por pesca (**PA.P**), provisión de alimentos por cultivos (**PA.A**), abastecimiento de agua (**AA**), control de inundaciones (**CI**) y servicios culturales (**SC**).

4.2.1. Escorrentía total local (abastecimiento de agua)

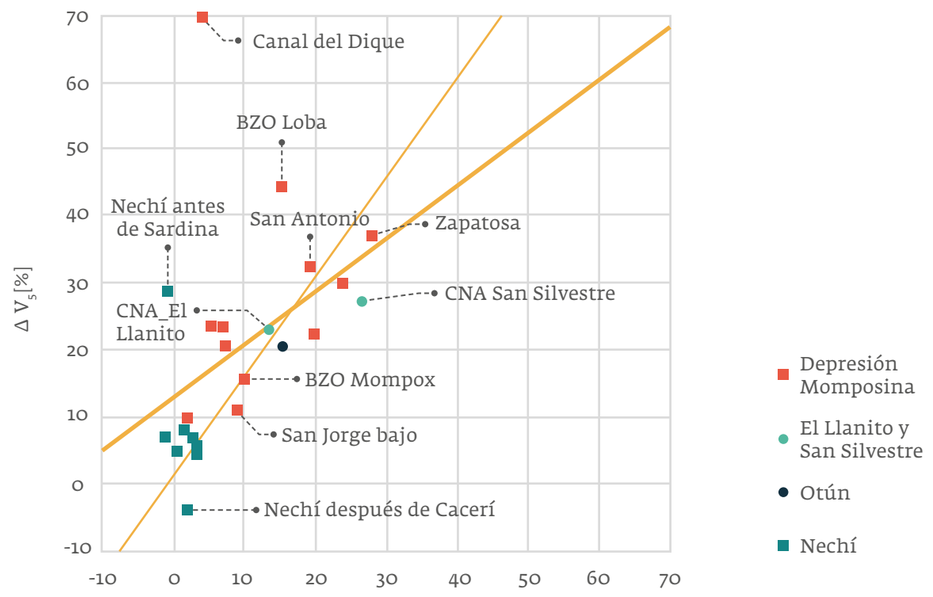
El anexo 4.2 muestra la distribución espacial de la amenaza por cambios en el percentil 5 % y 95 % de la escorrentía total por condiciones meteorológicas locales al servicio de abastecimiento de agua en un escenario más seco y más húmedo, respectivamente. Los resultados indican mayor afectación a los hidrosistemas de las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y Depresión Momposina bajo ambos escenarios. En especial, en el hidrosistema Depresión Momposina, la cuenca del río Cesar y alta del río San Jorge se ven afectadas en ambos escenarios, es decir, potencialmente se experimentarán sequías y escurrimientos totales extremos más intensos. Además, en el sector de La Mojana y ciénaga de Zapatosa, en el escenario más seco se aprecia cómo el almacenamiento en los cuerpos lénticos disminuye la amenaza en los periodos de estiaje extremos, evidenciando la prestación del servicio ecosistémico de abastecimiento de agua en las unidades de planicie. El hidrosistema de las ciénagas de El Llanito y San Silvestre experimenta, según los escenarios, amenazas significativas en ambas condiciones extremas. En el hidrosistema del río Nechí, los resultados indican amenazas potenciales altas sobre la cuenca media-alta en el escenario más seco, mientras que en el escenario más húmedo el hidrosistema no presenta amenazas significativas. El río Otún presenta mayor amenaza en el escenario de eventos extremos altos, en especial las subunidades de la cuenca alta del río Otún.

4.2.2. Caudal (provisión de alimentos, abastecimiento de agua y control de inundaciones)

El anexo 4.3 presenta los resultados por cambios en los percentiles 5 % y 95 % del caudal a los servicios de provisión de alimentos, abastecimiento de agua y control de inundaciones en los escenarios más seco y más húmedo, respectivamente. Los resultados son congruentes con los obtenidos en la variable de escorrentía total local, en especial en aquellas unidades consideradas de montaña. En el sistema Depresión Momposina se resaltan las condiciones de alta amenaza del río San Jorge y Cesar. Adicionalmente, y a diferencia del caso anterior, para el escenario más seco, la región de La Mojana presenta un grado de amenaza muy alto debido, básicamente, a la disminución de los aportes de la cuenca alta del San Jorge (como se vio en la figura anterior) y a la no conectividad del Cauca con las planicies del bajo San Jorge. Por otra parte, en el escenario más húmedo para el mismo sistema, al aumentar la amenaza sobre el río Cauca se esperan mayores aportes a las planicies del San Jorge y, por lo tanto, un aumento en la amenaza de dichas unidades de planicie. La cuenca del río Nechí responde de forma similar a la variable de escorrentía total, presentando aumento de la amenaza en toda la cuenca, con mayor grado en la parte alta-media en el escenario más seco. En el escenario más húmedo, la cuenca del Nechí no presenta amenazas significativas. En el río Otún se destaca el aumento de la amenaza en general en la parte alta de este hidrosistema, en especial la subunidad de la laguna del Otún. Por último, El Llanito y San Silvestre presenta aumento de las amenazas por condiciones más secas y más húmedas para todas las subunidades que conforman el sistema.

La Figura 4.3 ilustra la relación entre el caudal y los volúmenes de inundación. Es interesante establecer cómo para el servicio ecosistémico de control de inundaciones el indicador de amenaza es el cambio en el percentil del 5 % del escenario de inundaciones de la variable de caudal. Sin embargo, el servicio ecosistémico de control realmente lo ejerce la planicie de inundación que regula el pulso emitido por la corriente. No obstante, es clara la relación entre los caudales y los volúmenes aportados por los cursos de agua hacia las ciénagas como se muestra en la figura. Más importante aún son las diferentes relaciones (marcadas por las pendientes de las líneas de tendencia) que se pueden observar para cada hidrosistema. Por ejemplo, las subunidades del río Nechí que en general ante pequeños cambios en el caudal (percentil 5 %) responden con un mayor cambio en los volúmenes de inundación. También, las diferencias al interior del sistema Depresión Momposina, especialmente la unidad de Canal del Dique con un comportamiento similar al encontrado en Nechí. Aunque la respuesta hidrológica del volumen de inundación es función de las características geomorfológicas de la cuenca, es posible que exista alguna influencia de los efectos de regulación artificial en el deterioro de este servicio ecosistémico.

Figura 4.3. Diagrama de fase de los percentiles del 5% de la curva de duración de excedencia de caudales y volúmenes de inundación del escenario más húmedo[9]



Fuente: Elaboración propia.

El anexo 4.4 muestra la distribución espacial de la amenaza por aumento de la distancia de Kullback-Leibler de los caudales a los servicios culturales en los escenarios más seco y más húmedo. En este caso, los resultados indican un cambio significativo en la variabilidad de los sistemas del río Nechí (especialmente en la cuenca media en el escenario más seco y en general en toda la cuenca en el escenario más húmedo) y El Llanito y San Silvestre en ambos escenarios (más seco y más húmedo). El hidrosistema del río Otún presenta amenaza media a muy alta en el escenario más seco, mientras que en el escenario más húmedo solo la parte alta presenta condiciones de amenaza importantes. Las planicies de inundación de la región Depresión Momposina no muestran un cambio significativo en la medida de su variabilidad a excepción de las planicies del Brazo del Rosario y la ciénaga de Zapatosa para los dos escenarios de clima prospectivos propuestos.

[9] Es interesante establecer cómo para el servicio ecosistémico de control de inundaciones el indicador de amenaza es el cambio en el percentil del 5 % del escenario más húmedo de la variable de caudal. Sin embargo, el servicio ecosistémico de control realmente lo ejerce la planicie de inundación que regula el pulso emitido por la corriente. No obstante, es clara la relación entre los caudales y los volúmenes aportados por los cursos de agua hacia las ciénagas, como se muestra en la figura. Más importante aún son las diferentes relaciones que se pueden observar para cada hidrosistema. Por ejemplo, las subunidades del río Nechí, que en general ante pequeños cambios en el caudal (p5%) responden con un mayor cambio en los volúmenes de inundación. También, las diferencias al interior del sistema Depresión Momposina, especialmente la unidad del canal del Dique, con un comportamiento similar al encontrado en Nechí. Aunque la respuesta hidrológica del volumen de inundación es función de las características geomorfológicas de la cuenca, es posible que exista alguna influencia de los efectos de regulación artificial en el deterioro de este servicio ecosistémico.

4.2.3. Volumen de inundación (provisión de alimentos, servicios culturales y control de inundaciones)

El anexo 4.5 muestra la distribución espacial de la amenaza por cambios en los percentiles 5 % y 95 % de los volúmenes de inundación para los servicios de provisión de alimentos y culturales en los escenarios más seco y más húmedo, respectivamente. Los resultados desde el punto de vista del servicio de provisión de alimentos (cultivos y pesca) en el escenario más seco, indican que las mayores amenazas se presentan, para el sistema Depresión Momposina, en las subunidades (en orden descendente del grado de amenaza): Brazo del Rosario, Brazo de Mompox, Canal del Dique, Zapatosa, Ayapel, Brazo Papayal y Bajo San Jorge. La misma situación para los hidrosistemas Río Nechí y El Llanito y San Silvestre indica aumento en la amenaza; caso contrario a la subunidad de la laguna del Otún, en donde no se presentan cambios significativos. En esta situación, las planicies de inundación están normalmente desconectadas de las corrientes principales y no alcanzan a superar el umbral para el intercambio, por lo tanto, la oferta en las ciénagas es debida en gran medida a los aportes de cuenca propia o por las cuencas tributarias que realizan conexión hidráulica directa con la corriente principal, como es el caso del río San Jorge, Zapatosa, Brazo del Rosario, entre otras.

El mismo análisis para el escenario más húmedo debe ser abordado independientemente para el servicio de provisión de alimento por agricultura y pesca, dado que, mientras que un aumento en los valores extremos máximos puede significar una amenaza alta para la agricultura (por pérdida física del cultivo o daño por exceso de humedad), en el caso de provisión de alimento por pesca la misma situación representa una amenaza muy baja pues es cuando se obtienen las mayores productividades por dicho servicio. En resumen, las situaciones adversas para el servicio de provisión de alimentos por agricultura son aprovechadas por el sistema para proveer otro tipo de servicio, en este caso, la provisión de alimentos por pesca. De esta forma, las subunidades con mayor grado de amenaza en el escenario más húmedo son Ciénaga de Zapatosa, Brazo de Loba, Canal del Dique, San Antonio y Tacamocho en el sistema Depresión Momposina. De acuerdo con lo descrito, estas mismas subunidades serán las de menor amenaza para el servicio complementario de provisión de alimento por pesca. Para el río Nechí, en el escenario más húmedo se presenta amenaza alta en la unidad Nechí antes de Sardina (identificada con el código N_17). Las ciénagas de El Llanito y San Silvestre se ven afectadas en ambos escenarios climáticos tanto para el servicio de provisión por cultivos como para el de pesca.

Utilizando la información del cambio en el percentil 5 % de los volúmenes de inundación para el escenario más húmedo, igualmente se puede analizar la distribución espacial de la amenaza asociada a control de inundaciones. Los resultados muestran que las subdunidades Zapatosa, Ariguaní Bajo, Brazo de Loba y Canal del Dique presentan la mayor amenaza.

De la misma forma, en el anexo 4.6 se presentan los resultados por aumento de la distancia de Kullback-Leibler de los volúmenes de inundación a los servicios culturales en los escenarios más seco y más húmedo. Los resultados indican cambios significativos bajo los dos escenarios prospectivos de clima en el hidrosistema El Llanito y San Silvestre y algunas subunidades de Río Nechí y Depresión Momposina, el río Nechí antes de Cuturí, Nechí (arriba) y Nechí después de Santa Bárbara para el sistema Río Nechí, y Zapatosa, San Antonio, Ayapel y Canal del Dique para Depresión Momposina.

4.2.4. Índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado-SPEI (provisión de alimentos por agricultura)

La distribución espacial de la amenaza al servicio de provisión de alimentos (cultivos) por cambios en los atributos de duración-intensidad-frecuencia del SPEI para las rachas secas en el escenario más seco se incluye en el anexo 4.7. Como se puede apreciar, la amenaza por aumento en la duración de las rachas secas se presenta en la unidad Quebrada La Vizcaína y Ciénaga del Llanito en el hidrosistema del Magdalena medio, la cuenca baja del río Otún y la unidad Santa Ana en el sistema Depresión Momposina (en Nechí no se presentan cambios significativos). En este escenario, los cambios más interesantes se dan en términos del aumento en la intensidad —en mayor medida— y frecuencia, especialmente, para el río Nechí. Adicionalmente, se dan combinaciones de amenaza potencialmente perjudiciales para la producción agrícola; por ejemplo, en Otún y El Llanito y San Silvestre para cuenca media-baja se esperan aumentos en la duración e intensidad de los eventos de sequía. Por otra parte, en el río Nechí se esperan sequías más intensas y frecuentes. En el sistema Depresión Momposina, parte alta del río Cesar, se esperan sequías más intensas. En ningún caso se presenta la combinación de los tres atributos en categorías altas y muy altas.

El anexo 4.8 contiene los resultados referidos a la distribución espacial de la amenaza al servicio de provisión de alimentos (agricultura) por cambios en los atributos de duración-intensidad-frecuencia del SPEI para las rachas húmedas en el escenario más húmedo. Es ampliamente conocido que los efectos del exceso de humedad sobre las plantas generan un mayor impacto incluso que el déficit hídrico (Boyer, 1995; Kanwar, 198; Rosenzweig, 2001). Esto es debido a que, en condiciones de déficit, el suelo aún tiene agua retenida a altas presiones, la cual le genera un gran gasto energético a la planta para su extracción. De otro lado, en condiciones de exceso de humedad y alcanzando su grado extremo la saturación total de los poros del suelo, la planta cesa toda actividad fisiológica al no poder realizar intercambios con el suelo a través de sus raíces. De esta manera, los aumentos en los periodos de exceso de humedad generan la mayor amenaza para la producción agrícola, siguiendo en orden de importancia el aumento en la frecuencia y, por último, la intensidad del evento. Dicho esto, para los casos analizados, el escenario más húmedo genera rachas húmedas de mayor duración en relación con las observadas en el periodo histórico en todos los sistemas a excepción de la cuenca alta del río San Jorge, Ayapel y el costado occidental de la parte baja del mismo río. Inclusive para la subunidad Tacamocho, en el hidrosistema Depresión Momposina, se presenta aumento de la amenaza de tipo muy alta en los tres atributos duración-intensidad-frecuencia. En suma, el escenario más húmedo genera condiciones de mayor amenaza para la producción agrícola en comparación con el escenario más seco.

4.3. Conclusiones

- Los resultados de modelación hidrológica y los ejercicios derivados del componente climático permitieron generar respuestas hidrológicas consistentes para eventos más secos y más húmedos. La caracterización permitió identificar claras diferencias entre las distintas tipologías de las unidades hidrográficas, cuencas montañosas y planicies de inundación bajo los distintos escenarios climáticos propuestos.
- El servicio de provisión de alimentos por cultivos, de acuerdo con el índice SPEI en el escenario más húmedo, generó la mayor amenaza en general para todos los sistemas. Esto es debido a que la mayor oferta genera mayor conectividad entre las subunidades y sus corrientes, de tal forma que persistentemente las unidades de planicie están almacenando agua y por lo tanto saturando el suelo. Esta condición supone, entonces, mayor sensibilidad a la generación de excesos de humedad, los cuales, según los resultados, son más intensos, de mayor duración y, en algunos casos, más frecuentes. En el caso de la pesca, las subunidades con mayor grado de amenaza son Zapatosa, Brazo del Rosario, Brazo de Mompox y Ayapel en el sistema Depresión Momposina, las ciénagas de El Llanito y San Silvestre, y las planicies inundables del bajo Nechí por disminución de los caudales extremos bajos.
- El servicio de abastecimiento de agua se ve fuertemente amenazado en los sistemas Depresión Momposina y El Llanito y San Silvestre. En menor medida, la parte media y alta del río Nechí por disminución de la oferta, y el río Otún por aumento de los valores extremos máximos.
- En algunos casos, como, por ejemplo, el servicio de control de inundaciones, es necesario hacer claridad sobre el elemento objeto de riesgo. Aquí, el servicio de «control de inundación» es ejercido por la planicie de inundación, la cual amortigua los volúmenes que ingresan al momento de la ocurrencia de las inundaciones sobre las planicies. Así pues, para verificar la prestación de dicho servicio, se deben mantener las relaciones directas entre el caudal y el volumen de inundación.
- En el caso de los servicios culturales, los cambios más significativos se dan en la ciénaga de Zapatosa, cuenca alta-media del río Nechí y ciénagas El Llanito y San Silvestre para los escenarios más seco y más húmedo; mientras que la cuenca del río Otún presenta aumentos significativos de la amenaza en el escenario más seco.
- En general, las subunidades en donde mayor amenaza se genera para los escenarios tanto más seco como más húmedo son: Ciénagas El Llanito y San Silvestre, Ciénaga de Zapatosa, Cuenca media-alta del río Nechí, Ciénaga de Ayapel, Brazo del Rosario y Brazo de Mompox.

Capítulo 5

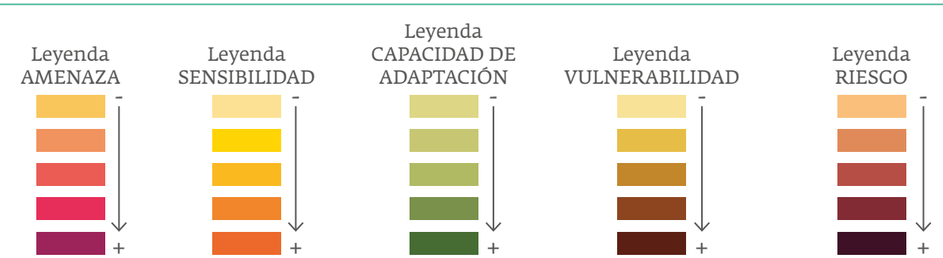
Resultados del análisis de la vulnerabilidad y el riesgo al cambio climático a la luz de los servicios ecosistémicos en las planicies inundables de la cuenca del río Magdalena

Diana Carolina Useche Rodríguez, Andrés Carvajal, Patricia Cuervo, Juanita González Lamus, Héctor Angarita, Carlos Rogéliz

El presente capítulo presenta los resultados obtenidos, a partir de los cuatro servicios ecosistémicos priorizados, para cada uno de los sistemas socioecológicos analizados en los cuatro hidrosistemas, en los dos escenarios climáticos evaluados (más húmedo y más seco)[10].

Se presentan para cada hidrosistema los mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo en cada escenario evaluado. Cada uno de los mapas tiene una escala de color, donde la intensidad indica mayor magnitud relativa en el resultado del componente evaluado. Por ejemplo, la capacidad de adaptación se mide en escalas de verdes. Entre más intenso u oscuro el color verde, mayor capacidad de adaptación presenta el sistema socioecológico, como se observa en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Leyendas de colores de cada uno de los componentes de riesgo utilizados en esta investigación



Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que todos los sistemas socioecológicos estudiados en esta investigación presentan algún grado de vulnerabilidad y riesgo, y que este puede ser mayor o menor en comparación con los demás sistemas del mismo hidrosistema; los colores menos intensos o más claros no significan que el sistema en cuestión no requiera la implementación de medidas de adaptación, sino que, comparativamente, hay otros sistemas que requieren acciones de inmediato.

Si el lector quiere conocer cuáles fueron los indicadores que influyeron en la sensibilidad de los sistemas de manera específica, puede dirigirse a los anexos. Allí encontrará una tabla donde se indica la contribución de cada indicador para cada sistema estudiado a la sensibilidad socioecológica y la capacidad de adaptación.

[10] Los escenarios utilizados «más seco» y «más húmedo» hacen referencia a un clima futuro más seco o más húmedo respecto a la condición histórica, debido al cambio climático (en este caso, debido a los escenarios de cambio climático utilizados); lo que genera un cambio en la dinámica hidrológica, evidenciado en los indicadores de amenaza utilizados.

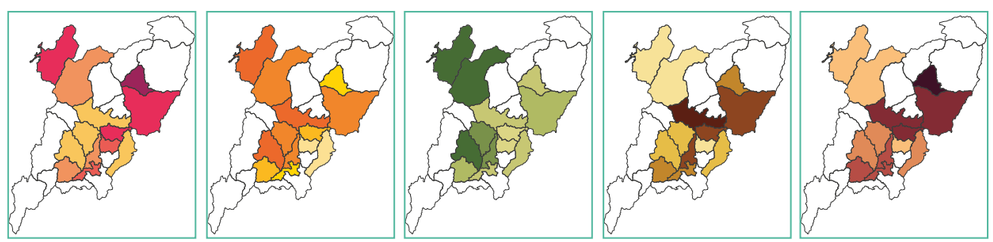
5.1. Hidrosistema Depresión Momposina

5.1.1. Escenario climático más húmedo

A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema de la Depresión Momposina en un escenario climático más húmedo (Tabla 5.1).

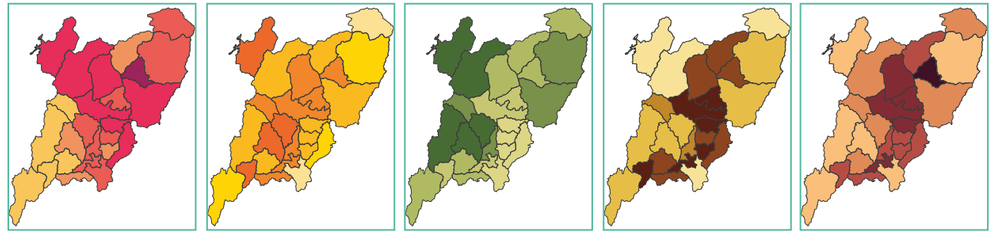
Tabla 5.1. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema Depresión Momposina en un escenario climático más húmedo

Control de inundaciones



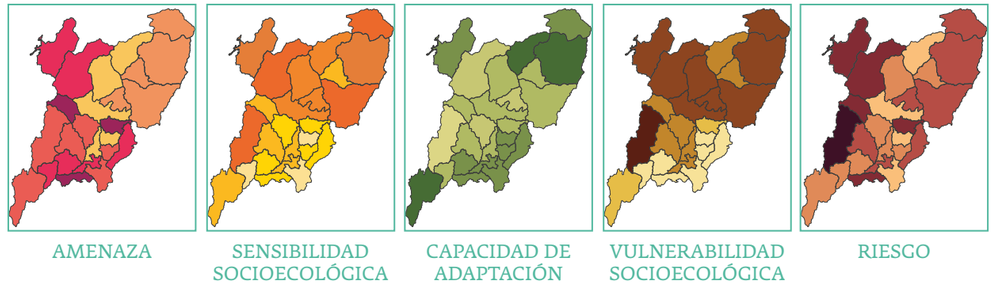
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Abastecimiento de agua



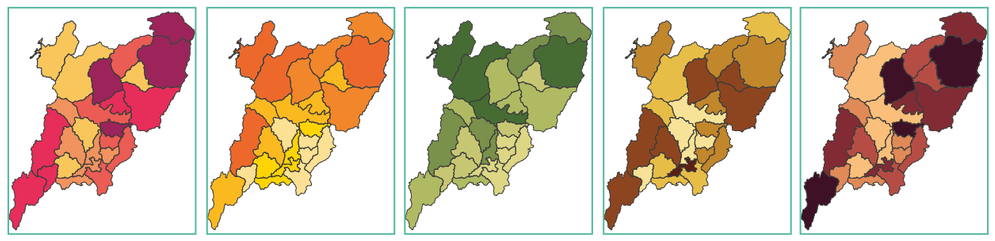
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Provisión de alimentos (cultivos)



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Servicios culturales



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

En un escenario climático más húmedo, los sistemas socioecológicos con mayor riesgo de verse afectados negativamente en la Depresión Momposina son Ariguaní Bajo, Brazo de Mompox, Brazo de Loba y Zapatosa, en lo que concierne al control de inundaciones. Lo mismo sucede con los mencionados junto con San Antonio, Santa Ana y San Fernando en lo que se refiere al abastecimiento de agua. Con respecto a la provisión de alimentos asociados a cultivos, se ven afectados negativamente Sahagún, Tacamocho, San Benito Abad, Brazo de Loba, Canal del Dique y Caucasia. Por último, los sistemas Santa Ana, Cesar Valle, San Jorge Alto y Brazo de Loba fueron los sistemas con mayor riesgo de verse afectados en cuanto a los servicios culturales en un escenario climático más húmedo.

Mensajes clave

Depresión Momposina - Escenario climático más húmedo

1 Para reducir el riesgo en los sistemas socioecológicos en la Depresión Momposina en un escenario climático más húmedo, se requiere implementar acciones a escala de la macrocuenca Magdalena-Cauca bajo un enfoque de derechos y de gestión integrada del recurso hídrico. En otras palabras, la ejecución de medidas o acciones de restauración y rehabilitación de ecosistemas encaminadas a mejorar y fortalecer el servicio ecosistémico de regulación hidrológica, no sólo debe implementarse dentro de la Depresión Momposina, sino también en la parte alta y media de la cuenca bajo un enfoque que considere el derecho del agua, para realmente tener un efecto positivo en las planicies inundables de este hidrosistema.

2 En el análisis de los servicios de control de inundaciones y abastecimiento de agua, los indicadores relacionados tanto con la cobertura vegetal natural —como son la transformación de humedales y el índice de proximidad entre parches de cobertura natural— como con el conflicto de uso del suelo desempeñaron un papel fundamental para explicar la sensibilidad ecológica de los sistemas. Por esta razón, implementar medidas para revertir la fragmentación y la pérdida de bosques, y resolver el conflicto de uso del suelo son imperativas para disminuir la sensibilidad socioecológica y, por ende, su vulnerabilidad. Realizar acciones de restauración de bosques riparios es esencial también para contrarrestar la erosión del suelo y los aportes de sedimentos a los cuerpos de agua, con el fin de reducir riesgos de abastecimiento de agua en un escenario más húmedo, pues las bocatomas se ven afectadas por el arrastre de altas cantidades de sedimentos en época de lluvias.

3 El indicador de población rural pobre fue un indicador clave para explicar la sensibilidad socioecológica de los sistemas en la provisión de alimentos por cultivos en un escenario climático más húmedo. Efectivamente, la población rural más pobre es más vulnerable debido a que depende de los servicios que le brinda la naturaleza, por lo que es la más afectada por las transformaciones de los ecosistemas; situación que se puede ver exacerbada por el cambio climático. Por tal motivo, es apremiante desarrollar acciones que apoyen la asistencia y capacitación técnica de las comunidades rurales en condiciones de pobreza, así como las buenas prácticas de protección, conservación de suelos, la protección de fuentes de agua y la agroecología, entre otras medidas. Esto contribuiría a la reducción de la vulnerabilidad y a aumentar la resiliencia del territorio ante los efectos e impactos de la variabilidad y cambio climático. De igual modo, se estaría contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en especial, al cumplimiento del objetivo 1: *Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo*; el objetivo 2: *Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible* y el objetivo 3: *Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. Muchas de estas poblaciones que viven en condiciones de pobreza son las que cuentan con el «saber ser» y «saber hacer» reconocido hoy como patrimonio cultural inmaterial, lo cual debe ser considerado a la hora de implementar las medidas de adaptación.

4 Es clave que los actores institucionales y privados que están en este territorio implementen y promuevan acciones para reducir la sensibilidad de los sistemas dulceacuícolas. Reconvertir los sistemas productivos incrementando la cobertura vegetal, recuperar prácticas sostenibles de trashumancia y reconocer los espacios del agua permitirá reducir el riesgo al cambio climático.

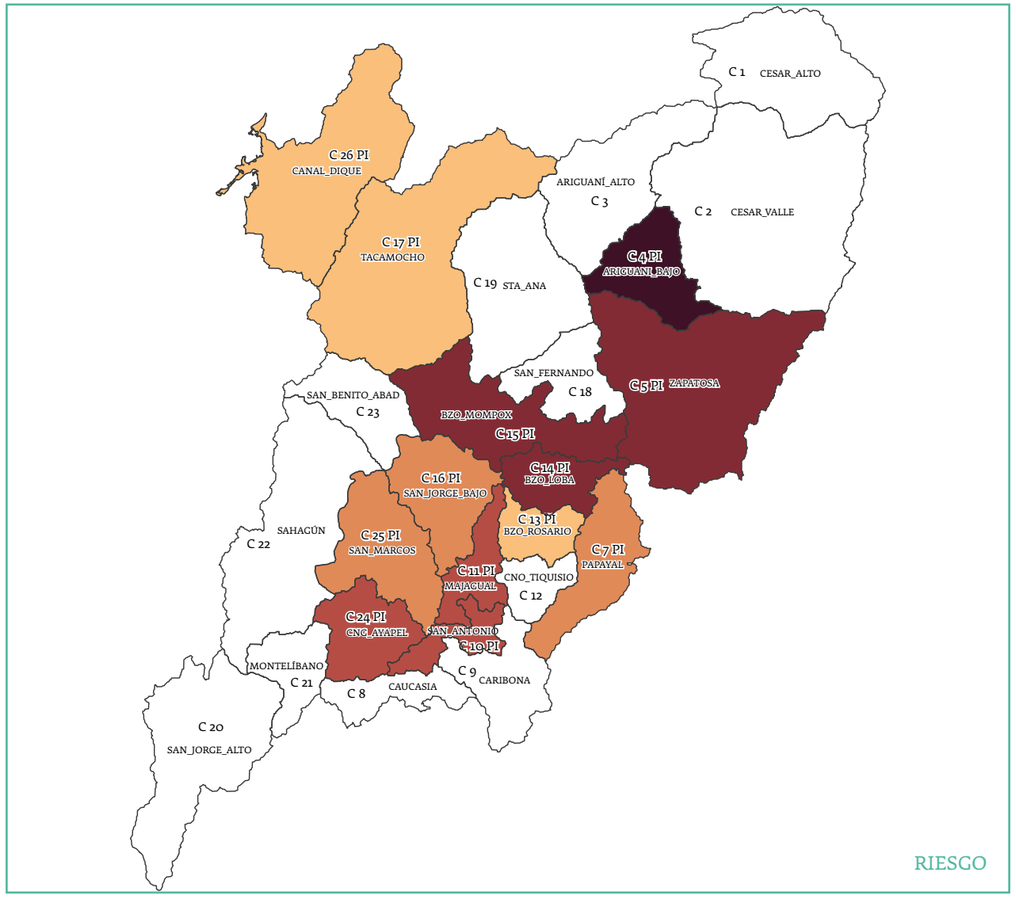
5 La Depresión Momposina es un territorio donde los modos de vida de las comunidades locales están estrechamente vinculados con la dinámica hidrológica y la biodiversidad de los humedales, lo que ha dado lugar a una cultura anfibia, en donde, históricamente, pueblos indígenas y afrodescendientes se han adaptado a los cambios en la dinámica hidrológica y climática. Sin embargo, las transformaciones ambientales que ha sufrido el territorio en los últimos tiempos han incrementado la sensibilidad de los ecosistemas y la vulnerabilidad de los modos de vida de estos pueblos. En consecuencia, se requieren acciones urgentes y concretas en relación con la protección, conservación, restauración y rehabilitación de zonas de importancia pesquera. De igual manera, la recuperación de artes de pesca tradicionales y los acuerdos sociales en torno a la pesca son un imperativo para mantener manifestaciones culturales asociadas con esta actividad, tales como: el festival del bocachico, el festival de la atarraya, entre otros. Asimismo, urge tomar medidas para la resolución de conflictos de uso del suelo y de estrategias intergremiales importantes para prevenir y mitigar los suelos degradados por erosión.

6 El empoderamiento de las comunidades y la organización y gobernanza del territorio contribuyen a una mejor respuesta, prevención y adaptación a la variabilidad y cambio climático, siempre y cuando se reconozca el «saber hacer» y el «saber ser» de las comunidades, se salvaguarde el legado cultural de los pueblos indígenas y afrodescendientes, y se promueva la participación efectiva de las comunidades en la identificación, ejecución, evaluación y monitoreo de las medidas de adaptación. En consecuencia, un gran reto en términos de adaptación para las instituciones y organizaciones indígenas, afrodescendientes y campesinas es establecer ese diálogo de saberes y materializarlo en acciones concretas armónicas con la naturaleza, en donde se tengan en cuenta los cambios del clima bajo un enfoque de prevención y sostenibilidad, que comprometa a las partes a velar por el funcionamiento, mantenimiento y sostenibilidad de esas medidas en el tiempo y en el espacio. Un punto de encuentro podrían ser los sistemas de alerta temprana participativa, así como las redes de custodio de semilla y las huertas y patios productivos resilientes o agroecológicos, entre otros.

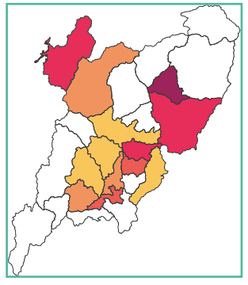
7 La Depresión Momposina se destaca por la existencia de un patrimonio cultural expresado en unos bienes de interés cultural material e inmaterial, incluyendo sitios arqueológicos que recogen el saber local y ancestral de los pueblos que la habitan, los cuales, como lo ha expresado la Unesco (2009), pueden verse afectados por los efectos e impactos de la variabilidad y cambio climático. Por esta razón, es necesario darle la importancia que se merece al patrimonio cultural y su relación con el cambio climático, tanto en la investigación como en su inclusión en el ordenamiento territorial, planes de la gestión del riesgo y seguimiento en los Planes Especiales de Salvaguarda (PES). Esto no solo contribuirá a preservar, conservar, mantener, proteger y salvaguardar el patrimonio cultural material e inmaterial, sino a optimizar recursos y potenciar saberes y acciones.

5.1.1.1. Mapas escenario climático más húmedo

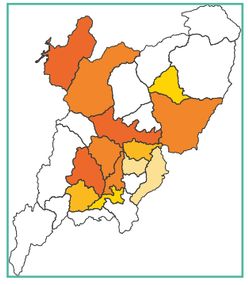
Control de inundaciones



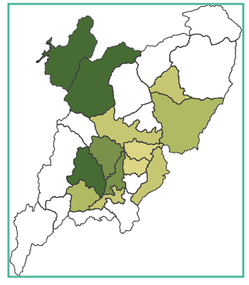
RIESGO



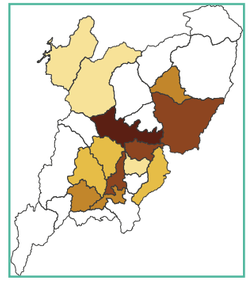
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

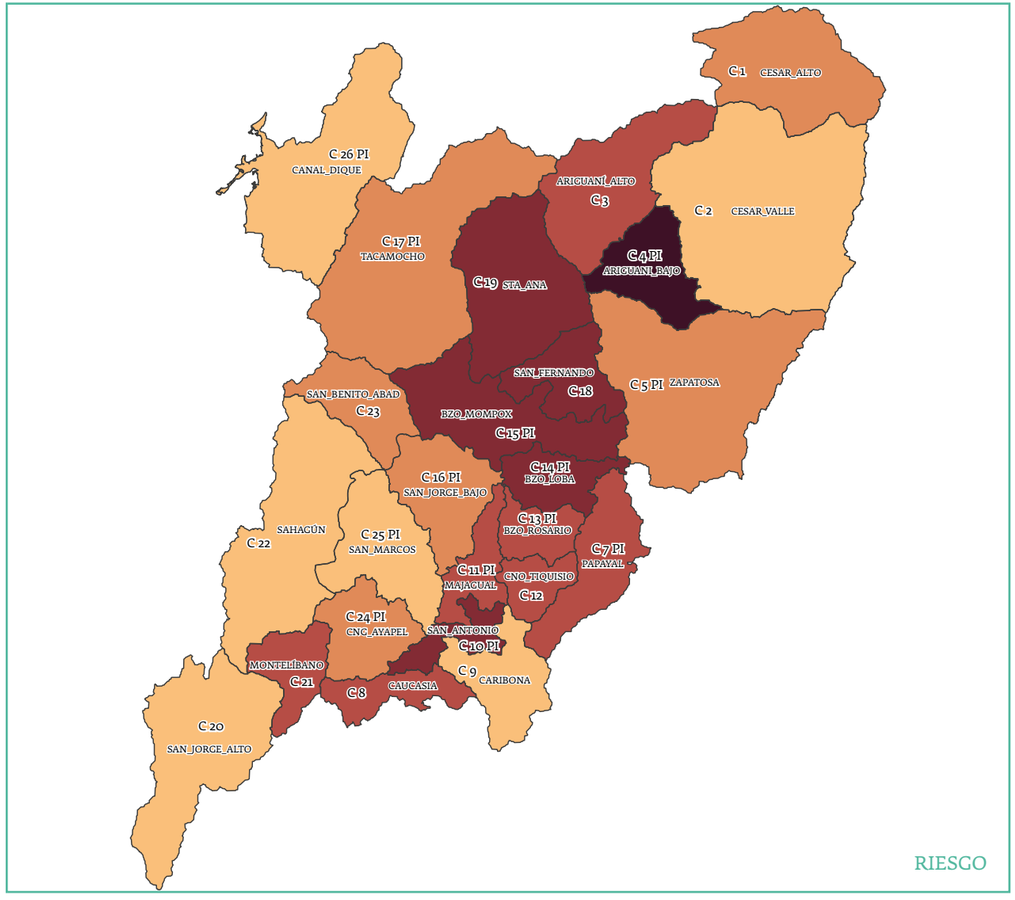


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

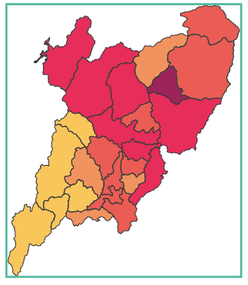


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

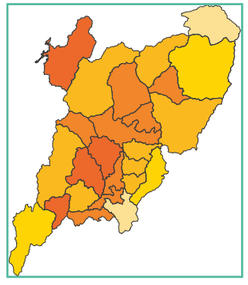
Abastecimiento de agua



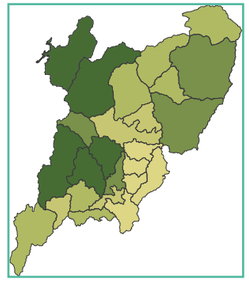
RIESGO



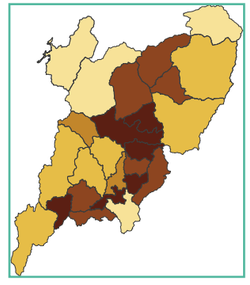
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

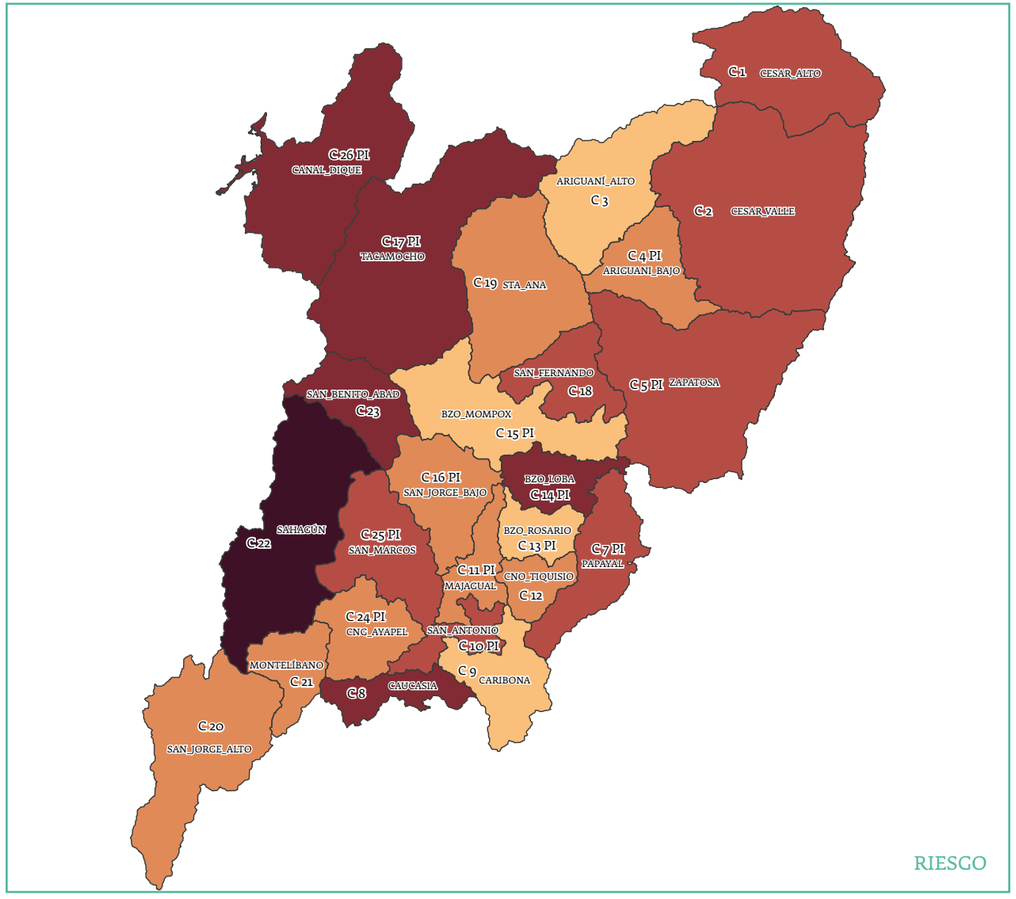


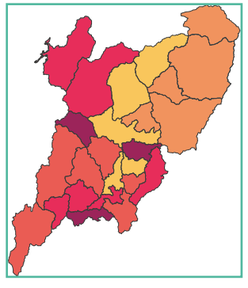
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



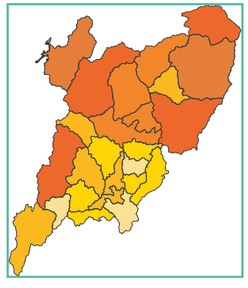
VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

Provisión de alimentos (cultivos)

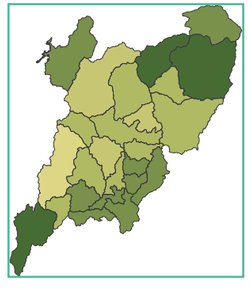




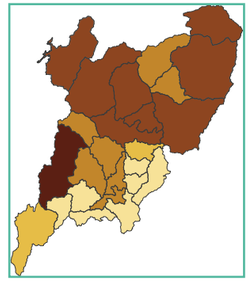
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

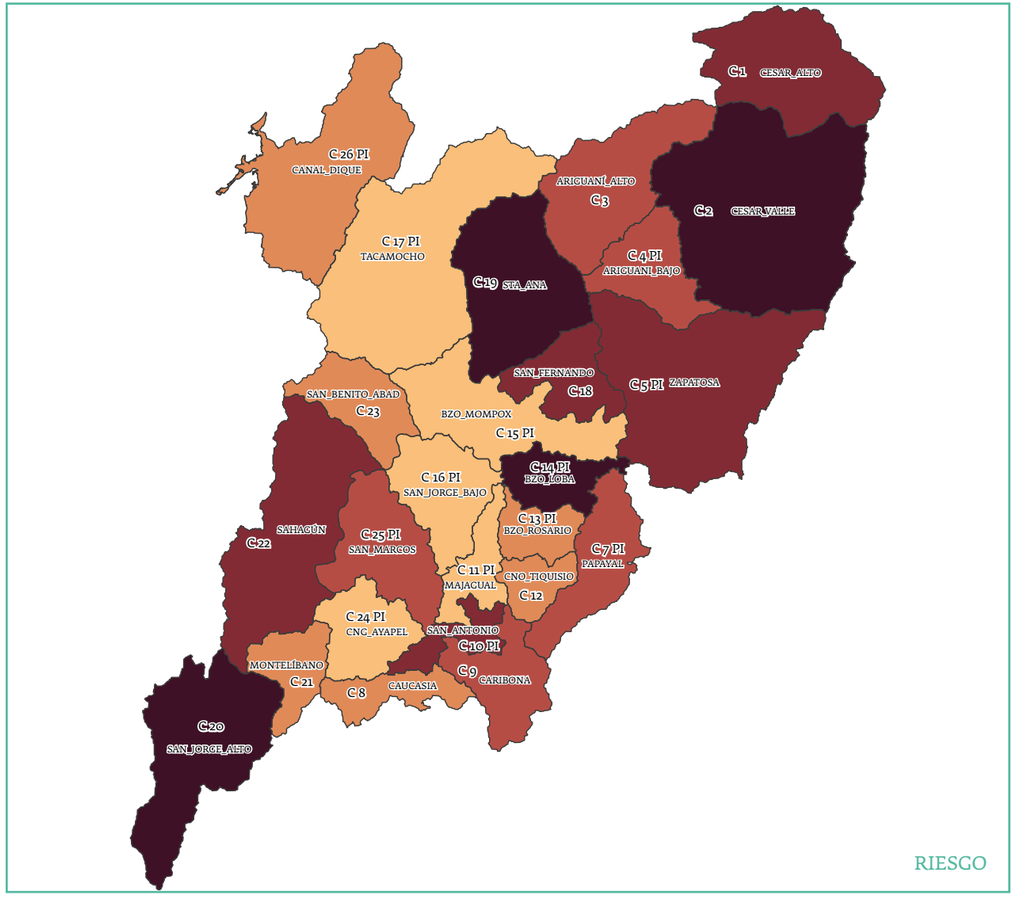


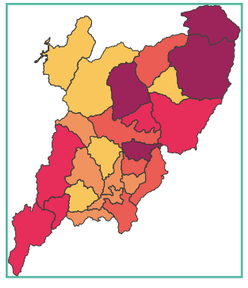
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



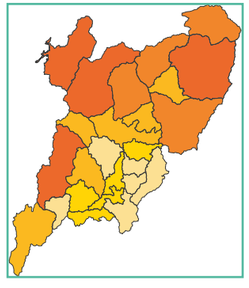
VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

Servicios culturales

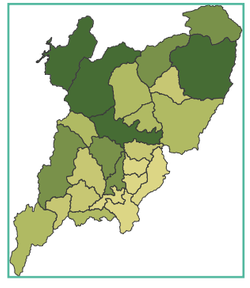




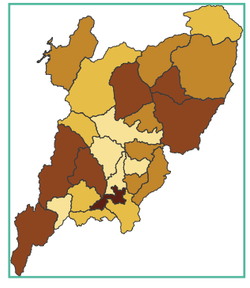
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



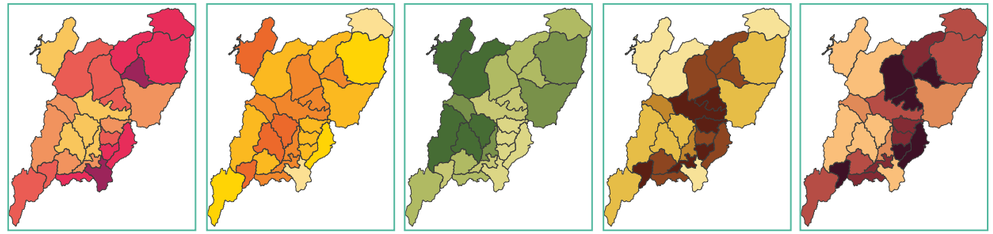
VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

5.1.2. Escenario climático más seco

A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema de la Depresión Momposina en un escenario climático más seco (Tabla 5.2).

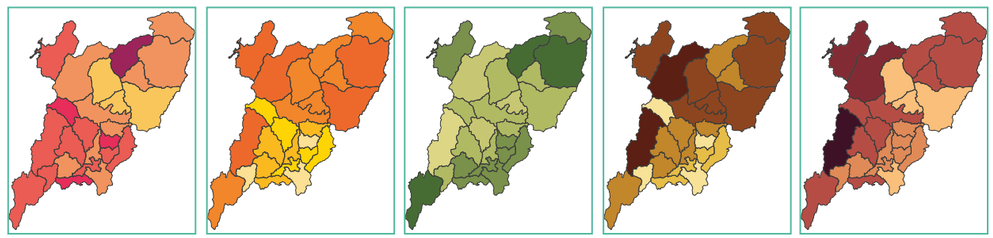
Tabla 5.2. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema Depresión Momposina en un escenario climático más seco

Abastecimiento de agua



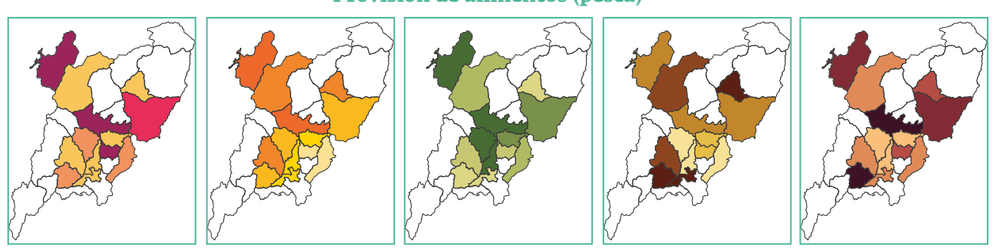
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Provisión de alimentos (cultivos)



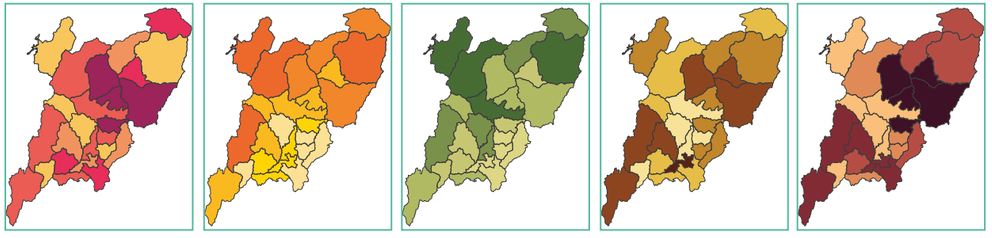
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Provisión de alimentos (pesca)



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Servicios culturales



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

En un escenario climático más seco, los sistemas socioecológicos con mayor riesgo de verse afectados negativamente en la Depresión Momposina en cuanto al abastecimiento de agua son CNO Tiquisio, San Fernando, Santa Ana, Montelíbano, Ariguaní Bajo y Papayal. En relación con la provisión de alimentos asociados a cultivos, los sistemas Sahagún, Tacamocho y Canal del Dique fueron los que presentaron mayor riesgo de verse afectados negativamente. Mientras que Ciénaga de Ayapel y Brazo de Mompox fueron los sistemas socioecológicos con mayor riesgo de verse afectados en lo que se refiere a la provisión de alimentos asociados a la pesca. Los sistemas socioecológicos de Santa Ana, Brazo de Loba, Zapatosa, San Fernando y Ariguaní Bajo presentan los valores más altos de riesgo en lo concerniente a los servicios culturales.

Mensajes clave

Depresión Momposina - Escenario climático más seco

1. En un escenario climático más seco, hay mayor número de sistemas socioecológicos con posibilidad de verse afectados negativamente en comparación con un escenario más húmedo. Por tanto, medidas para mejorar y reforzar los servicios ecosistémicos de regulación climática e hidrológica son urgentes a escala local y de macrocuenca para disminuir el riesgo de los sistemas de la Depresión Momposina.

2. Para mantener el servicio de abastecimiento de agua y reducir riesgos asociados a escenarios climáticos más secos, se deben implementar medidas de restauración y rehabilitación de esositemas en la cuenca alta y media del río Magdalena y el río Cauca. Además, se deben implementar acciones locales para mejorar la cobertura natural y la conectividad entre parches de cobertura natural, y para reducir el conflicto de uso del suelo. Asimismo, fortalecer todos los programas relacionados con prácticas de protección de fuentes de agua en zonas rurales, así como implementar medidas de recolección de agua lluvia, contribuye a reducir la sensibilidad socioecológica ante un escenario climático más seco.

3 Según lo que indican los mapas del servicio de provisión de alimentos asociados a cultivos, se requiere de acciones que contribuyan a fortalecer a la población rural, ya que la pobreza fue el indicador que más determinó la sensibilidad socioecológica de los sistemas estudiados. De igual forma, para ayudar a reducir la sensibilidad socioecológica de los sistemas en un escenario climático más seco, son urgentes acuerdos de trabajo intergremiales para incrementar las coberturas naturales en paisajes agroecológicos —mediante la transformación de sistemas productivos— y reducir el conflicto de uso del suelo en áreas agrícolas, y, especialmente, estrategias para reducir los suelos degradados por erosión. Por último, un esfuerzo clave para reducir la vulnerabilidad es fortalecer las asociaciones de agricultores, para así mejorar la capacidad adaptativa y de respuesta de las comunidades a un escenario climático más seco.

4 Frente a la provisión de alimentos asociados a la pesca, la transformación de humedales fue el indicador que más determinó la sensibilidad de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco. Medidas de restauración de humedales, así como la protección de zonas de cría y reproducción de peces son urgentes de implementar, especialmente en Ciénaga de Ayapel y Brazo de Mompox, además del complejo de humedales de la Zapatosa y el canal del Dique. También se deben implementar medidas para la transformación del pescado y su comercialización, así como para el fortalecimiento de asociaciones y grupos de mujeres que realizan estas actividades, para contribuir así en la reducción de la vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos al cambio climático.

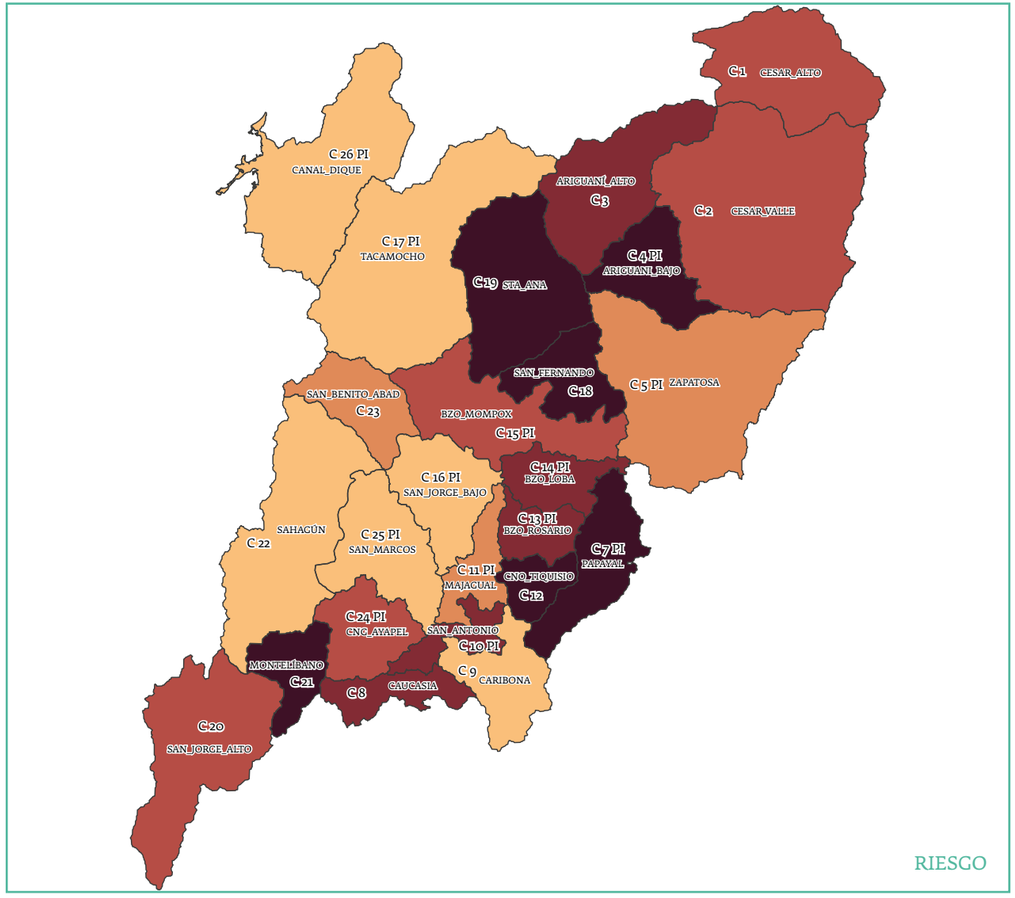
5 Las comunidades del complejo de humedales de Zapatosa, junto con los sistemas ubicados sobre el río Magdalena, tienen una fuerte fusión de sus culturas con los paisajes o mosaicos cenagueros donde habitan. En un escenario climático más seco, las manifestaciones culturales, así como las prácticas tradicionales en torno a la pesca, se pueden ver impactadas negativamente por la afectación del recurso pesquero. Por tanto, acuerdos comunitarios e institucionales del manejo del recurso pesquero, en un escenario climático de sequía, son un imperativo para que este sistema productivo sea sostenible y resiliente. Para mantener las tradiciones culturales y los modos de vida, se requiere de acciones en pro de reducir la erosión de los suelos y los conflictos de uso. Para ello, los departamentos de agricultura, desarrollo rural o desarrollo económico de los municipios y departamentos que conforman la Depresión Momposina, junto con las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), las Corporaciones Autónomas, las ONG y demás actores en el territorio, deben articular acciones para una transformación agropecuaria en estos sistemas, implementando y promoviendo prácticas productivas sostenibles. Asimismo, la articulación de trabajo con el Ministerio de Cultura y las oficinas departamentales y municipales es urgentes para implementar acciones que aporten a la reducción de la vulnerabilidad de los sitios arqueológicos (entre otros muebles e inmuebles del patrimonio inmaterial de Colombia) presentes en la Depresión Momposina.

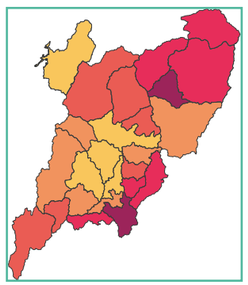
6 El fortalecimiento y la articulación del Ministerio de Cultura y las oficinas departamentales y municipales, el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) y la unidad de gestión del riesgo (UNGDR) con las organizaciones comunitarias es urgente para implementar acciones que aporten a la reducción de la vulnerabilidad de los sitios arqueológicos y de los bienes culturales muebles e inmuebles del patrimonio material e inmaterial colombiano presente en la Depresión Momposina.

7 La sinergia y fortalecimiento de redes de conocimiento, en las que se articulan instituciones, organizaciones y comunidad, es fundamental para afianzar el proceso de adaptación y aumentar la capacidad de respuesta de las instituciones y los territorios para ser más resilientes. De esta manera, se garantiza que las medidas sean más eficaces, eficientes, oportunas, culturalmente más flexibles, ambientalmente armónicas y sostenibles en el tiempo.

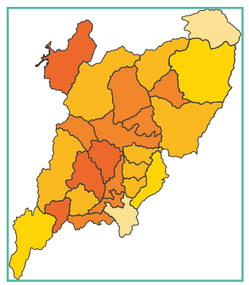
5.1.2.1. Mapas escenario climático más seco

Abastecimiento de agua

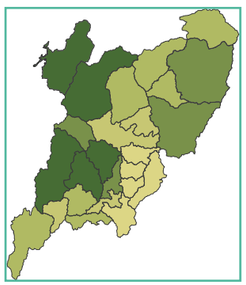




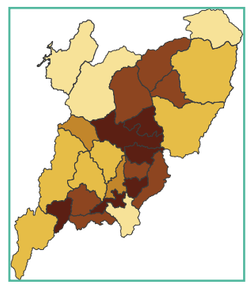
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

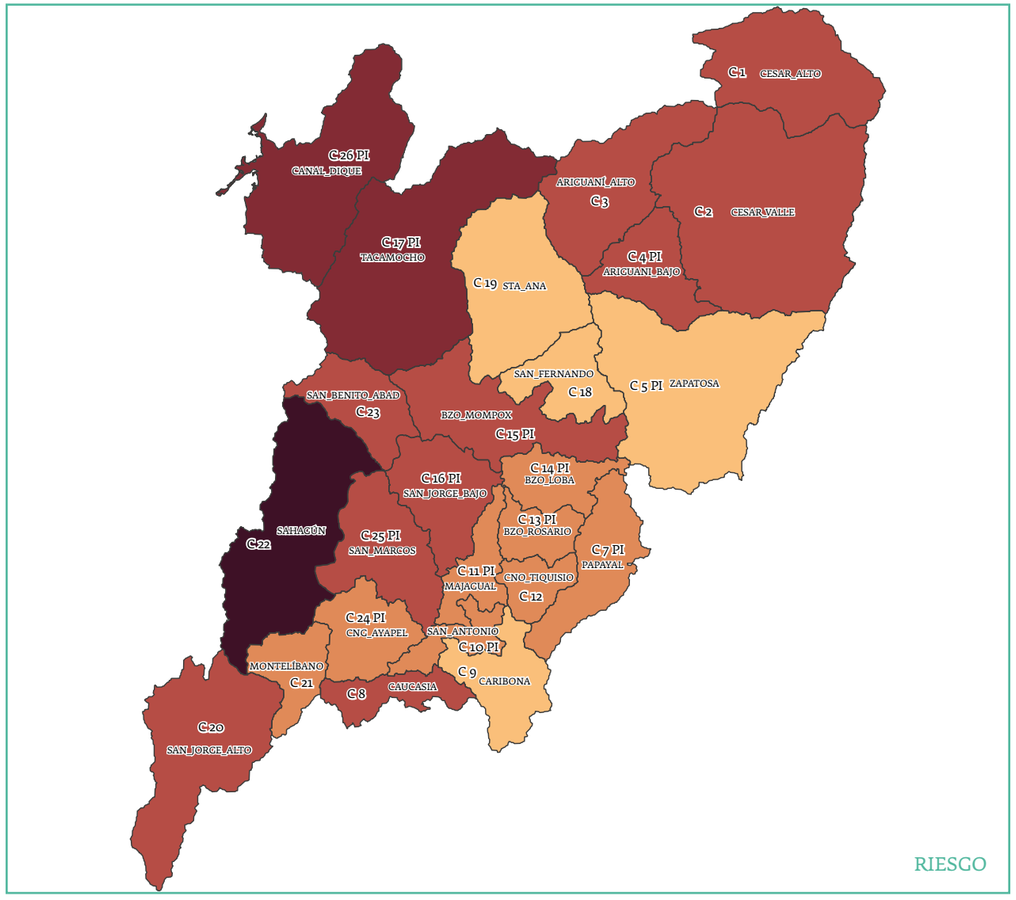


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

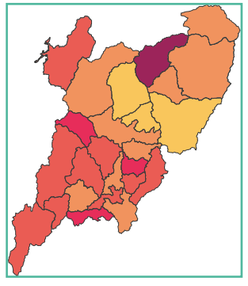


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

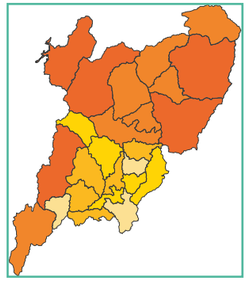
Provisión de alimentos (cultivos)



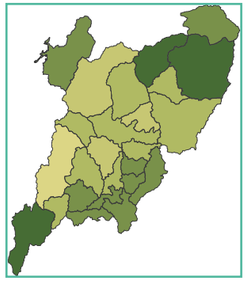
RIESGO



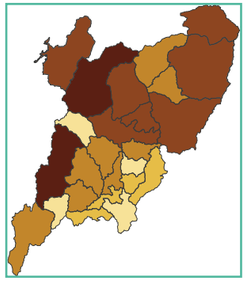
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

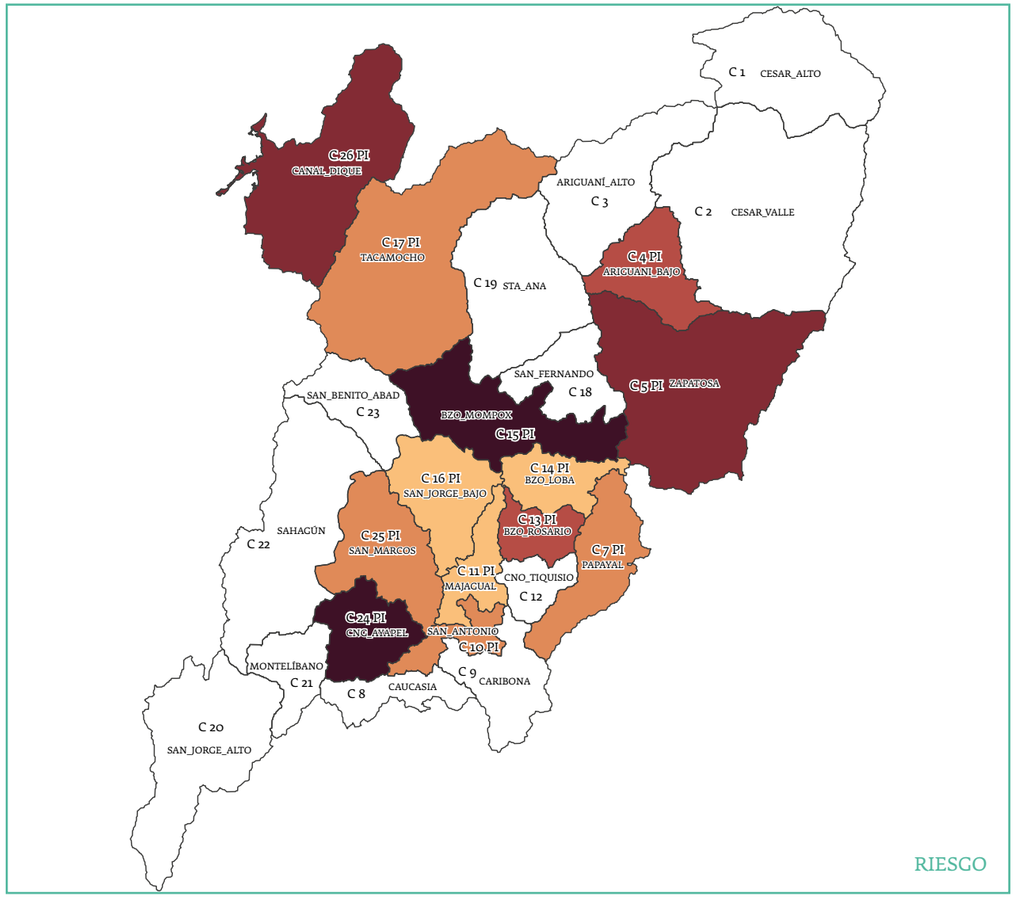


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

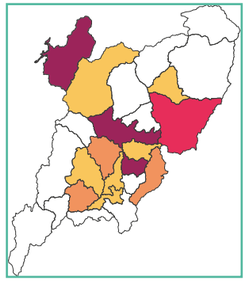


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

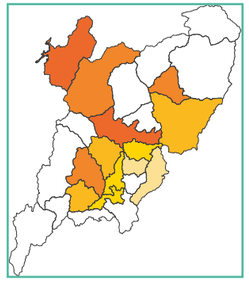
Provisión de alimentos (pesca)



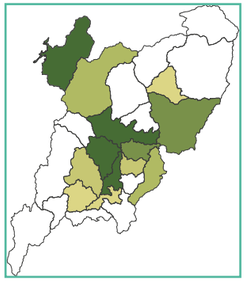
RIESGO



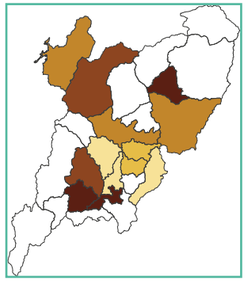
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

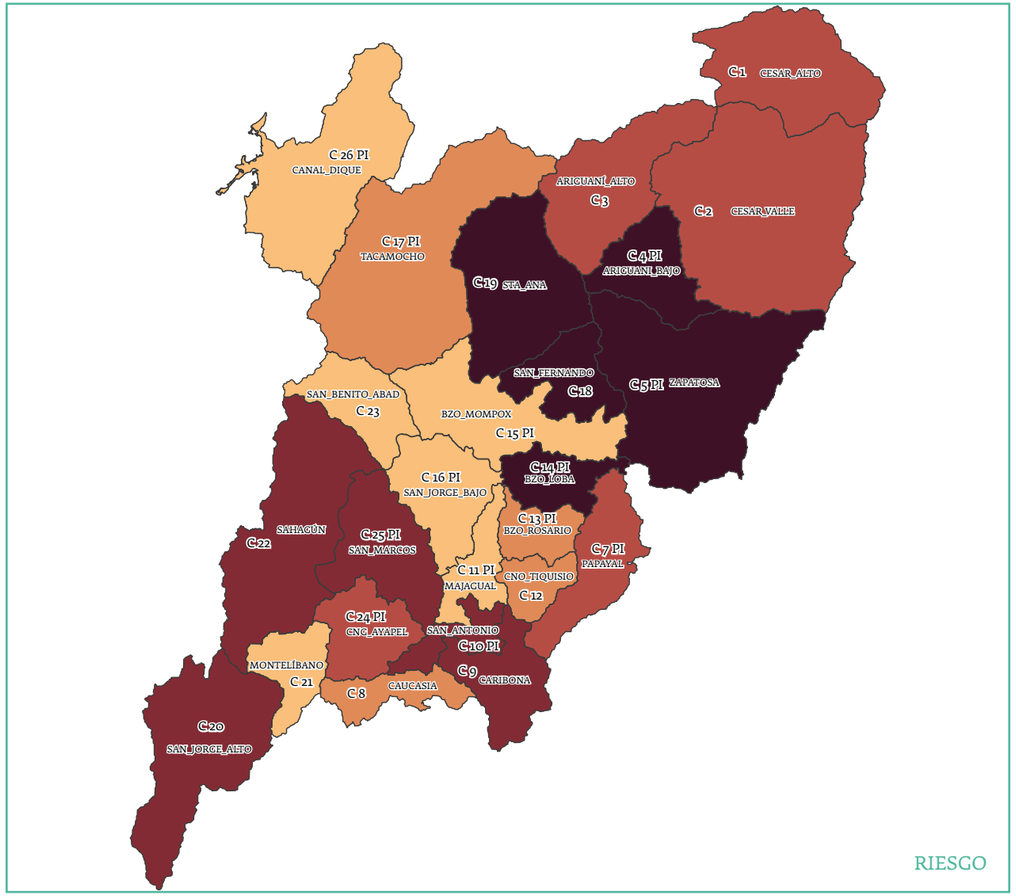


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

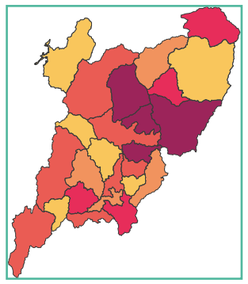


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

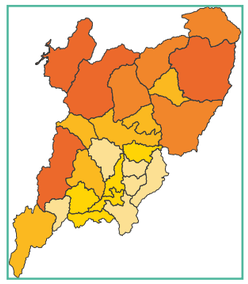
Servicios culturales



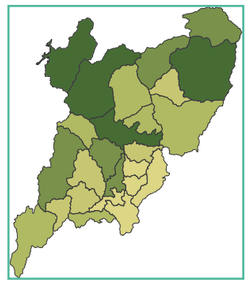
RIESGO



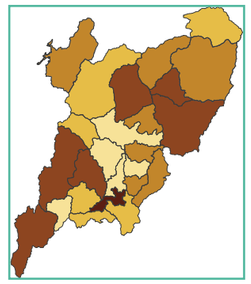
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

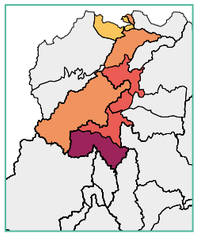
5.2. Hidrosistema Río Nechí

5.2.1. Escenario climático más húmedo

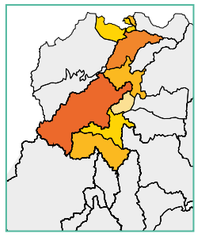
A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema del río Nechí en un escenario climático más húmedo (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema Río Nechí en un escenario climático más húmedo

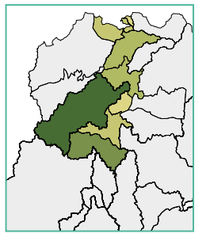
Control de inundaciones



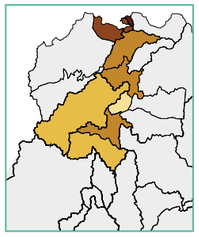
AMENAZA



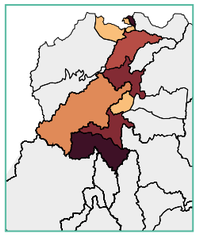
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

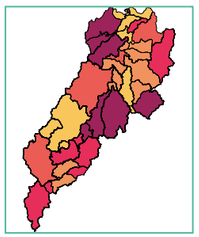


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

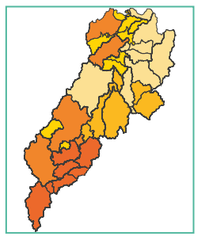


RIESGO

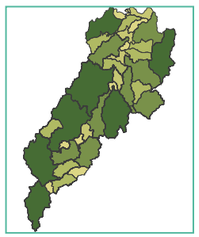
Abastecimiento de agua



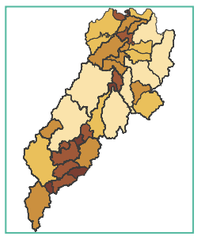
AMENAZA



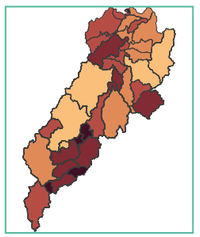
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

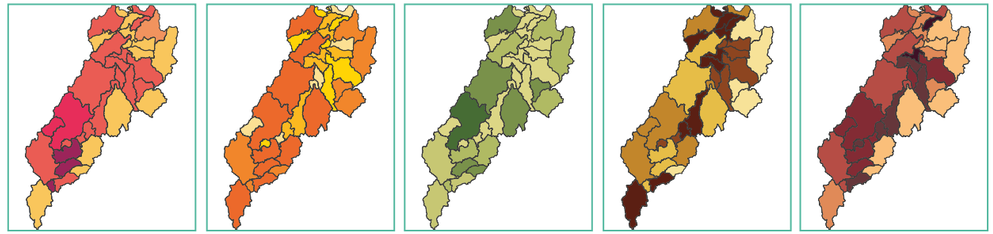


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

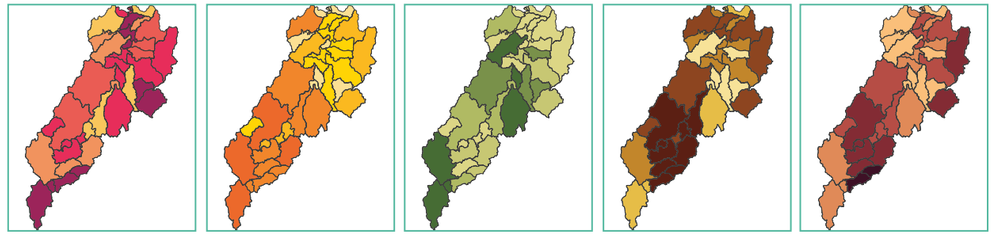


RIESGO

Provisión de alimentos (cultivos)



Servicios culturales



En un escenario climático más húmedo, los sistemas socioecológicos con mayor riesgo de verse afectados negativamente en el hidrosistema del río Nechí en lo que concierne a control de inundaciones son El Sapo y Nechí antes de Sardina. En cuanto al servicio de abastecimiento de agua los sistemas El Sapo, C_Girardota, C_Gabino, C_Guadalupe y C_Porce III fueron los sistemas con mayor riesgo. En relación con el servicio de provisión de alimentos asociados a cultivos, los sistemas C_Carlos Lleras, C_Miraflores, C_Porce III, C_Porce (abajo), Pocune, Nechí antes de Sardina, Nechí (abajo) y Santa Bárbara fueron los que presentaron mayor riesgo de verse afectados negativamente en un escenario climático más húmedo. Por último, los sistemas socioecológicos Carlos Lleras y Gabino presentan el mayor riesgo en lo que se refiere a los servicios culturales en un escenario climático más húmedo.

Los sistemas Nechí antes de Sardina, C_Gabino, C_Porce III, C_Carlos Lleras fueron los sistemas que presentaron mayor riesgo de ver afectados negativamente ante un escenario climático más húmedo varios de los servicios ecosistémicos. Por tanto, son necesarias acciones en estos sistemas para mantener la provisión de servicios ecosistémicos clave para el bienestar de los antioqueños.

Mensajes clave

Hidrosistema Río Nechí - Escenario climático más húmedo

1 Según se observa en los mapas, los servicios de control de inundaciones y abastecimiento de agua en el hidrosistema del río Nechí en un escenario climático más húmedo requieren dirigir acciones hacia la reducción de la fragmentación de coberturas naturales y el incremento de la cobertura vegetal natural en áreas con estacionalidad hidrológica. De esta manera se puede reducir la sensibilidad socioecológica. Promover las acciones planteadas en el Plan Regional de Cambio Climático de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) en relación con la implementación de medidas de adaptación basadas en ecosistemas, para fortalecer la regulación hidrológica a lo largo de gradientes altitudinales, contribuirá a reducir la vulnerabilidad y el riesgo de los sistemas socioecológicos ubicados en la parte norte del hidrosistema.

2 En cuanto al servicio de abastecimiento de agua, la atención debe centrarse particularmente en los municipios de Remedios y Segovia (sistema socioecológico denominado Estrategia 1, código C14), donde se presenta una mayor amenaza en comparación con los 32 sistemas estudiados en el hidrosistema del río Nechí. Por tanto, medidas para fortalecer la capacidad de adaptación de este sistema, así como iniciativas para reducir su sensibilidad, deben ser promovidas por los tomadores de decisiones y quienes gestionan el territorio.

3 Con respecto al servicio ecosistémico de provisión de alimentos por cultivos, el indicador relacionado con asociatividad de los productores jugó un papel clave en la capacidad de adaptación y en el riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema del río Nechí. Por tanto, medidas municipales y departamentales para incentivar, fortalecer y consolidar asociaciones de primer o segundo nivel de productores agropecuarios es perentorio. Adicionalmente, es clave que los productores (asociados o no) puedan contar con información relevante hidrometeorológica para tomar decisiones, por lo que se deben fortalecer y continuar las mesas agroclimáticas y los canales para que la información de IDEAM llegue a los productores.

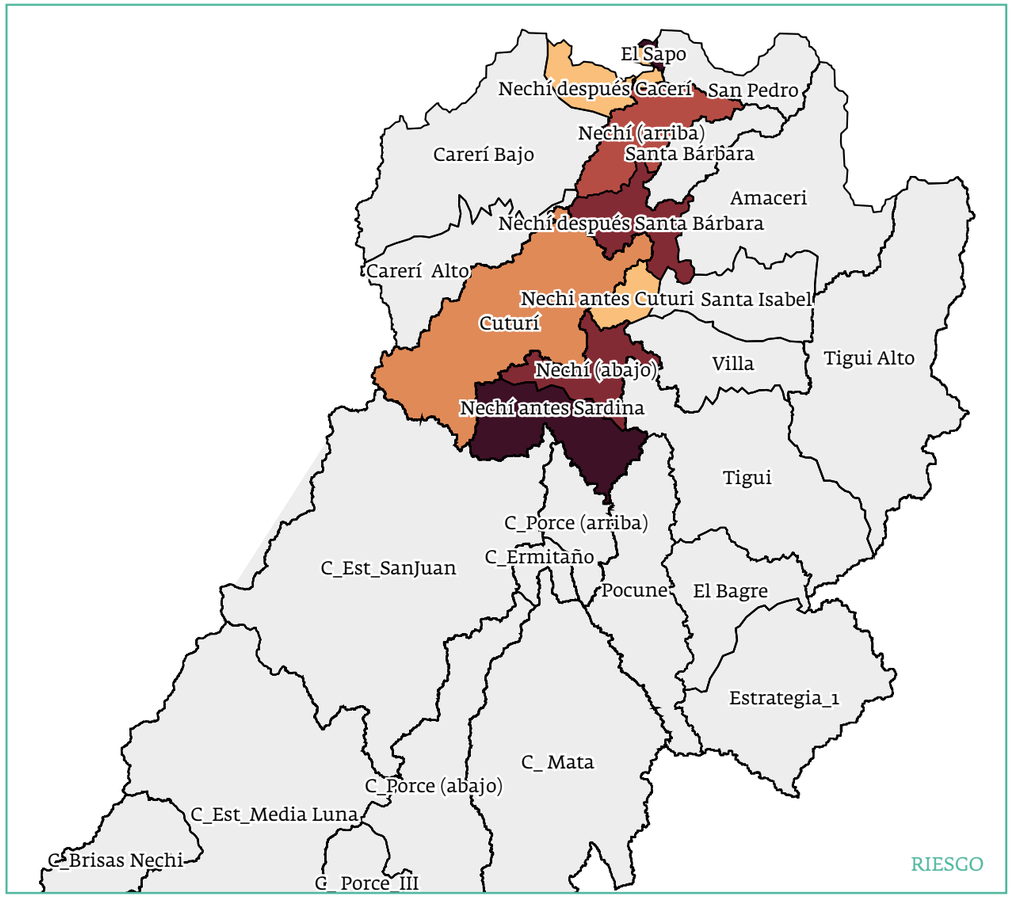
4 Se deben incrementar y fortalecer prácticas para el desarrollo productivo y ambiental territorial como, por ejemplo, medidas de protección del suelo en el desarrollo de actividades agropecuarias, restauración y rehabilitación de hábitats acuáticos y terrestres, incremento de la conectividad física y funcional de ecosistemas y otras prácticas sostenibles dentro de los sectores agropecuario y minero.

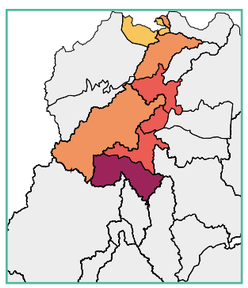
5 En cuanto a los servicios culturales, es clave la gran riqueza de especies de plantas, aves y anfibios de importancia por su uso en el hidrosistema, así como el hecho de que un gran número de Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) realizan aprovechamiento de productos del bosque natural, por lo que es necesario implementar estrategias de gestión territorial en acuerdo con las comunidades para conservar y monitorear la biodiversidad.

6 La construcción de territorios resilientes y adaptados a eventos climáticos en la cuenca del río Nechí debe incluir el fortalecimiento de la capacidad de respuesta con la implementación de acciones de conservación, restauración y producción sostenible que incorporen y reconozcan el conocimiento y saber local y ancestral de los pueblos indígenas, las comunidades negras o afrodescendientes y las organizaciones de campesinos y pescadores. En este sentido, es importante tener en cuenta y fortalecer procesos en marcha que contemplan iniciativas que pueden reforzar esa capacidad de respuesta ante posibles cambios en la dinámica hidrológica debido a eventos climáticos, procesos que, además, contemplan el empoderamiento de las comunidades.

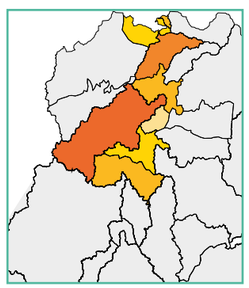
5.2.1.1. Mapas escenario climático más húmedo

Control de inundaciones

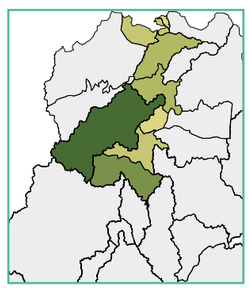




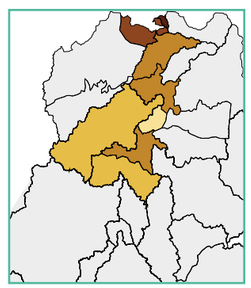
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

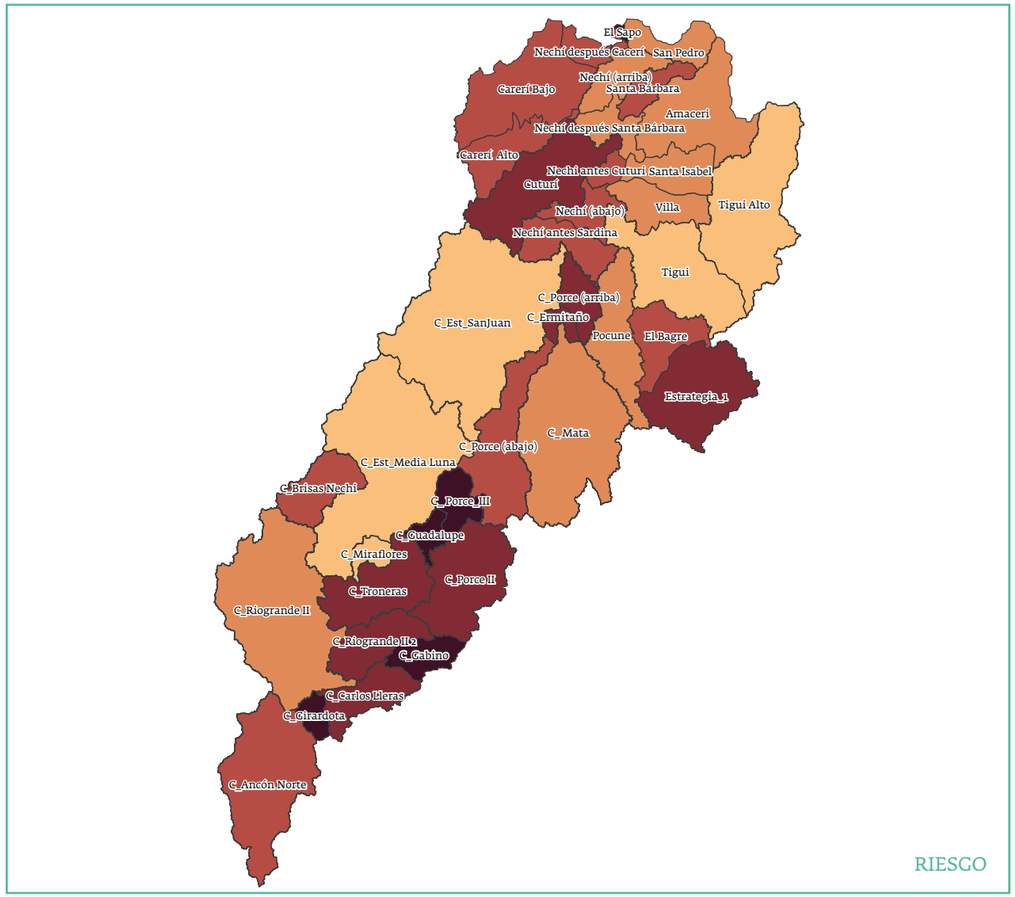


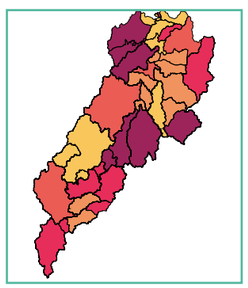
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



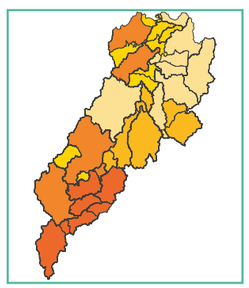
VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

Abastecimiento de agua

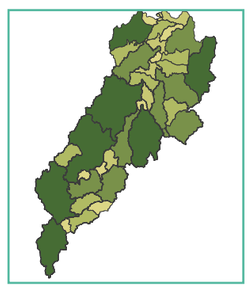




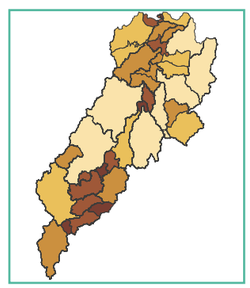
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

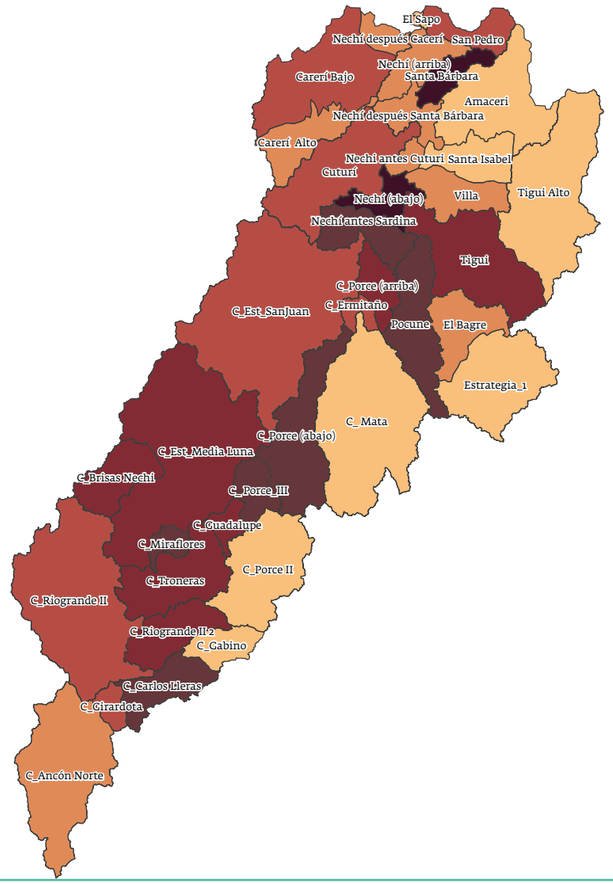


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

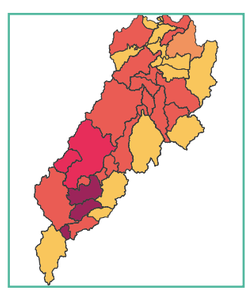


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

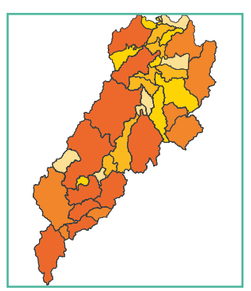
Provisión de alimentos (cultivos)



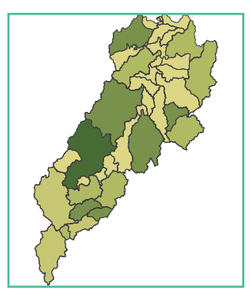
RIESGO



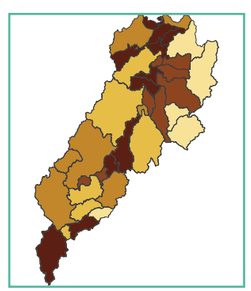
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

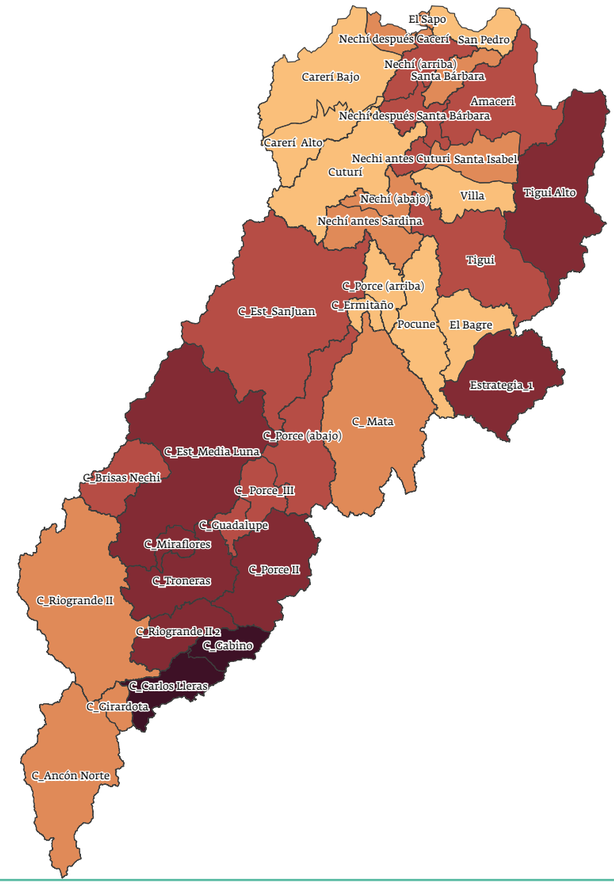


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

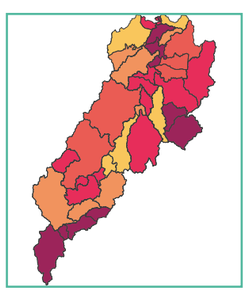


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

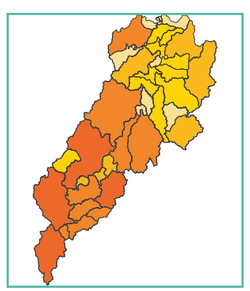
Servicios culturales



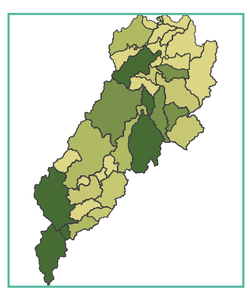
RIESGO



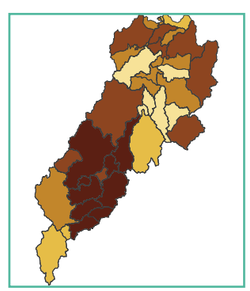
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

5.2.2. Escenario climático más seco

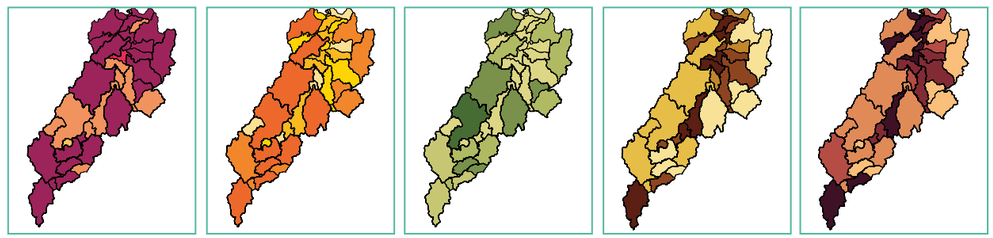
A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema del río Nechí en un escenario climático más seco (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema Río Nechí en un escenario climático más seco

Abastecimiento de agua

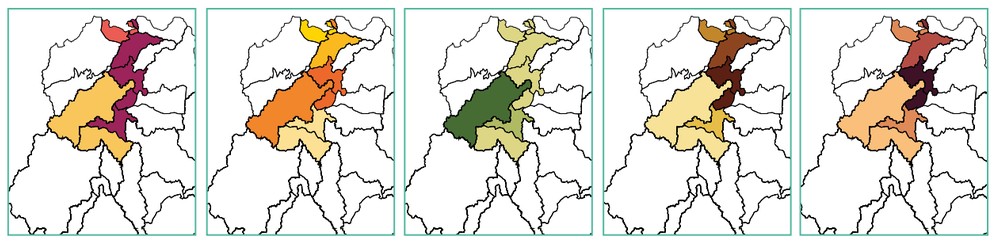
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Provisión de alimentos (cultivos)



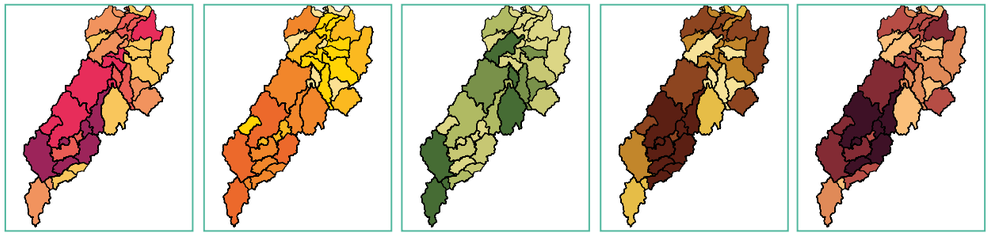
AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Provisión de alimentos (pesca)



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Servicios culturales



AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

El riesgo al cambio climático de los sistemas socioecológicos del río Nechí en lo referente al servicio de abastecimiento de agua en un escenario más seco muestra que los sistemas socioecológicos C_Girardota, C_Guadalupe, C_Carlos Lleras, C_Gabino, C_Porce III, C_Ermitaño, C_Miraflores y C_Porce (arriba) presentan el mayor riesgo. En cuanto al servicio de provisión de alimentos a través de cultivos, los sistemas socioecológicos C_Ancón Norte, C_Carlos Lleras, C_Porce III, C_Porce (abajo), Nechí (abajo), Nechí antes de Cuturí, Nechí después de Santa Bárbara, Cacerí alto, Nechí después de Cacerí y Nechí (arriba) presentan el mayor riesgo. En relación con el servicio de provisión de alimentos por medio de la pesca, los mapas muestran que Nechí después de Santa Bárbara (C30Pl) y Nechí antes de Cuturí (C29Pl) presentan el mayor riesgo a verse afectados negativamente ante un escenario climático más seco. Por último, los mapas de los servicios culturales muestran que los sistemas C_Porce II, C_Riogrande II 2, C_Porce (abajo), C_Miraflores, C_Porce III y C_Est_Media Luna presentan el mayor riesgo en este escenario.

Los sistemas C_Carlos Lleras, C_Porce III, C_Porce (abajo), Nechí después de Bárbara y Nechí (arriba) fueron los que presentaron mayor riesgo de ver afectados negativamente varios de los servicios ecosistémicos ante un escenario climático más seco. Por tanto, son necesarias acciones en estos sistemas para mantener la provisión de servicios ecosistémicos clave para el bienestar de los antioqueños.

Mensajes clave

Hidrosistema Río Nechí - Escenario climático más seco

1 En un escenario climático más seco, considerando el servicio ecosistémico de abastecimiento de agua, se deben promover medidas para reducir los conflictos de uso del suelo y la fragmentación de coberturas naturales en un gradiente altitudinal, con el fin de mejorar la regulación hidrológica del sistema. Medidas de protección y restauración de fuentes de agua son claves para reducir la sensibilidad de los sistemas. Trabajar con asociaciones, federaciones, gremios, municipios y con la red de acueductos comunitarios y demás actores para la protección y gestión comunitaria de la biodiversidad y ecosistemas es ineludible para garantizar el abastecimiento de agua en escenarios climáticos más secos.

2 En cuanto al servicio ecosistémico de provisión de alimentos asociados a cultivos, sobresale un alto número de sistemas socioecológicos con una amenaza relativa muy alta (24 de 32 sistemas estudiados). Se requiere implementar medidas para reducir el riesgo en estos sistemas. Agrosavia, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), los institutos de investigación del Sistema Nacional Ambiental (SINA), así como la UMATA, municipios, gobernación de Antioquia, entre otros, deben articularse y generar conocimiento e información de acceso libre para las comunidades locales. En este sentido, fortalecer las mesas agroclimáticas que haya creado el Ministerio de Agricultura en este hidrosistema aportará a reducir la vulnerabilidad y riesgo.

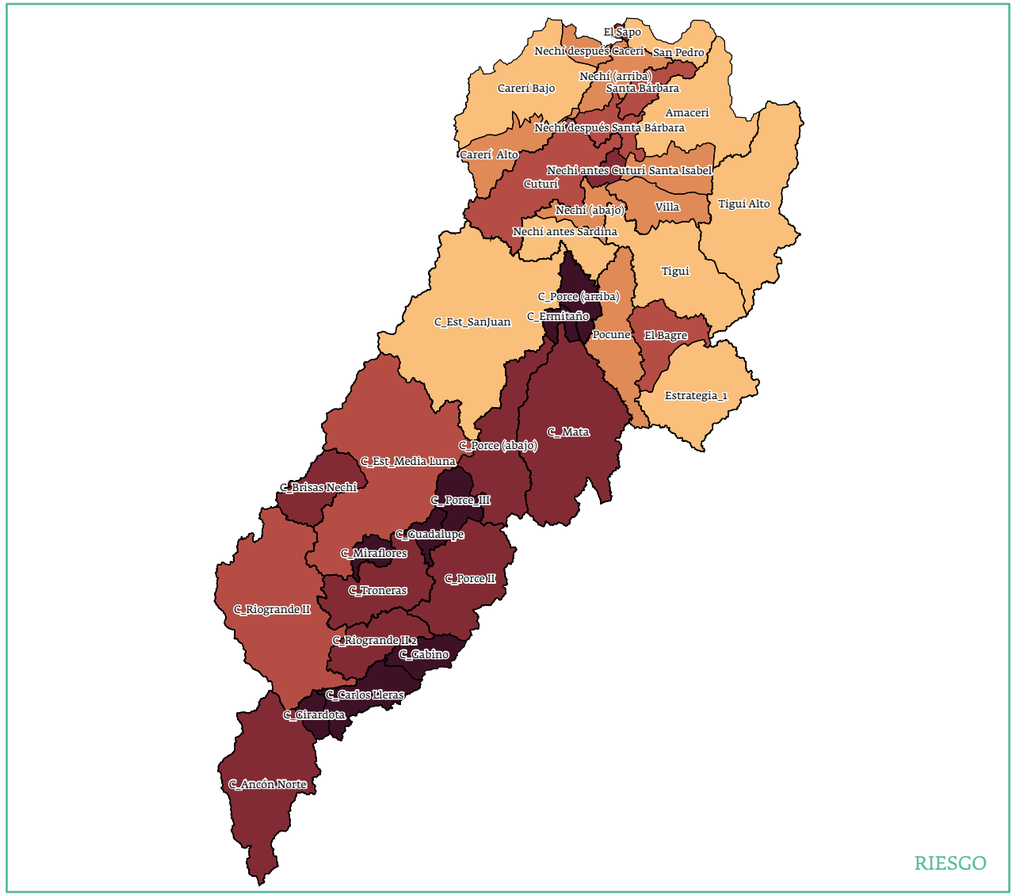
3 En relación con la provisión de alimentos asociados a cultivos, los resultados señalan que la homogeneidad de los tipos de coberturas del paisaje, el número de UPA que presentaron dificultades en el uso de agua para las actividades agropecuarias y la degradación de suelos por erosión marcaron la sensibilidad de los sistemas socioecológicos en un escenario climático más seco. Por esta razón, se deben dirigir esfuerzos y acciones para fortalecer estos temas. La voluntad política y de los actores que habitan el hidrosistema del río Nechí puede apoyar el incremento del tipo de coberturas naturales o agroecosistemas, al tiempo que la conservación y gestión de fuentes hídricas y las medidas para mitigar y contrarrestar la degradación de suelos por erosión.

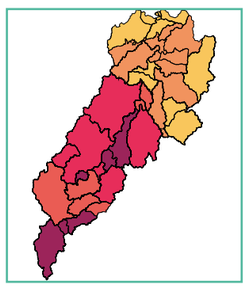
4 La restauración y rehabilitación de humedales es necesaria como medida de adaptación para garantizar la provisión de alimentos asociados a peces en las planicies inundables del hidrosistema Río Nechí. Alianzas interinstitucionales e intersectoriales son decisivas para la implementación de esta medida, que aporta a la resiliencia social y ecológica en dichos ecosistemas.

5 En el hidrosistema Río Nechí se ubican Bienes de Interés Cultural (BIC) y sitios arqueológicos de interés nacional que pueden verse afectados por el cambio climático. El trabajo mancomunado entre las asociaciones comunitarias para la gobernanza del territorio, así como las secretarías de Cultura y el Ministerio de Cultura, es necesario para salvaguardar el patrimonio cultural de Colombia en este hidrosistema. Asimismo, es clave resaltar el número de UPA que hacen aprovechamiento de productos del bosque y del páramo como flores, resinas, entre otros, por lo que es importante promover estrategias de gestión de la biodiversidad cultural como: generación de conocimiento, acuerdos de manejo, medidas de rehabilitación de hábitat, entre otras.

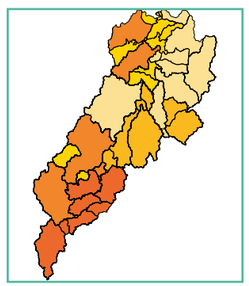
5.2.2.1. Mapas escenario climático más seco

Abastecimiento de agua

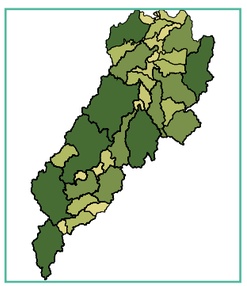




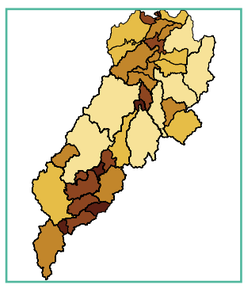
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

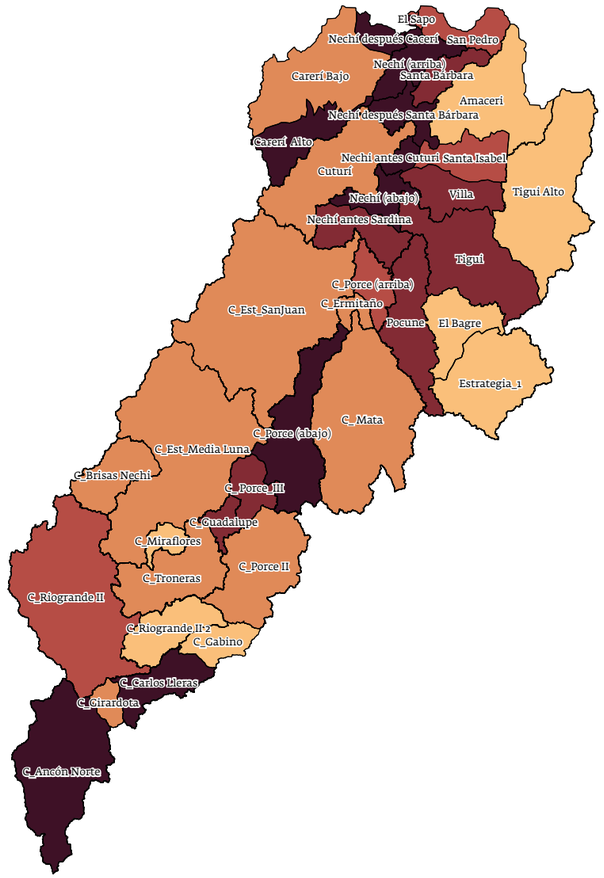


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

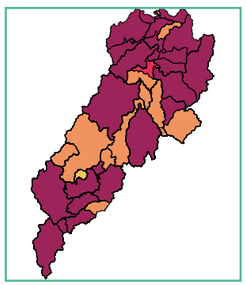


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

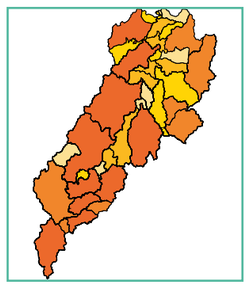
Provisión de alimentos (cultivos)



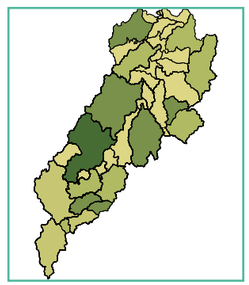
RIESGO



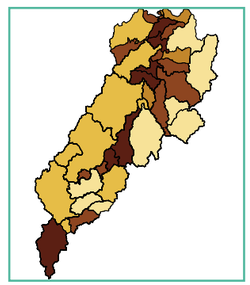
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

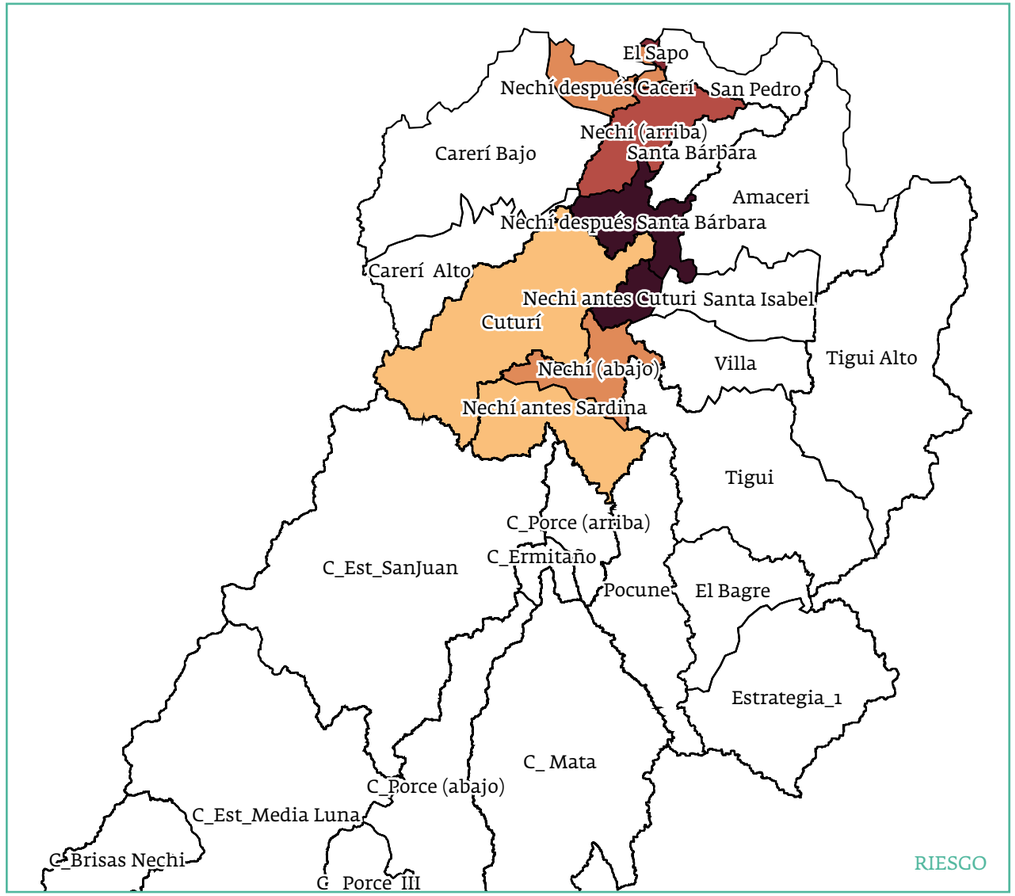


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

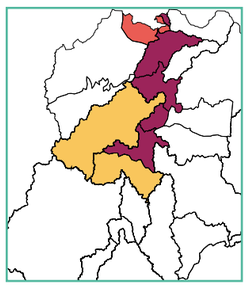


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

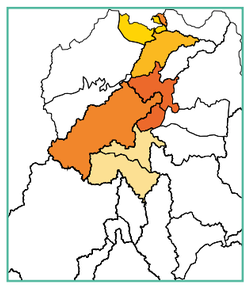
Provisión de alimentos (pesca)



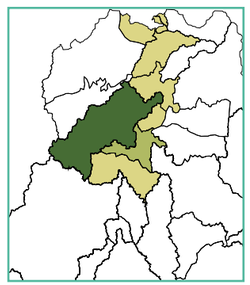
RIESGO



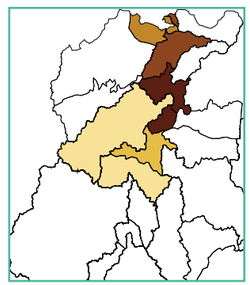
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

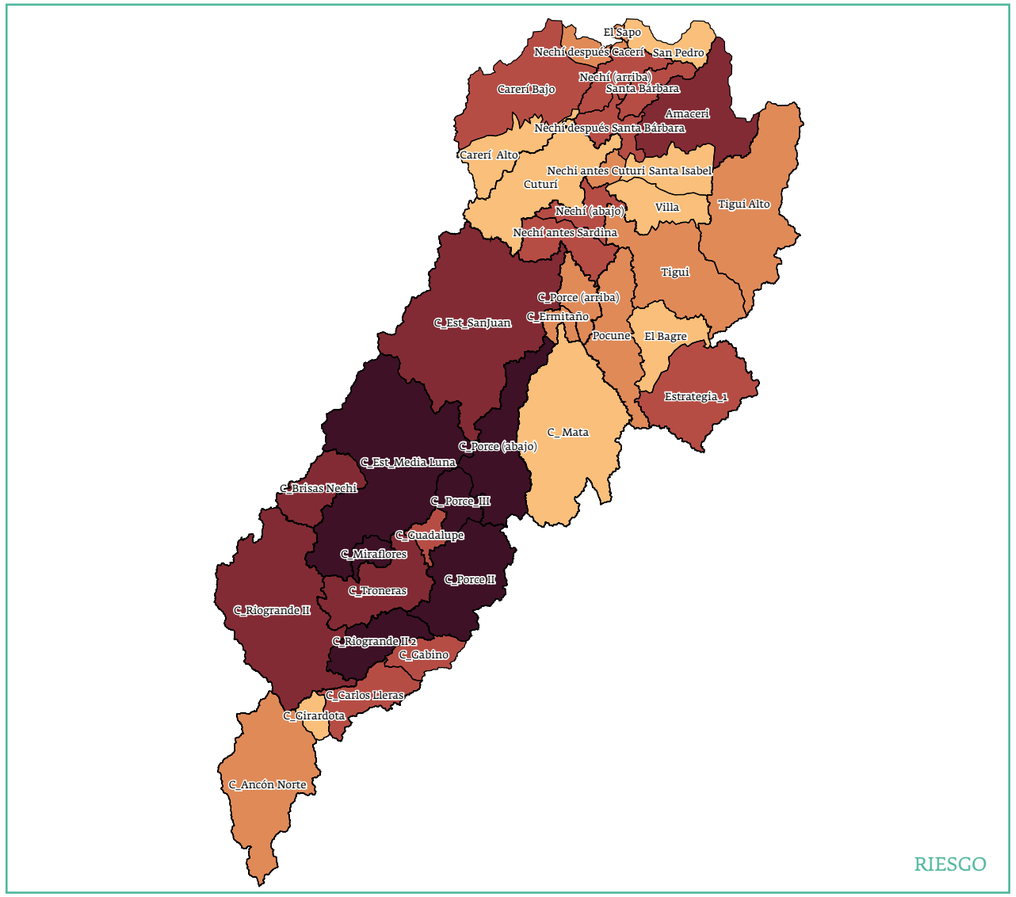


CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

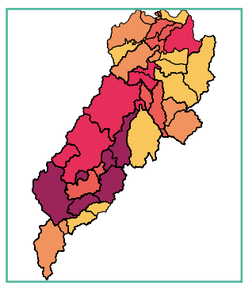


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

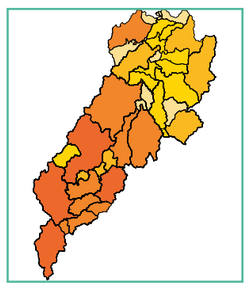
Servicios culturales



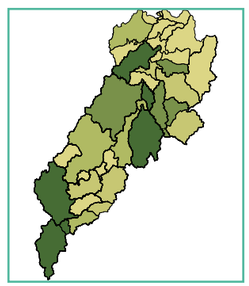
RIESGO



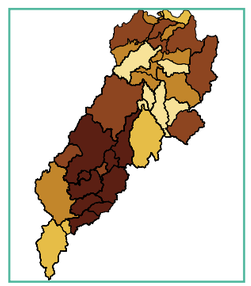
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA



CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

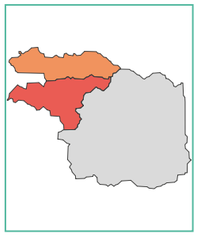
5.3. Hidrosistema El Llanito y San Silvestre

5.3.1. Escenario climático más húmedo

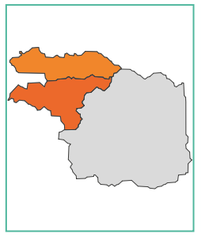
A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema de las ciénagas El Llanito y San Silvestre en un escenario climático más húmedo (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema El Llanito y San Silvestre en un escenario climático más húmedo

Control de inundaciones



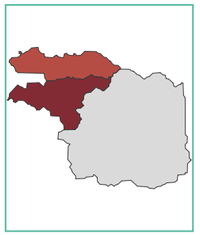
AMENAZA



SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

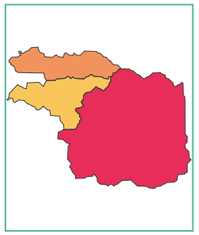
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

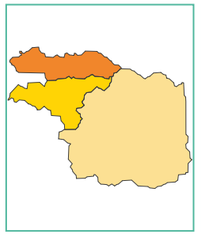


RIESGO

Abastecimiento de agua

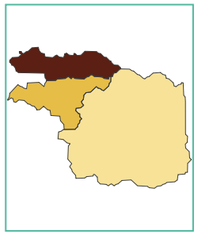


AMENAZA

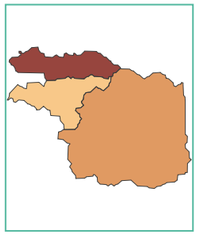


SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

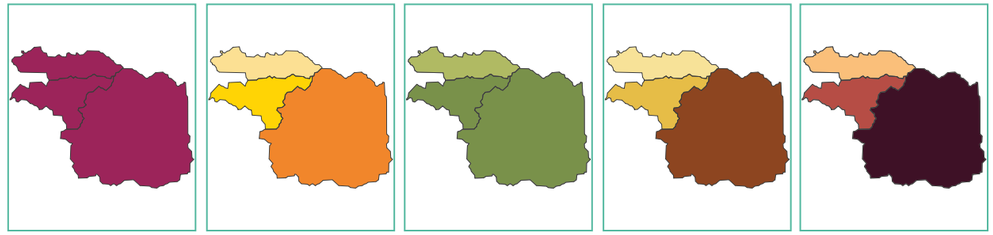


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

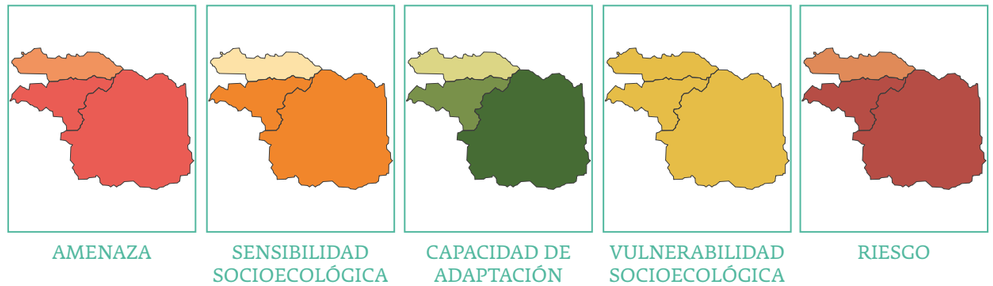


RIESGO

Provisión de alimentos (cultivos)



Servicios culturales



El sistema socioecológico denominado Ciénaga El Llanito presentó el riesgo más alto en comparación con los sistemas Ciénaga San Silvestre y Quebrada Vizcaína en relación con el abastecimiento de agua en un escenario climático más húmedo. Considerando el servicio ecosistémico de provisión de alimentos asociados a cultivos en un escenario climático más húmedo, el sistema socioecológico Quebrada Vizcaína tiene un riesgo mayor en comparación con los sistemas denominados Ciénaga San Silvestre y Ciénaga El Llanito. En cuanto a los servicios culturales, en un escenario climático más húmedo, los sistemas socioecológicos Quebrada Vizcaína y Ciénaga San Silvestre muestran un riesgo mayor comparativamente.

Mensajes clave

Hidrosistema El Llanito y San Silvestre - Escenario climático más húmedo

1. Se deben implementar medidas para contrarrestar la deforestación, así como para incrementar la cobertura natural, con el fin de mejorar la regulación hidrológica y reducir la erosión de los suelos y el aporte de sedimentos a los cuerpos de agua en este hidrosistema bajo un escenario climático más húmedo.

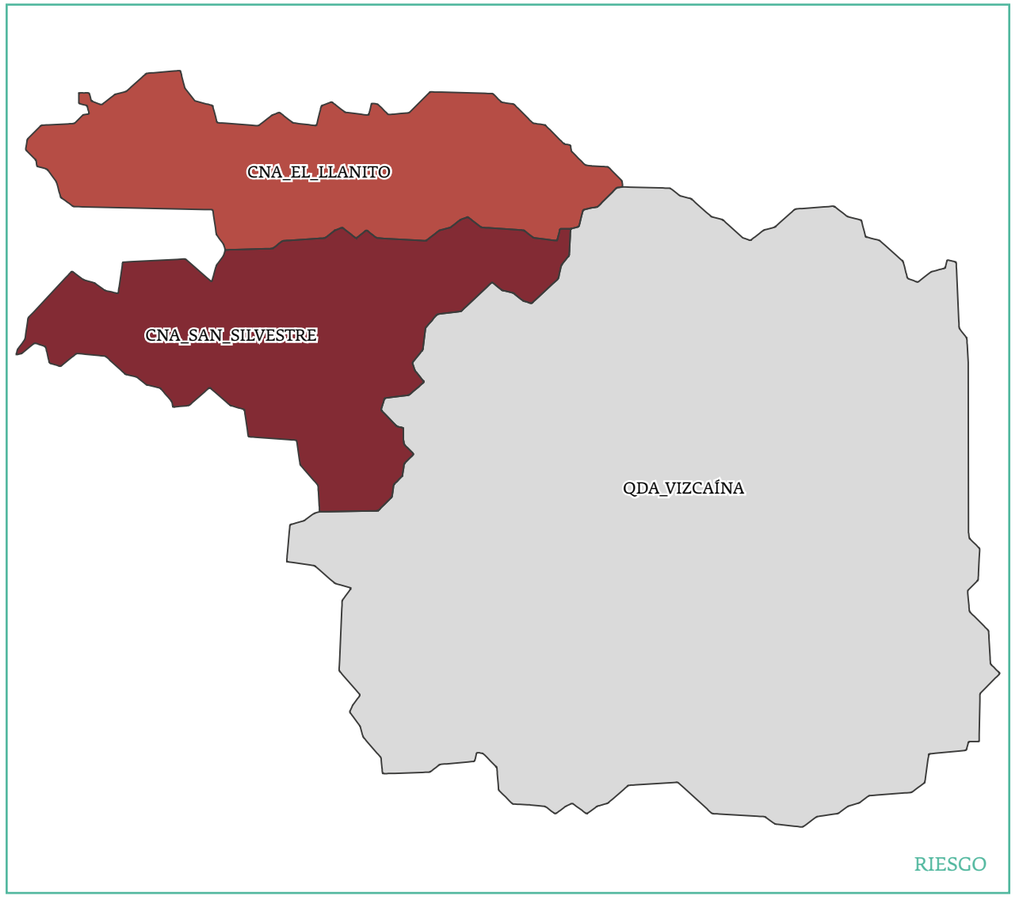
2. Sobresale el mapa de amenaza del servicio de provisión de alimentos asociados a cultivos. Medidas para reducir el riesgo son inaplazables en el hidrosistema El Llanito y San Silvestre. Estas deben estar dirigidas a reducir los conflictos de uso del suelo en zonas agrícolas y las áreas de suelos degradados por erosión, así como a fortalecer a la población rural en la asociatividad de sus productores y las UPA en el uso del agua para las actividades agropecuarias. Institutos de investigación del SINA y asociados o adscritos al Ministerio de Agricultura, junto con los entes territoriales, deben articularse y generar conocimiento e información, estrategias tecnológicas y recuperación de prácticas tradicionales.

3. Para mantener los servicios culturales, se deben promover medidas de gestión sostenible de la biodiversidad, de la cual se hace un aprovechamiento o un uso por parte de las comunidades locales. A su vez, dada la conexión entre el ser humano y su territorio, la reconversión de las áreas en conflicto de uso del suelo y la recuperación de prácticas tradicionales anfibias en el manejo de los socioecosistemas del Magdalena Medio son fundamentales para la adaptación al cambio climático.

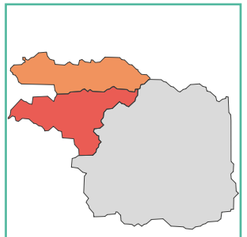
4. El sistema socioecológico Ciénaga San Silvestre fue el que presentó mayor riesgo de verse afectado negativamente en lo que se refiere al control de inundaciones en un escenario climático más húmedo. Dado que la ciudad de Barrancabermeja depende de la ciénaga para el abastecimiento de agua, es de vital importancia la implementación de medidas de adaptación basadas en ecosistemas que aporten a mejorar y mantener la regulación hidrológica en esta ciénaga, tales como la restauración y conservación de los bosques inundables.

5.3.1.1. Mapas escenario climático más húmedo

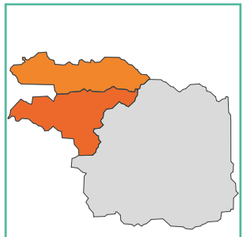
Control de inundaciones



RIESGO

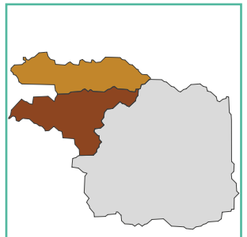


AMENAZA



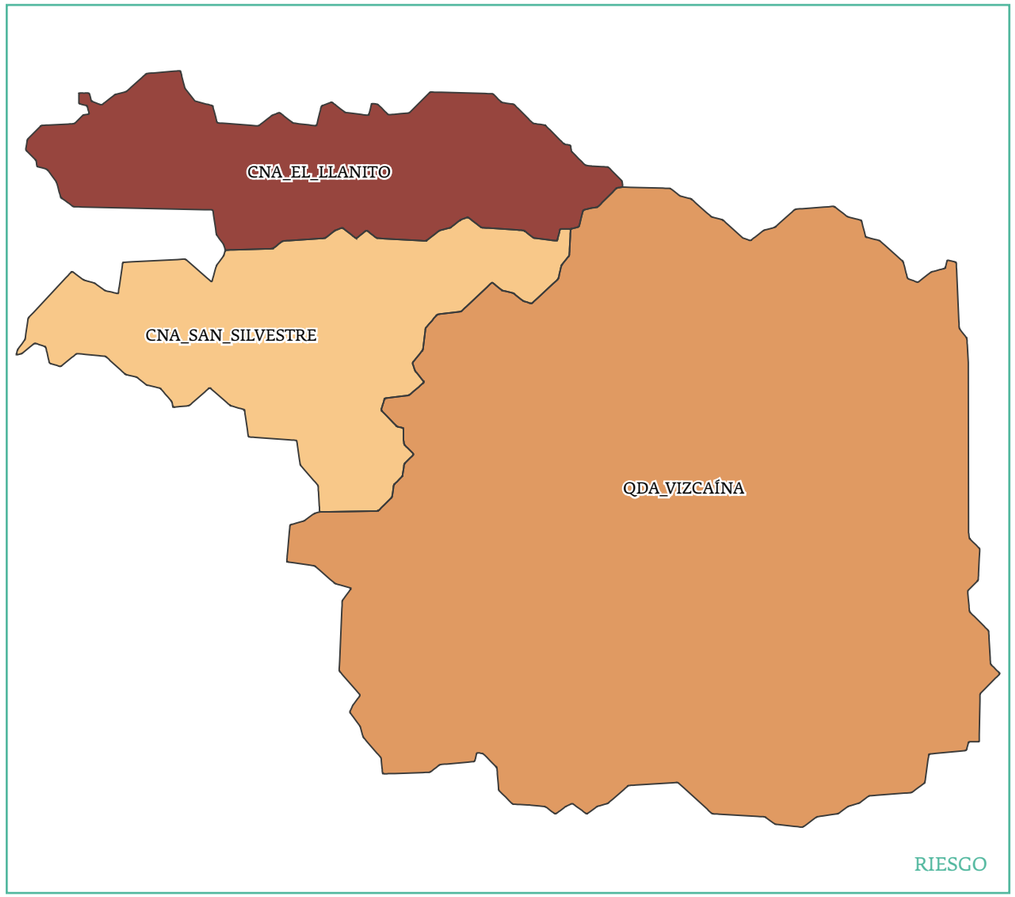
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

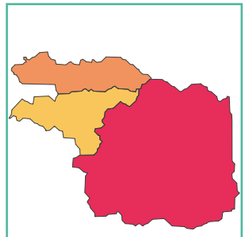


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

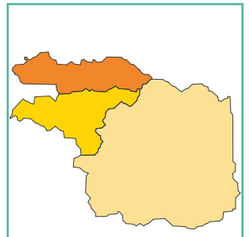
Abastecimiento de agua



RIESGO

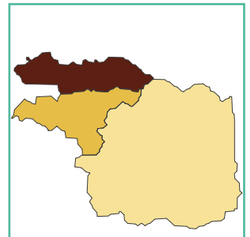


AMENAZA



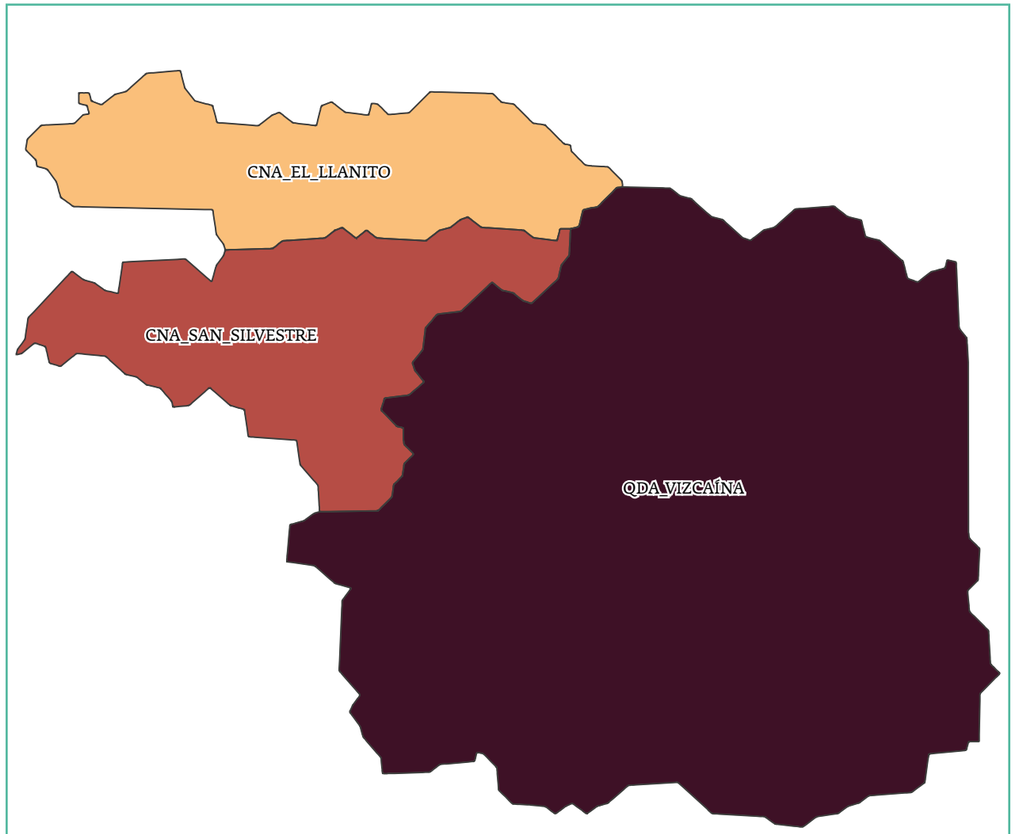
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

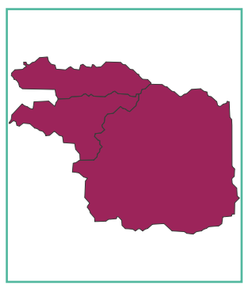


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

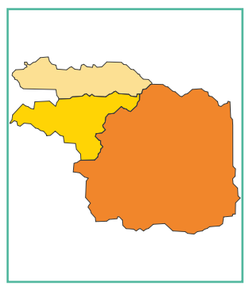
Provisión de alimentos (cultivos)



RIESGO

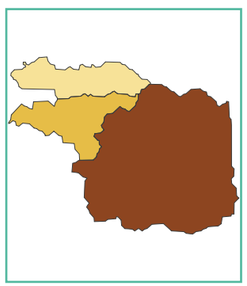


AMENAZA



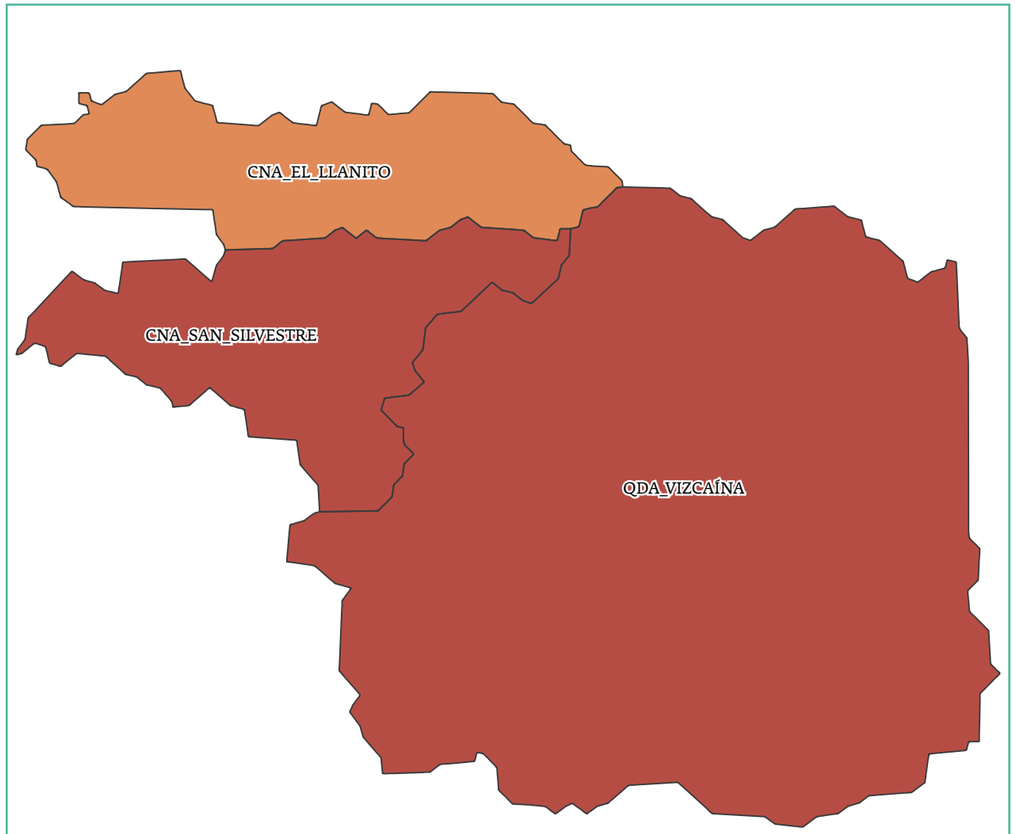
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

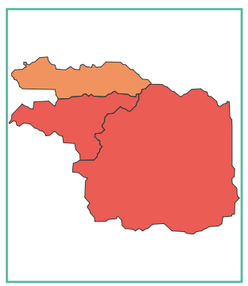


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

Servicios culturales



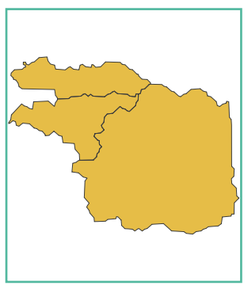
RIESGO



AMENAZA

SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



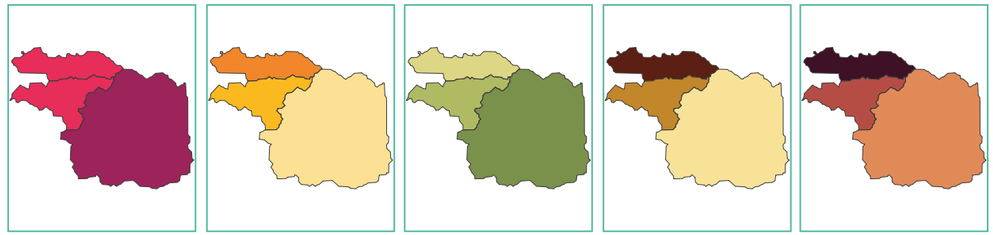
VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

5.3.2. Escenario climático más seco

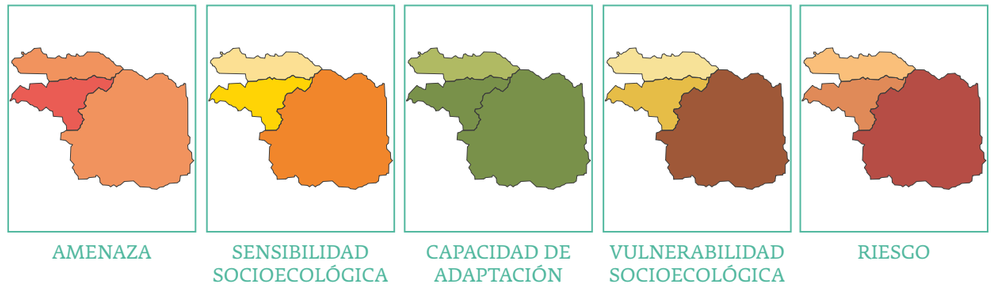
A continuación, se presentan los resultados para los sistemas socioecológicos ubicados en el hidrosistema de las ciénagas El Llanito y San Silvestre en un escenario climático más seco (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas socioecológicos del hidrosistema El Llanito y San Silvestre en un escenario climático más seco

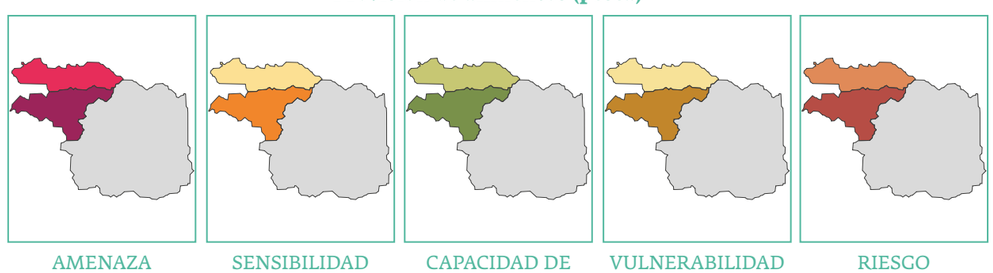
Abastecimiento de agua



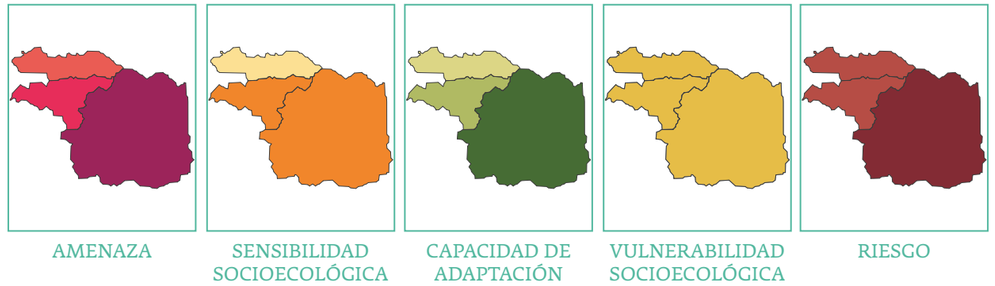
Provisión de alimentos (cultivos)



Provisión de alimentos (pesca)



Servicios culturales



El sistema que abarca la ciénaga El Llanito presentó un mayor riesgo en cuanto al servicio ecosistémico de abastecimiento de agua en un escenario climático más seco. Mientras que los servicios de provisión de alimentos asociados a cultivos, así como los servicios culturales, en un escenario climático más seco, presentan un riesgo mayor en el sistema socioecológico Quebrada Vizcaína. En cuanto al servicio ecosistémico de provisión de alimentos por pesca, el sistema socioecológico Ciénaga San Silvestre fue el que mostró un mayor riesgo.

Mensajes clave

Hidrosistema El Llanito y San Silvestre - Escenario climático más seco

1 En un escenario climático más seco, la provisión de alimentos asociados a la pesca puede estar en riesgo en los sistemas que abarcan las ciénagas El Llanito y San Silvestre. La conectividad fluvial entre el río y las ciénagas es determinante para los peces que habitan dichos sistemas. Por tanto, la restauración de la conectividad hídrica, así como de las áreas de reproducción y cría de peces en estos humedales, es importante para mantener la provisión de alimentos asociados a la actividad pesquera. Asimismo, el fortalecimiento de asociaciones de primer y segundo nivel permitirá que las comunidades estén mejor organizadas y, con ello, se optimice su capacidad adaptativa.

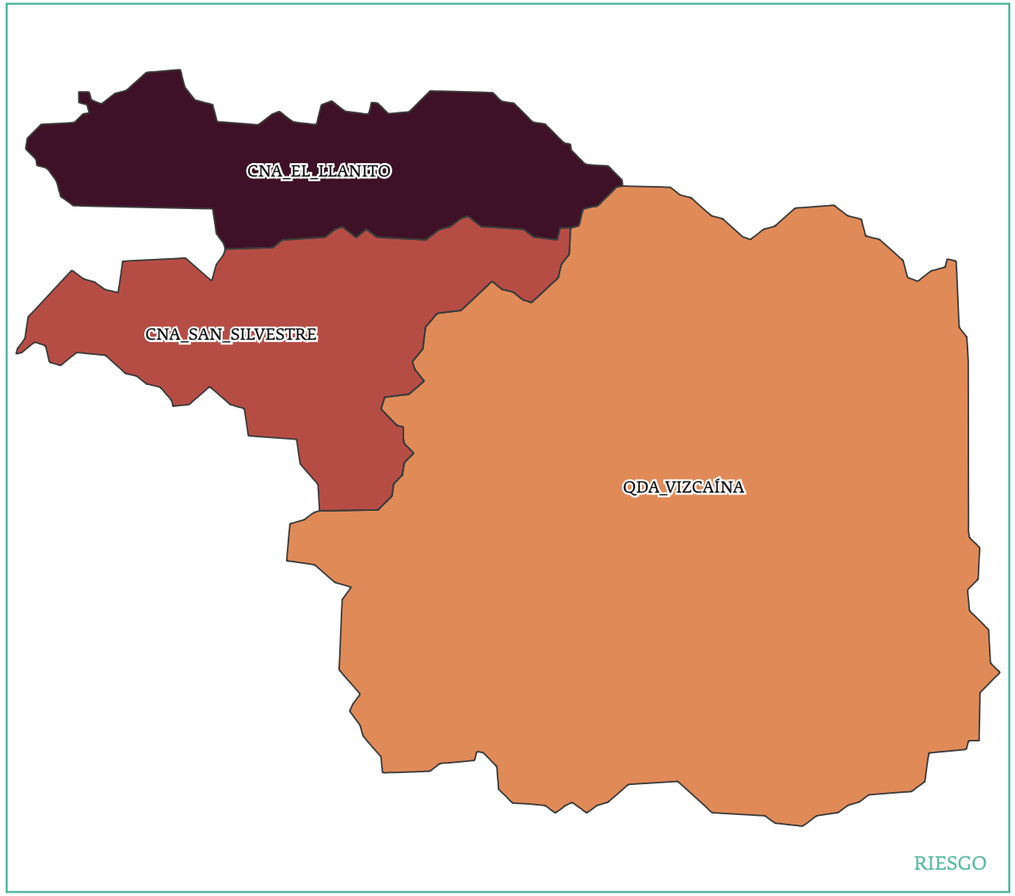
2 El caso del servicio de abastecimiento de agua sobresale en el sistema denominado Quebrada Vizcaína porque, aunque presentó el valor de amenaza relativa más alto en comparación con las ciénagas El Llanito y San Silvestre, su sensibilidad es la más baja, lo que contribuye a mantener una vulnerabilidad baja. Sin embargo, si su sensibilidad socioecológica se viera afectada negativamente, el riesgo de este sistema sería mayor que el de los otros dos sistemas (El Llanito y San Silvestre). Por tanto, para mantener un riesgo bajo del servicio de abastecimiento de agua, se requiere mantener y mejorar las condiciones del suelo y su cobertura actual con el fin de reducir el conflicto de uso del suelo. De igual modo, medidas para incrementar la conectividad entre fragmentos de coberturas naturales se hacen necesarias y urgentes.

3 En el análisis de los servicios culturales, el indicador de número de asociaciones comunitarias para la gobernanza del territorio fue el que más influyó en la capacidad de adaptación de estos sistemas. Por tanto, se deben dirigir esfuerzos a fortalecer las asociaciones de primer y segundo nivel, lo que aportará al bienestar de los habitantes de las ciénagas El Llanito y San Silvestre, así como al de quienes habitan aguas abajo del río Magdalena. Un sistema social más organizado permite una mejor o más acertada toma de decisiones para el beneficio colectivo, especialmente en escenarios de clima cambiante.

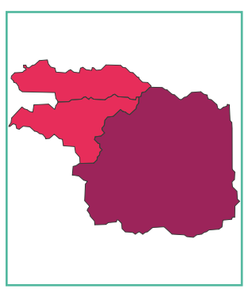
4 En un escenario climático más seco, para mantener la provisión de alimentos asociados a cultivos, se deben dirigir acciones para la recuperación de áreas bajo conflicto de uso del suelo en zonas agrícolas como suelos degradados por erosión. Asimismo, en el hidrosistema El Llanito y San Silvestre se deben gestionar acciones para la reducción de la pobreza en la población rural y para generar fortalecimiento de capacidades técnicas que garanticen fuentes de agua en las actividades agropecuarias durante escenarios climáticos secos.

5.3.2.1. Mapas escenario climático más seco

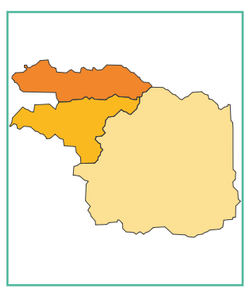
Abastecimiento de agua



RIESGO

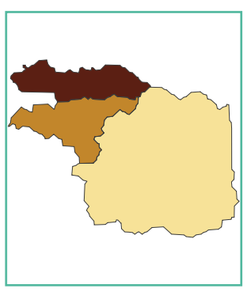


AMENAZA



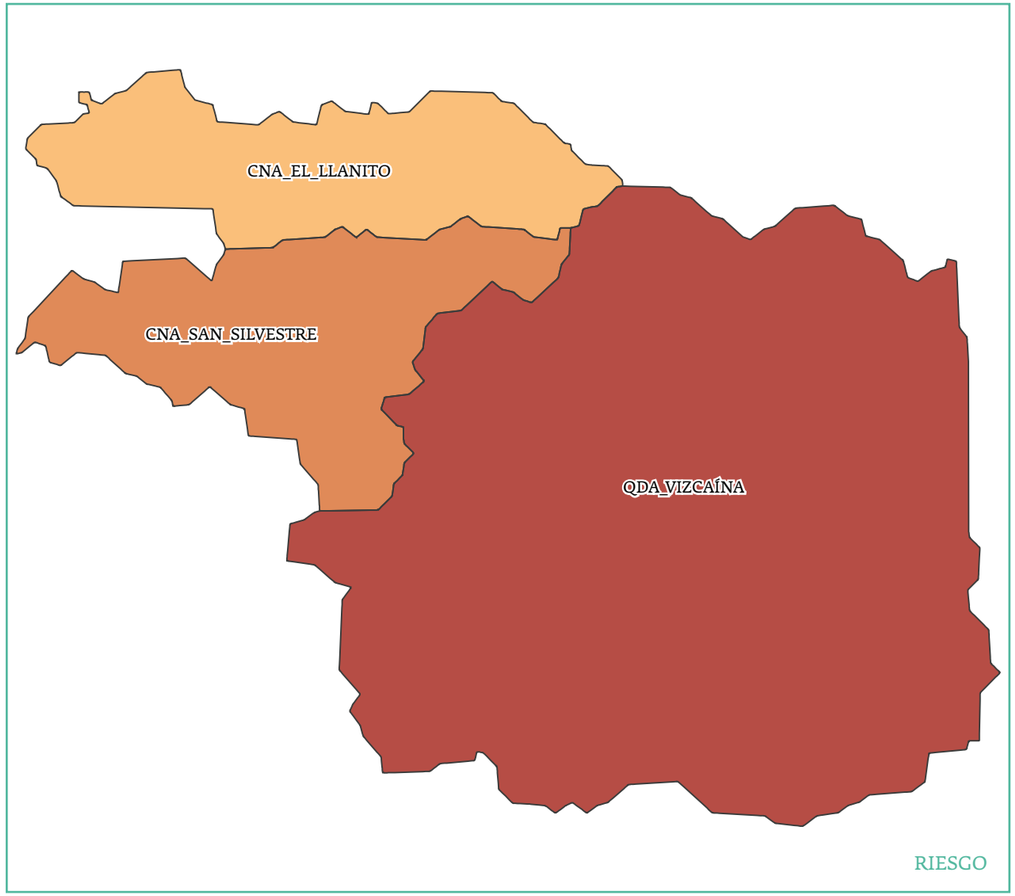
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

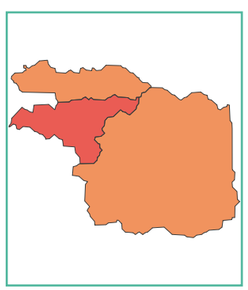


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

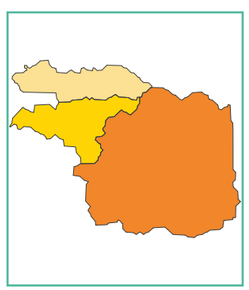
Provisión de alimentos (cultivos)



RIESGO

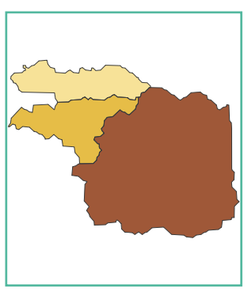


AMENAZA



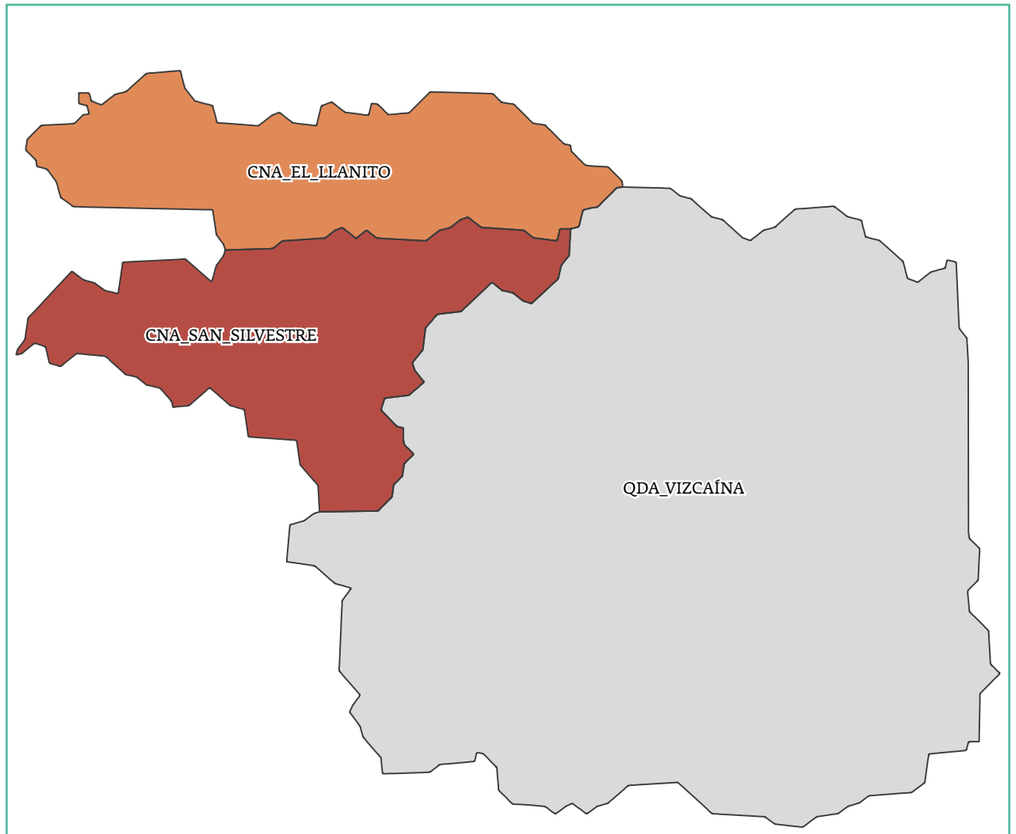
SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

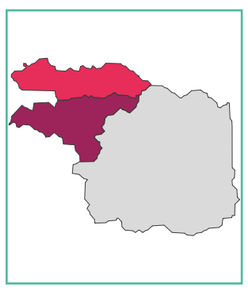


VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

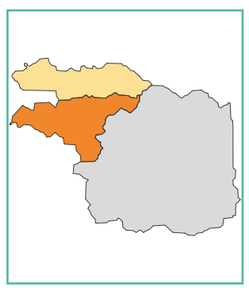
Provisión de alimentos (pesca)



RIESGO



AMENAZA

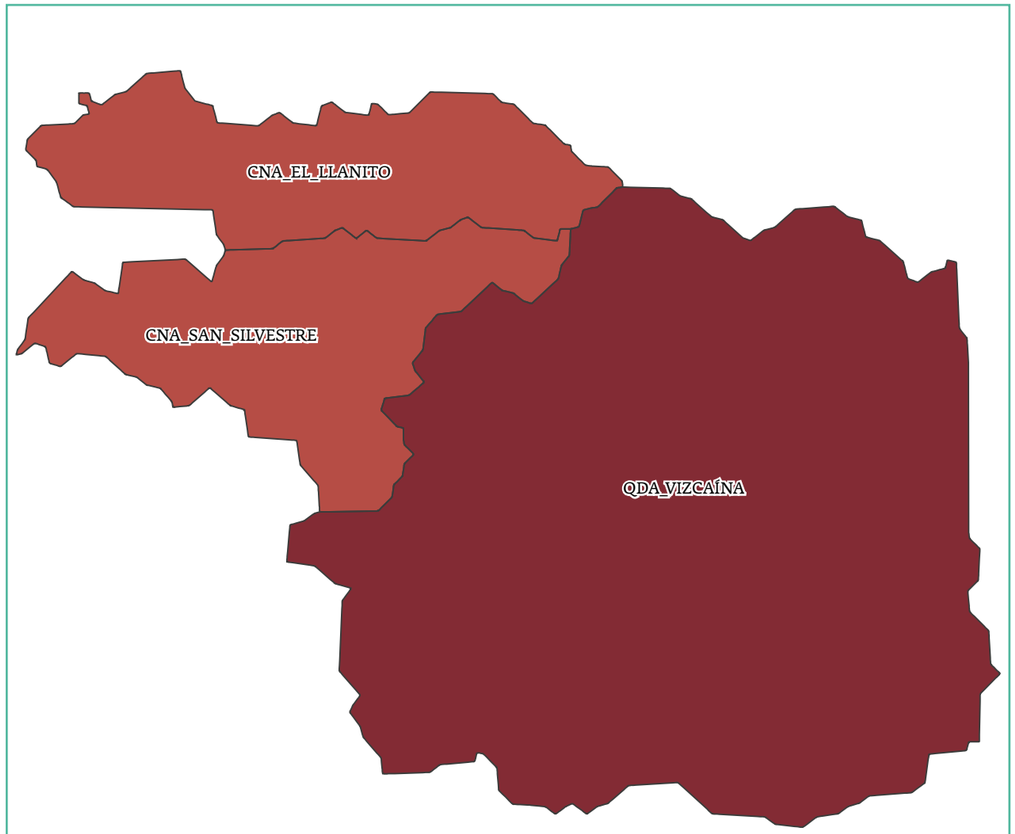


SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

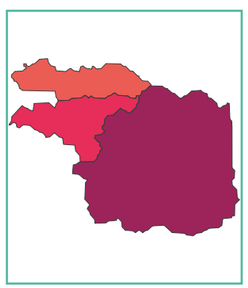
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

Servicios culturales



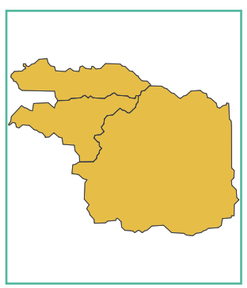
RIESGO



AMENAZA

SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN



VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

5.4. Hidrosistema Río Otún

5.4.1. Escenario climático más húmedo

A continuación, se presentan los resultados para las subunidades hidrológicas ubicadas en el hidrosistema del río Otún en un escenario climático más húmedo (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo del hidrosistema Río Otún en un escenario climático más húmedo

Abastecimiento de agua

AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Servicios culturales

AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Las subunidades hidrológicas Jordán 4500-5000 y Jordán 3000-3500, junto con Barbo 1500-2000 y San Juan 1500-2000, en la cuenca alta del río Otún, presentaron el mayor riesgo en comparación con las demás subunidades hidrológicas estudiadas considerando el abastecimiento de agua en un escenario climático más húmedo. A su vez, las subunidades hidrológicas Jordán 3000-3500 y Jordán 3500-4000 son las que presentaron mayor riesgo de ver afectados sus servicios culturales en un escenario climático más húmedo.

Mensajes clave

Hidrosistema Río Otún - Escenario climático más húmedo

1. En el análisis del servicio ecosistémico de abastecimiento de agua para el consumo humano, la tasa de deforestación y la fragmentación de coberturas naturales jugaron un papel fundamental en la sensibilidad ecológica del hidrosistema de la cuenca alta del río Otún. Por tanto, aunque gran parte está protegido como área de conservación de categoría nacional y regional, se requieren medidas de restauración de la conectividad estructural y funcional para mejorar la regulación hidrológica del sistema y reducir la erosión y el aporte de sedimentos a los cuerpos de agua que puedan afectar bocatomas, dado que el abastecimiento de agua de la ciudad de Pereira depende de este hidrosistema.

2. Dadas las características de la cuenca alta del río Otún, es recomendable implementar medidas de alerta temprana para monitorear la crecida de los ríos y quebradas, y evitar desastres ante un escenario climático más húmedo.

3. La subunidad hidrológica Bananera 1500-2000 fue la que presentó la mayor sensibilidad con respecto a los dos servicios ecosistémicos analizados en el hidrosistema Río Otún. Lo anterior señala la importancia de implementar medidas, tales como restauración y rehabilitación de ecosistemas y aumento de la conectividad entre estos, para reducir el riesgo de los servicios ecosistémicos de abastecimiento de agua y servicios culturales que provee el hidrosistema Río Otún.

5.4.1.1. Mapas escenario climático más húmedo

5.4.2. Escenario climático más seco

A continuación, se presentan los resultados para las subunidades hidrológicas ubicadas en el hidrosistema del río Otún en un escenario climático más seco (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Mapas de amenaza, sensibilidad, capacidad de adaptación, vulnerabilidad y riesgo del hidrosistema Río Otún en un escenario climático más seco

Abastecimiento de agua

AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Servicios culturales

AMENAZA | SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA | CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN | VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA | RIESGO

Las subunidades hidrológicas Jordán 3000-3500, Barbo 1500-2000, San Juan 1500-2000 y San Juan 3000-3500, en la cuenca alta del río Otún, presentaron el mayor riesgo en comparación con las demás subunidades hidrológicas estudiadas en lo que se refiere al abastecimiento de agua en un escenario climático más seco. Las subunidades hidrológicas Jordán 3000-3500 y San Juan 1500-2000 fueron las que presentaron mayor riesgo de ver afectados negativamente sus servicios culturales en dicho escenario.

Mensajes clave

Hidrosistema Río Otún - Escenario climático más seco

1 Resalta en los mapas el alto número de subunidades hidrológicas con una muy alta amenaza relativa al abastecimiento de agua en un escenario climático más seco en el hidrosistema del río Otún. Aledaña a esta zona, se encuentra ubicada la ciudad de Pereira, la cual se abastece de agua de esta cuenca. Por tanto, medidas para garantizar el abastecimiento de agua y mejorar la regulación hidrológica como protección de nacimientos de agua, aislamiento de cuerpos de agua, restauración y rehabilitación de cuencas, reducción de la erosión, entre otras, deben ser implementadas con prontitud para evitar afectaciones en el bienestar humano.

2 Otras estrategias para contrarrestar el conflicto de uso del suelo y la fragmentación de coberturas naturales se hacen indispensables para mejorar la regulación hídrica en escenarios climáticos más secos de cara a reducir la vulnerabilidad y riesgo del servicio ecosistémico de abastecimiento de agua.

3 De acuerdo con el IDEAM (2018), en Colombia los glaciares han sido fuertemente impactados por el cambio en el clima, lo que, junto con otros motores de transformación del territorio, ha conllevado cambios hidrológicos en los ecosistemas de alta montaña. Esto trae consecuencias en los páramos y en los ecosistemas altoandinos, donde se pueden ver alterados los modos de vida de quienes habitan allí. Estas alteraciones también pueden afectar a quienes se benefician de los servicios ecosistémicos que se proveen en la cuenca alta del río Otún. Por ello, es importante el acompañamiento y monitoreo de los ecosistemas de alta montaña, de sus procesos ecológicos y de la alteración en los beneficios que estos proveen, con el fin de diseñar e implementar medidas de adaptación preventivas.

4 En el escenario climático seco, las subunidades hidrológicas Bananera 1500-2000 y Bananera 2000-2500 requieren especial atención, puesto que presentan una amenaza y sensibilidad comparativamente mayor que otras subunidades hidrológicas en el hidrosistema del río Otún. Urge, pues, implementar medidas para restaurar su integridad ecológica y así aportar a reducir la vulnerabilidad del servicio ecosistémico de abastecimiento de agua para uso humano.

5.4.2.1. Mapas escenario climático más seco

Capítulo 6

Análisis de vulnerabilidad de especies de peces por pérdida de área de distribución debido al cambio climático en la macrocuenca Magdalena-Cauca

Guido A. Herrera-R., Javier A. Maldonado-Ocampo (q.e.p.d.), Silvia López-Casas

El cambio en el área de distribución de las especies es una de las principales respuestas esperadas de la biodiversidad frente al cambio climático (Pecl et al., 2017).

Se espera que las especies colonicen nuevas áreas siguiendo sus condiciones climáticas favorables hacia elevaciones y latitudes mayores siguiendo sus nichos climáticos (Lenoir y Svenning, 2015). Debido al calentamiento global reciente, estos cambios en los rangos de distribución de las especies han sido documentados en diferentes grupos en los últimos años (Chen et al., 2011). Las especies acuáticas, como los peces de agua dulce, son especialmente vulnerables al cambio climático debido a su baja capacidad de regular su temperatura corporal y a que su dispersión está limitada por la estructura de las redes hidrográficas (Woodward et al., 2010). Saber esto, sin embargo, no implica que se conozcan las posibles consecuencias futuras del cambio climático sobre los peces de agua dulce. Al contrario, estas aún son poco conocidas, pero han colaborado a ello investigaciones adelantadas principalmente en especies de regiones temperadas (Pacifici et al., 2015; Comte et al., 2013).

Los ecosistemas acuáticos tropicales están experimentando una acelerada transformación debido a la interacción de diversas actividades humanas (Winemiller et al., 2016; Reis et al., 2016). Por tanto, uno de los principales retos en la conservación de los peces de agua dulce es predecir el impacto de futuros escenarios de transformación sobre ellos (Olden et al., 2010). La macrocuenca Magdalena-Cauca alberga el 80 % de la población colombiana (Jiménez-Segura et al., 2016) y contiene en sus aguas 225 especies de peces de agua dulce (~50 % endémicas de la cuenca) (DoNascimiento et al., 2018). Actualmente, factores como el desarrollo hidroenergético (Angarita et al., 2018; Carvajal-Quintero et al., 2017), la sobrepesca, la contaminación (Jiménez-Segura et al. 2016) y la transformación del paisaje (Patino y Estupinan-Suarez, 2016) representan algunas de las principales amenazas para los ecosistemas acuáticos de esta macrocuenca. Con el fin de llenar vacíos de información y contribuir a la conservación, el presente trabajo explora en este capítulo el efecto del cambio climático futuro en la distribución de peces de agua dulce en la macrocuenca Magdalena-Cauca.

6.1. Metodología

6.1.1. Registros de especies

Los registros de las especies de peces de agua dulce presentes en la macrocuenca Magdalena-Cauca se consolidaron a partir de la información disponible del material depositado en las principales colecciones ictiológicas de Colombia y de los registros suministrados por TNC Colombia de algunas especies migratorias. Se obtuvieron registros para un total de 177 especies nativas de las 225 registradas para toda la macrocuenca. La validez del estatus taxonómico de cada una de las especies, así como su presencia en la macrocuenca, fue verificada con el listado más reciente de peces dulceacuícolas en Colombia (DoNascimiento et al., 2017). Del total de especies registradas en la macrocuenca Magdalena-Cauca, se identificaron algunas de interés particular como las endémicas (DoNascimiento et al., 2017), amenazadas (Mojica et al., 2012), migratorias (Zapata y Usma, 2013), de interés pesquero (Lasso et al., 2011) y ornamentales (Ortega-Lara et al., 2015) con el fin de determinar el efecto del cambio climático sobre cada uno de los grupos. Igualmente, las especies fueron asignadas a un grupo funcional, basado en su morfología y preferencias de hábitat, de acuerdo con la propuesta de Carvajal-Quintero et al. (2015).

6.1.2. Variables ambientales

El clima actual fue representado por las variables temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm) para el periodo 1985-2015. El clima futuro fue representado por las variables temperatura media anual (°C) y precipitación media anual (mm) para el periodo 2015-2040 en el escenario RCP 8.5. Se utilizaron dos escenarios de precipitación (seco y húmedo) para representar el clima futuro. Adicionalmente, se utilizó la variable categórica de subcuencas del río Magdalena del paquete HydroSHEDS en la escala 5 (Lehner y Grill, 2013).

6.1.3. Efecto del cambio climático

Se desarrollaron modelos de distribución de especies utilizando el *software* MaxEnt v.3.3.3k (Phillips et al., 2006), con el fin de estimar la distribución potencial de 126 especies nativas que contaban con diez o más ocurrencias georreferenciadas. Los modelos de distribución fueron ajustados con los registros conocidos para cada especie en el clima presente, posteriormente fueron proyectados para el resto de la macrocuenca en los dos escenarios de clima futuro. Se obtuvieron mapas de probabilidad de presencia para cada especie en cada escenario, que fueron transformados en mapas binarios de presencia-ausencia con el valor que maximizara la suma de la especificidad y sensibilidad de los modelos de distribución (Liu et al., 2013).

El efecto del cambio climático en el área de distribución de cada una de las especies de peces fue evaluado mediante el porcentaje de pérdida o ganancia en el área ocupada en los dos escenarios de clima futuro (seco y humedo) frente a la distribución actual en el clima presente. Este cálculo fue realizado a nivel de la macrocuenca Magdalena-Cauca y a nivel de los siguientes hidrosistemas delimitados: ciénagas El Llanito y San Silvestre, Depresión Momposina, cuenca del río Nechí y cuenca del río Otún. Para todos los hidrosistemas, cada una de las especies que presentó una disminución en su distribución debido al cambio climático se clasificó en categorías de probabilidad de extinción arbitrarias: baja = 1 (0-25 % de pérdida de distribución), media = 2 (25-50 %), alta = 3 (50-75 %) y muy alta = 4 (75-100 %), teniendo en cuenta que la reducción en el rango de distribución puede traducirse en un aumento en la probabilidad de extinción de las especies (Carvajal-Quintero et al., 2017).

Tabla 6.1. Análisis de vulnerabilidad de las especies de peces al cambio climático

		Magdalena-Cauca		El Llanito		Río Nechí		Río Otún		Cuenca Caribe	
		Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
Grupo Funcional	Bentónico no torrencial										
	Pelágico										
	Pozas										
	Reofílico										
	Torrencial										
Amenaza	Sin Categoría										
	Casi Amenazada										
	Vulnerable										
	En Peligro										
Pesquero											
Ornamental											
Endémico											
Migratoria											

Probabilidad de extincion

Baja Media Alta Muy alta

6.2. Resultados

Los resultados evidienciaron que una proporción importante de especies en los diferentes hidrosistemas y grupos de especies presentarán una disminución en su área de distribución en el clima futuro (ver Tabla 6.1).

En la macrocuenca Magdalena-Cauca, el 64,28 % de las especies evaluadas (81/126 spp) presentarían una disminución en su área de distribución en el escenario húmedo (área promedio perdida [APP] = 40,28 %, desviación estándar [SD] = 25,34) y el 62,69 % (79/126 spp) en el escenario seco (APP = 40,59 %, SD = 25,27).

En las ciénagas El Llanito y San Silvestre, 75,32 % da las especies registradas (58/77 spp) presentarían una disminución en su rango de distribución al interior del hidrosistema en el escenario seco (APP = 85,72 %, SD = 28,56), y 74 % (57 especies) en el húmedo (APP = 82,71 %, SD = 19,4).

En la cuenca del río Nechí, 59,22 % de las especies registradas (61/103 spp) presentarían una disminución de su rango de distribución en el escenario seco (APP = 37,58 %, SD = 26,54), y 56,31 % (58/103 especies) en el escenario húmedo (APP = 37,59 %, SD = 25,79).

En la cuenca del río Otún, el 25,92 % de las especies registradas (7/27 spp) disminuirían su rango de distribución en el escenario húmedo (APP = 35,95 %, SD = 36,13) y el 37,07 % (10/27 spp) en el escenario seco (APP = 74,32 %, SD = 21,45).

Por último, en la Depresión Momposina, 67,56 % de las especies registradas (75/111 spp) presentarían una disminución en su rango de distribución en ambos escenarios (seco: APP = 66,57 %, SD = 26,8; húmedo: 65,86 %, SD = 27,36).

Para aquellas especies que presentarían pérdida de distribución tanto en el escenario húmedo como en el seco, los valores de pérdida de área de distribución son mayores en el escenario seco que en el escenario húmedo en la macrocuenca Magdalena-Cauca, en la cuenca del río Nechí y en el río Otún.

Sin embargo, los valores de pérdida de distribución son similares en la ciénaga El Llanito y San Silvestre, y en la Depresión Momposina (ver Tabla 6.2 en los anexos digitales). Estos dos últimos hidrosistemas presentaron los porcentajes más elevados de especies con una alta probabilidad de extinción, mientras que la macrocuenca Magdalena-Cauca y el río Nechí presentaron los porcentajes más elevados de especies con una muy baja probabilidad de extinción (ver Tabla 6.1 en los anexos digitales).

Especies migratorias. Los valores de pérdida de distribución para las especies migratorias a nivel de la macrocuenca y al interior de los hidrosistemas fueron similares entre el escenario húmedo y el seco, siendo notablemente mayores en las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y la Depresión Momposina (ver Figura 6.3 en los anexos digitales). Tanto en el escenario húmedo como en el seco, las especies migratorias presentaron valores de pérdida de área de distribución significativamente más elevados que aquellas no migratorias en la macrocuenca y la Depresión Momposina, pero similares en el río Nechí (ver Figura 6.4 en los anexos digitales). En el río Otún no se presentaron especies migratorias.

Especies de interés pesquero. La pérdida de distribución de las especies de interés pesquero fue similar en las especies entre el escenario húmedo y el seco a nivel de la macrocuenca y en los diferentes hidrosistemas (ver Figura 6.5 en los anexos digitales). La pérdida de distribución a nivel de la macrocuenca y en los hidrosistemas de las ciénagas El Llanito y San Silvestre, el río Nechí y la Depresión Momposina fue similar entre las especies de interés pesquero y las que no tienen valor comercial (ver Figura 6.6 en los anexos digitales). En el río Otún no se registraron especies de interés pesquero.

Especies ornamentales. La pérdida de distribución de las especies de interés ornamental fue similar entre el escenario húmedo y el seco a nivel de la macrocuenca y en los diferentes hidrosistemas (ver Figura 6.7 en los anexos digitales). La pérdida de distribución fue similar entre las especies de interés ornamental y las que no tienen interés ornamental a nivel de la macrocuenca y en los hidrosistemas El Llanito y San Silvestre, Río Nechí y Depresión Momposina (ver Figura 6.8 en los anexos digitales). En el río Otún no se registraron especies de interés ornamental.

Especies endémicas. Las especies endémicas tuvieron valores superiores de pérdida de distribución en el escenario seco respecto al escenario húmedo a nivel de la macrocuenca Magdalena-Cauca, el río Nechí y el río Otún, pero similares en las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y la Depresión Momposina (ver Figura 6.9 en los anexos digitales). La pérdida de distribución fue diferente entre las especies endémicas y las no endémicas en el escenario húmedo en la macrocuenca Magdalena-Cauca y el río Nechí, pero similares en las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y la perdida de distribución fue similar en las ciénagas de la Depresión Momposina. En el escenario seco, las pérdidas de distribución fueron diferentes en el río Nechí, pero similar en la macrocuenca Magdalena-Cauca, las ciénagas El Llanito y San Silvestre, y la Depresión Momposina (ver Figura 6.10 en los anexos digitales). Para el río Otún no fue posible realizar la comparación debido a que se estimó que solo una especie no endémica presentaría una disminución en su rango de distribución.

Especies amenazadas. Para el caso de las categorías de amenaza, los valores de pérdida de distribución fueron similares entre las categorías de amenaza a nivel de la macrocuenca y en los diferentes hidrosistemas en el escenario húmedo y en el escenario seco (ver Figura 6.11 en los anexos digitales). La pérdida de distribución fue diferente para las especies sin categoría, vulnerables y casi amenazadas entre los diferentes hidrosistemas, pero similar para las especies en peligro.

Grupos funcionales. La perdida de distribución es diferente entre los grupos funcionales en ambos escenarios climatológicos a nivel de la macrocuenca Magdalena-Cauca, observándose que es mucho más alta para las especies bentónicas no torrenciales. Pero similares en las ciénagas El Llanito y San Silvestre, el río Nechí, el río Otún y Depresión Momposina (ver Figura 6.12 en los anexos digitales). La pérdida de distribución es diferente para las especies pelágicas, bentónicas no torrenciales, torrenciales, reofílicos y de pozas en ambos escenarios climáticos.

6.3. Conclusiones

1. De las 126 especies analizadas, la gran mayoría experimentaría una disminución en su área de distribución en los dos escenarios de clima futuro modelados en la macrocuenca Magdalena-Cauca. Sin embargo, al interior de los diferentes hidrosistemas, las especies presentarían probabilidad de extinción variables.

2. En los hidrosistemas El Llanito y San Silvestre, y Depresión Momposina, las especies tendrían los valores más elevados de pérdida de distribución con una mayor probabilidad de extinción en los diferentes grupos de especies de peces, en comparación con los otros hidrosistemas (macrocuenca Magdalena-Cauca, Río Nechí y Río Otún).

3. La pérdida de areas de distribución de las especies de peces en la macrocuenca Magdalena-Cauca tiende a ser mayor en el escenario seco que en el escenario húmedo.

4. La tolerancia al aumento de la temperatura de cada una de las especies determina las diferencias en la vulnerabilidad al cambio climático en los diferentes hidrosistemas y grupos de especies. Aquellas especies de peces que poseen nichos climáticos próximos a los límites superiores de temperatura existentes podrían ser más vulnerables al cambio climático, teniendo en cuenta que experimentarían condiciones climáticas no existentes con anterioridad, las cuales excederían sus nichos climáticos. Estas especies probablemente no podrían adaptarse a las nuevas condiciones debido a que los límites superiores de los nichos climáticos tienden a ser evolutivamente conservados.

5. Los modelos de distribución de las especies de peces de agua dulce en la macrocuenca Magdalena-Cauca y la precisión de las predicciones de distribución futuras pueden mejorarse con la utilización de variables más detalladas que describan aspectos de la fluctuación y variabilidad anual del clima presente y futuro. Valores de temperatura mínima y máxima mensual del clima futuro serían útiles puesto que permitirían calcular variables bioclimáticas (Hijmans et al., 2005), las cuales son ampliamente utilizadas en la modelación de distribución de especies con el fin de evaluar de forma mucho más detallada los efectos del cambio climático sobre ellas.

Capítulo 7

Recomendaciones para la gestión de sistemas socioecológicos inmersos en planicies de inundación en contexto de cambio climático

Recomendaciones

1. La gestión de los sistemas socioecológicos inmersos en planicies de inundación en un contexto de cambio climático debe responder a las cuatro dimensiones de los humedales: longitudinal, vertical, lateral y temporal. La dinámica hidrológica de las planicies de inundación del medio y bajo Magdalena-Cauca dependen de las acciones en la parte alta y media de la macrocuenca. Por tanto, para reducir el riesgo ante escenarios climáticos más húmedos y más secos, se deben implementar medidas que ayuden a mantener o mejorar la regulación hidrológica de estos sistemas de humedales, que generan importantes beneficios para la gente.

2. La dimensión temporal de los humedales debe comprenderse y considerarse en la gestión territorial como lo que es: una dimensión dinámica, cambiante y con incertidumbre ante los nuevos escenarios climáticos. Así, el principio de precaución, junto con medidas de adaptación y gestión del riesgo, deben ser el pilar de la gestión de sistemas socioecológicos en planicies de inundación de la macrocuenca Magdalena-Cauca.

3. Los motores de cambio y las presiones que afectan a las planicies de inundación de la macrocuenca Magdalena-Cauca —como el conflicto de uso del suelo, la transformación de humedales y la fragmentación de coberturas naturales, etc.— son, entre otros, los responsables de la vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos. Por ello, implementar medidas participativas que articulen a las comunidades e instituciones es fundamental para contrarrestar la degradación ecosistémica y la pérdida del capital natural, así como para recuperar la paz, la gobernanza y la confianza en las instituciones y en los procesos de resolución de conflictos socioambientales.

4. La recuperación y fortalecimiento del diálogo entre actores institucionales y comunitarios, dirigido hacia la resolución de conflictos socioambientales y el rescate de prácticas tradicionales de las culturas anfibias, es esencial para la gestión efectiva de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca, como territorio altamente dinámico ante escenarios climáticos más húmedos y más secos.

5. Es clave que los gremios productivos que desarrollan sus labores en los humedales reconozcan estos como ecosistemas anfibios, cuya dinámica depende de las interrelaciones existentes entre los sistemas terrestres y los sistemas acuáticos, por lo que es de vital importancia conservar y realizar un manejo sostenible de sus cuerpos de agua y bosques para asegurar los beneficios socioeconómicos y culturales que brindan.

6. El presente análisis evidencia que la capacidad de adaptación juega un papel crucial en el riesgo al cambio climático de los socioecosistemas de planicies inundables. El reto, por tanto, es repensar las planicies de inundación como territorios de vida y espacios de uso sostenible. Además, para lograr esto, se requiere afianzar la paz en estos territorios, lo que permitiría el fortalecimiento de asociaciones, instituciones no gubernamentales y reglas informales de acuerdos de manejo entre las comunidades y los productores beneficiarios de los humedales de la macrocuenca Magdalena-Cauca.

Capítulo 8

Retos del estudio y lecciones aprendidas

1. Fue un reto mostrar señal de variabilidad en los escenarios de cambio climático desarrollados. En busca de los mejores resultados se dedicó bastante tiempo y esfuerzo a ensayar diferentes métodos, como BCSD y k-NN. Al final, los mejores resultados se obtuvieron con el método delta Q-Q.

2. El modelamiento hidrológico desarrollado para obtener los indicadores de amenaza significó un desafío y un aporte valioso, ya que cada servicio ecosistémico presenta una lógica específica frente a la dinámica hidrológica. Sin embargo, fue clave para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en este tipo de ecosistemas anfibios.

3. En el análisis de vulnerabilidad y riesgo, la etapa de selección, recolección y manejo de información para la construcción de los indicadores, de acuerdo al alcance del estudio y las unidades espaciales requeridas, demandó un tiempo mayor al programado. Esto debido a que la información no siempre es posible obtenerla de manera oportuna, alguna se encuentra en proceso de elaboración, ajuste o publicación, o está disponible a escalas que no se ajustan a las del estudio. La información socioeconómica está disponible a nivel municipal, por lo que requirió de un tratamiento especial para su uso a las escalas del análisis (subunidades hidrológicas, entendidas como socioecosistemas).

4. Existe información generada por censos, encuestas y registros administrativos, clave para análisis de este tipo, lo que amerita un arreglo institucional para involucrar a las partes responsables de generarla y darle un mayor y mejor uso. Un ejemplo es el Censo Nacional Agropecuario del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y las bases de datos sobre organizaciones solidarias de productores de alimentos de la Unidad Administrativa Especial de Organizaciones Solidarias (UAEOS) adscrita al Ministerio del Trabajo, entre otras. La extraordinaria información existente en el Censo Nacional Agropecuario, accesible para cualquier investigador, puede ser útil para otros análisis de este tipo.

5. Fue un reto realizar el análisis de los servicios culturales con base en información secundaria oficial existente. Requirió explorar de forma novedosa y con una lógica de pensamiento que permitiera la selección de indicadores proxi que reflejaran este tipo de servicios.

6. Realizar el análisis de riesgo de los sistemas socioecológicos a partir de los servicios culturales, con base en información secundaria oficial existente, constituyó un gran desafío. Para lograr llevar a cabo el análisis, se requirió de supuestos y una lógica de pensamiento que permitiera la selección de algunos indicadores proxi. Estos indicadores permitieron visibilizar aspectos culturales clave y su relación con el cambio climático en términos de sensibilidad —como los Bienes de Interés Cultural (BIC), los sitios arqueológicos y el número de UPA que hacen aprovechamiento de productos del bosque y del páramo— y en términos de capacidad de adaptación —como los Planes Especiales de Salvaguarda (PES) y el número de asociaciones comunitarias para la gobernanza del territorio—.

7. Es necesaria una estrategia de gestión del conocimiento para facilitar el trabajo transdisciplinario, la transferencia de conocimiento y las lecciones aprendidas en este tipo de proyectos. Es algo fundamental para la apropiación del conocimiento y la adaptación al cambio climático, en términos del fortalecimiento de capacidades.

Anexos

Anexos

Para acceder a los anexos digitales, por favor escanee el código QR o haga clic **aquí**.

Bibliografía

Capítulos 1 y 2

Flórez-Ayala, C., Estupiñán-Suárez, L., Rojas, S., Aponte, C., Quiñones, M., Acevedo, O., Vilardy, S. Y Jaramillo, U. (2015). Colombia y su naturaleza anfibia (Los humedales del Caribe, Los humedales del Magdalena-Cauca, Los humedales del Orinoco, Los humedales del Pacífico y Metodología. Un entramado de historias). En Ú. Jaramillo, J. Cortés-Duque, C. Flórez (Eds.) *Colombia Anfibia. Un país de humedales*. Volumen 1 (pp. 56-69). Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA. (2017). *Cambio climático en Colombia. Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA, FMAM.

Instituto Humboldt [Jaramillo, Ú, Cortés-Duque, J. y Flórez, C. (Eds.)]. (2015). Colombia Anfibia. Un país de humedales. Volumen 1 Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

IPCC-Panel Intergubernamental de *Cambio Climático. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

Kosmus, M., Renner, I. y Ullrich, S. (2012). *Integración de los servicios ecosistémicos en la planificación del desarrollo. Un enfoque sistemático en pasos para profesionales basado en TEEB*. Eschborn-Quito: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Lehner, B., Verdin, K. y Jarvis, A. (2008). New global hidrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 89(10), 93-94. doi: 10.1029/2008EO100001

Martín-López, B., González, J. A., Vilardy, S., Montes, C., García-Llorente, M., Palomo, I. y Aguado, M. (2012). *Guía docente Ciencias de la Sostenibilidad. Producto final Proyecto de investigación e innovación "Formación avanzada en Ciencias de la Sostenibilidad fortaleciendo las capacidades locales para gestionar el cambio global (2011-2012)"*. Universidad del Magdalena-Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt-Universidad Autónoma de Madrid.

Millennium Ecosystem Assessment-MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.

The Nature Conservancy, Fundación Alma, Fundación Humedales y AUNAP. (2016). Estado de las planicies inundables y el recurso pesquero en la macrocuenca Magdalena-Cauca y propuesta para su manejo integrado. Bogotá, Colombia.

Unesco-IHE, TNC y TU Dresden. (2015). SimBasin Game. Recuperado de http://www.simbasin.org/

Vilardy, S., Cortés-Duque, J., Jaramillo, Ú., Flórez, C., Estupiñán, L., Aponte, C., Rodríguez J. y Peláez S. (2014). Principios y criterios para la delimitación de humedales de Colombia. En S. Vilardy y J. Cortés-Duque (Eds.) *Los humedales de Cantagallo, San Pablo y Simití: una propuesta para su delimitación desde el enfoque de los sistemas socioecológicos* (pp. 17-39). Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Capítulo 3

Angarita, H. (2014). *Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo WEAP de la macro-cuenca del Magdalena y resultados de las simulaciones*. (Ecosystem-based adaptation in the Magdalena basin – AID-514-A-13-00004, Informe del Contrato NASCA 00468/2013.) Bogotá: The Nature Conservancy-USAID.

Gangopadhyay, S., Clark, M. y Rajagopalan, B. (2005). Statistical downscaling using K-nearest neighbors. *Water Resources Research*, 41(2). doi:10.1029/2004WR003444.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA (2015a). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones – Enfoque Nacional-Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: Guau Comunicaciones.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCILLERÍA (2015b). *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá: UNATINTAMEDIOS.

Lehner, B., Verdin, K. y Jarvis, A. (2006). *HydroSHEDS Technical Documentation*. Washington, DC.: World Wildlife Fund US.

Pabón, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia-Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

Walsh, J. E., Bhatt, U. S., Littell, J. S., Leonawicz, M., Lindgren, M., Kurkowski, T. A., Bieniek, P. A., Thoman, R., Gray, S. y Rupp, T. S. (2018). Downscaling of climate model output for Alaskan stakeholders. *Environmental Modelling and Software*, 110, 38-51. doi:10.1016/j.envsoft.2018.03.021

Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A. y Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 107(D20), ACL 6-1-ACL 6-15. doi:10.1029/2001JD000659.

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. y Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62(1-3), 189-216.

Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B. y Strzepek, K. (2003). A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research*, 39(7). doi:10.1029/2002WR001769.

Capítulo 4

Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J.A., Herrera-R., G., Delgado, J. y Purkey, D. (2017) Large-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth Systems Science Discussions*. 1-39.

ANLA. (2013) . *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental* (Documento). Recuperado de: http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

Berhanu, B., Seleshi, Y., Demisse, S. S. y Melesse, A. M. (2015). *Flow regime classification and hydrological characterization: A case study of Ethiopian rivers*. *Water*, 7(6), 3149–3165.

Boyer, J. S. (1995). *Measuring the Water Status of Plants and Soils*. San Diego (EE. UU.): Academic Press.

Cigizoglu, H. K. y Bayazit M. (2000). A generalized seasonal model for flow duration curve. *Hydrological Processes*, 14(6), 1053-1067. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:63.3.CO;2-2

Domínguez, E. (2000). Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos. *Meteorología Colombiana*, 2, 33-38.

Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J. y Nathan R. J. (2004). *Stream hydrology: An introduction for ecologists*. Chichester (Reino Unido): Wiley.

IDEAM. (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Kanwar, R. S., Baker, J. L. y Mukhtar, S. (1988). Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 31(1), 133-141.

Kullback, S. y Leibler, R. A. (1951). On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, 22(1), 79-86. doi: 10.1214/aoms/1177729694

Rosenzweig, C., Iglesius, A., Yang, X. B., Epstein, P. R. y Chivian, E. (2001). Climate change and extreme weather events - Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change and Human Health*, 2(2), 90-104.

Vicente-Serrano S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E. y Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought timescales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52-57. doi: 10.1073/pnas.1207068110

Yates, D,. Sieber, J., Purkey, D. y Huber-Lee, A. (2005). WEAP: A demand, priority, and preference-driven water planning model. *Water International,* 30(4), 487-500. doi: 10.1080/02508060508691893

Capítulo 5

IDEAM. (2018). Informe del estado de los glaciares colombianos. Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023828/Estado_glaciares_colombianos.pdf

Unesco. (2009). Case Studies on Climate Change and World Heritage. París: Unesco.

Capítulo 6

Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R., G. A., Delgado, J. y Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth Systems Science*. 22, 2839-2865.

Carvajal-Quintero, J. D., Escobar, F., Alvarado, F., Villa-Navarro, F. A., Jaramillo-Villa, Ú., Maldonado-Ocampo, J. A. (2015). Variation in freshwater fish assemblages along a regional elevation gradient in the northern Andes, Colombia. *Ecology and Evolution*, 5(13), 2608-2620. doi: 10.1002/ece3.1539

Carvajal-Quintero, J. D., Januchowski-Hartley, S. R., Maldonado-Ocampo, J. A., Jézéquel, C., Delgado, J. y Tedesco, P. A. (2017). Damming fragments species ranges and heightens extinction risk. *Conservation Letters*, 10(6), 708-716. doi: 10.1111/conl.12336

Chen, I.C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. y Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026.

Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M. y Grenouillet, G. (2013). Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: Observed and predicted trends. *Freshwater Biology* 58, 625-639. doi: 10.1111/fwb.12081

Comte, L, y Olden, J. D. (2017). Climatic vulnerability of the world's freshwater and marine fishes. *Nature Climate Change*, 7, 718-722.

DoNascimiento, C., Herrera Collazos, E. E. y Maldonado-Ocampo J. A. (2018). Lista de especies de peces de agua dulce de Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia. v2.10. Asociación Colombiana de Ictiólgos. Dataset/Checklist. doi: 10.15472/numrso

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P.G. y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276

Jiménez-Segura, L. F., Galvis-Vergara, G., Cala-Cala, P., García-Alzate, C. A., López-Casas, S., Ríos-Pulgarín, M. I., Arango, G. A., Gutiérrez-Bonilla, F. y Álvarez-León, R. (2016). Freshwater fish faunas, habitats and conservation challenges in the Caribbean river basins of north-western South America. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 65-101.

Lasso, C. A., Agudelo Córdoba, E., Jiménez-Segura, L. F., Ramírez-Gil, H., Morales-Betancourt, M., Ajiaco-Martínez, R. E., Gutiérrez F. P., Usma Oviedo, J. S., Muñoz Torres, S. E. y Sanabria Ochoa, A. I. (Eds). (2011). *I. Catálogo de los recursos pesqueros continentales de Colombia*. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Lehner B. y Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15), 2171–2186. doi: 10.1002/hyp.9740

Lenoir, J. y Svenning, J. C. (2015). Climate-related range shifts - A global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography*, 38(1), 15-28. doi: 10.1111/ecog.00967

Liu, C., White, M. y Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778-789. doi: 10.1111/jbi.12058

Mojica, J. I., Usma, J. S. y Lasso, C. (Eds.). (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia (2012)*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt-Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia-WWF Colombia-Universidad de Manizales.

Olden, J. D., Kennard, M. J., Leprieur, F., Tedesco, P. A., Winemiller, K. O., & García-Berthou, E. (2010). Conservation biogeography of freshwater fishes: recent progress and future challenges. *Diversity and Distributions*, 16(3), 496-513.

Ortega-Lara, A., Cruz-Quintana, Y. y Puentes, V. (Eds.). (2015). *Dinámica de la Actividad Pesquera de Peces Ornamentales Continentales en Colombia*. Serie Recursos Pesqueros de Colombia – AUNAP. Bogotá: Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca-AUNAP.

Pacifici, M. et al. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215-225.

Patino, J. E., Estupinan-Suarez, L. M. (2016). Hotspots of Wetland Area Loss in Colombia. *Wetlands*, 36(5), 935-943. doi: 10.1007/s13157-016-0806-z

Pecl, G. T., Araujo, M. B.,, Bell, J., Blanchard, J. et al. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), 1-9.

Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapired, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Reis R. E., Albert, J. S., Di Dario, F., Mincarone, M. M., Petry, P., & Rocha, L. A. (2016). Fish biodiversity and conservation in South America. *Journal of fish biology*, 89(1), 12-47.

Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., et al. (2016). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 351(6269), 128-129.

Woodward, G., Perkins, D. M. y Brown, L. E. (2010). Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical transactions of the Royal Society B*, 365(1549), 2093-2106. doi: 10.1098/rstb.2010.0055

Zapata, L. A. y Usma, J. S. (2013). *Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia: Peces*. Volumen 2. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible/WWF-Colombia.