

Zonificación de Altos Valores de Conservación (AVC) del Complejo Cenagoso de Zapatosa (Colombia) a partir de una evaluación multicriterio

High Conservation Values (HCV) zoning of the Complejo Cenagoso de Zapatosa (Colombia) based on a multi-criteria evaluation

Lina María Parada-Alzate,* Claudia Patricia Andramunio-Acero,** Mónica Tatiana López-Muñoz,***
Yesid Fernando Rondón-Martínez† y Luis Alfredo Moreno-Pérez§

Recibido: 15/08/2024. Aceptado: 12/09/2024. Publicado: 14/11/2024.

Resumen. Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) declarado sitio Ramsar en 2018 (Convención Ramsar, 2023), alberga un alto número de hábitats y diversos grupos biológicos, además de prestar importantes servicios ecosistémicos. Sin embargo, las intervenciones antrópicas en las últimas décadas han deteriorado el ecosistema representando una amenaza para la biodiversidad de la región. Se planteó como objetivo identificar los Altos Valores de Conservación (AVC) del CCZ para la delimitación de zonas a partir de una evaluación multicriterio en un entorno de Sistemas de Información Geográfica. Para la zonificación se identificaron los AVC del CCZ teniendo en cuenta las condiciones biológicas, ecológicas y sociales del área de interés. A partir de esto, se revisaron y alistaron los insumos geográficos para cada AVC de acuerdo con los datos capturados en campo, así como información secundaria disponible. Teniendo el listado de los indicadores de cada AVC se procedió con la evaluación multicriterio mediante el proceso analítico jerárquico (Saaty, 2008) para zonificar el área a partir de la superposición

ponderada. Se describen los AVC identificados para el CCZ, se presentan diez indicadores que miden aspectos específicos como la biodiversidad o las amenazas dentro del área de estudio, representados de manera espacial en diez mapas para identificar zonas prioritarias para la conservación. Además, se generó la matriz de valoración de criterios con el cálculo de ponderaciones para la superposición, obteniendo un mapa final de zonas de AVC clasificadas según la prioridad de conservación como herramienta, para gestionar las actividades antrópicas de tal manera que se conserve el ecosistema.

Palabras clave: humedales, sistemas de información geográfica, teledetección, proceso analítico jerárquico, priorización.

Abstract. The Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ), located in northern Colombia, is recognized as the largest continental wetland in the country. It was designated as a Ramsar site in 2018, highlighting its importance for

* Profesional en Sistemas de Información Geográfica, Fundación Natura Colombia, Cra. 21 #39-43, Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0009-0001-3309-1397>. Email: lparada@natura.org.co

** Profesional de monitoreo de carbono, Fundación Natura Colombia, Cra. 21 #39-43, Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0009-0006-5008-5454>. Email: cpandramunio@natura.org.co. Autor de correspondencia.

*** Profesional hidrobiológico y de monitoreo, Fundación Natura Colombia, Cra. 21 #39-43, Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5905-2612>. Email: mtlopez@natura.org.co.

† Profesional de apoyo transversal para el monitoreo, Fundación Natura Colombia, Cra. 21 #39-43, Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0009-0002-3056-9559>. Email: yrondon@natura.org.co

§ Profesional local de apoyo al componente 1, Fundación Natura Colombia, Cra. 21 #39-43, Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0009-0000-2613-1226>, Email: lmoreno@natura.org.co

wetland conservation and protection. The CCZ harbors an extraordinary biological diversity, with habitats such as swamps, marshes, and lagoons that support a wide variety of animal and plant species.

The CCZ provides ecosystem services, such as hydrological cycle regulation, water filtration, flood protection, erosion control, and carbon storage. However, it has been impacted by human activities, such as deforestation, agrochemical pollution, drainage for agriculture, and infrastructure development.

The objective of this research was to identify the High Conservation Values (HCVs) of the CCZ to delineate priority conservation zones, using a multi-criteria evaluation within a Geographic Information Systems (GIS) environment. An HCV is a biological, ecological, social, or cultural value that is exceptionally significant or critically important. The HCV are divided into six categories: (i) species diversity, (ii) ecosystems and landscape-scale mosaics, (iii) ecosystems and habitats, (iv) ecosystem services, (v) community needs, and (vi) cultural values.

The HCVs of the CCZ were identified by considering biological, ecological, and social conditions. To achieve this, geographic inputs for each HCV were reviewed and organized based on field data and secondary information and, after compiling the indicators list, a multi-criteria evaluation was conducted using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to zone the area through weighted overlay analysis.

The results describe the identified HCVs for the CCZ and present ten indicators related to specific aspects such as biodiversity and threats within the study area, represented in ten maps to identify priority conservation zones. The zoned indicators include: 1. Key Biodiversity Areas (KBAs) for freshwater fish biodiversity; 2. Fish species distribution models for bocachico (*Prochilodus magdalenae*), bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*), pacora (*Plagioscion magdalenae*), barbul (*Pimelodus yuma*), and blaquillo (*Sorubim cuspicaudus*), generated in Maxent from presence data and environmental variables; 3. Social mapping of participatory community-based fisheries monitoring, identifying areas of influence 500 m around each point, suitable for fish reproduction, feeding, growth, and development;

4. Surface runoff values derived from the InVEST Water Yield model (water production); 5. Red List Ecosystem polygons according to IUCN risk categories; 6. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) calculated for natural ecosystems (shrubland, forest, grassland, lagoon, river, savanna, subxerophytic, swamp, and natural sandy areas) using Sentinel-2 mosaics; 7. Normalized Burn Ratio Index (NBRI) from Sentinel-2 mosaics; 8. Slope calculated from the ALOS PALSAR 12.5 m resolution Digital Elevation Model (DEM); 9. Interpolation of total fish biomass values for seven sampling zones; and 10. Artisanal fishing sites with a 100 m influence area, critical for satisfying food security needs.

Additionally, a criteria valuation matrix was created, with weight calculations for the overlay process, resulting in a final map of HCV zones classified according to conservation priority. This classification is based on their unique biodiversity, the presence of critical habitats, and the performance of essential ecological functions. The results show variability in conservation levels within the CCZ. The “Low Priority” category covers an area of 140 044.44 ha, while the “Intermediate Priority” category spans 22 234.97 ha, which may require focused attention. The “Moderate Priority”, “High Priority”, and “Very High Priority” categories cover 7 685.45 ha, 12 288.71 ha, and 10 081.38 ha, respectively, highlighting areas that require urgent actions to preserve the ecological integrity of the wetland. These findings underscore the need for differentiated management strategies to address priorities and ensure sustainability.

Nevertheless, it is clear that the entire complex constitutes an HCV, as it is a Ramsar wetland of international importance, located within the boundaries of a regional public protected area called the Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI), and is part of the intergovernmental treaty, the Convention on Wetlands of International Importance, especially as a Habitat for Waterfowl. Furthermore, it is a natural wetland (unregulated) that serves as an important migratory route for both birds (nationally and internationally) and fish within the Magdalena and Cauca River basin.

Keywords: wetlands, geographic information systems, remote sensing, analytic hierarchy process, prioritization.

INTRODUCCIÓN

Los humedales desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y en la provisión de servicios ecosistémicos, sin embargo, enfrentan altos niveles de amenazas e intervenciones (Senhadji-Navarro *et al.*, 2017). Por lo tanto, es esencial proponer e implementar prácticas de manejo para los humedales, como el propuesto para el Complejo Cenagoso de Zapatosá (CCZ), que aseguren la permanencia de estos ecosistemas y reduzcan la pérdida de las áreas naturales circundantes para

restaurar y garantizar los procesos ecológicos (Universidad del Magdalena, 2017).

Por tratarse de ecosistemas transicionales,¹ en los que la dinámica respecto a la recepción de aguas de ecosistemas lóticos es constante, se presentan procesos continuos de regeneración de la vegetación, cambios en las condiciones de humedad del suelo, al igual que muerte y descomposición

¹ Áreas que actúan como interfaz entre diferentes tipos de ecosistemas, como los humedales y los sistemas acuáticos o terrestres circundantes.

de organismos de gran importancia para el ciclo del carbono (Vega *et al.*, 2014); por esto, deben proponerse procesos como la regulación hidrológica a través de la protección de cauces y zonas ribereñas y la definición de áreas para el desarrollo de actividades económicas sostenibles (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Pontificia Universidad Javeriana, 2015). Lo anterior se puede garantizar a partir de la identificación de zonas de Altos Valores de Conservación (AVC) en los humedales, mediante la definición de indicadores representados espacialmente, tal como se efectuó para el CCZ.

Un AVC es un valor biológico, ecológico, social o cultural excepcionalmente significativo o de importancia crítica y su identificación consiste en interpretar lo que las seis definiciones de AVC (1. diversidad de especies; 2. ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje; 3. ecosistemas y hábitats; 4. servicios ecosistémicos; 5. necesidades de las comunidades y 6. valores culturales) significan en el contexto local o nacional, para luego decidir qué AVC están presentes en el área de interés o podrían verse afectados negativamente por las actividades desarrolladas en el territorio. Las evaluaciones de AVC deberían dar lugar a un informe claro de la presencia o ausencia de valores, su ubicación, estatus y condición y, en la medida de lo posible, deberían proporcionar información sobre las áreas de hábitat, los recursos clave y las áreas críticas que mantienen dichos valores, con el fin de desarrollar recomendaciones de manejo que aseguren que los AVC se mantengan o incluso se mejoren (Brown y Senior, 2014).

Una de las metodologías que se ha consolidado esencial para la zonificación² de los AVC es la evaluación multicriterio (EMC), pues ofrece un marco robusto para integrar dimensiones ambientales y socioeconómicas en la toma de decisiones. Con esta se busca identificar y priorizar áreas de conservación, a través de la definición de indicadores (medidas específicas para evaluar la importancia de las áreas en términos de sus valores de conservación,

por ejemplo, por la presencia de especies clave, la calidad del hábitat, la rareza de los ecosistemas; entre otros) y grupos de indicadores o criterios. El uso de sistemas de información geográfica (SIG) en combinación con la EMC permiten superponer y analizar múltiples capas geográficas (datos especiales relacionados con los indicadores o criterios) que representan indicadores críticos como la biodiversidad, la calidad del hábitat y las amenazas antropogénicas (Garmendia *et al.*, 2010).

Investigaciones recientes destacan la eficacia de la EMC en la identificación de áreas prioritarias para la conservación mediante técnicas como el análisis de ponderación de criterios y el modelado espacial (Mendoza y Martins, 2006). Estas técnicas facilitan una evaluación holística que considera tanto la importancia ecológica de las áreas como las presiones humanas sobre ellas, permitiendo una planificación más efectiva y basada en datos para la conservación (Pressey *et al.*, 2007). El estudio se enfoca en optimizar la EMC para la zonificación de áreas de AVC, abordando cómo integrar indicadores ecológicos y socioeconómicos en un análisis espacial robusto. Por esta razón, en el presente trabajo la EMC se abordó mediante un proceso analítico jerárquico (PAJ; Saaty, 2008) que constituye una técnica de análisis y evaluación de criterios e indicadores muy utilizada para el manejo de recursos naturales y la toma de decisiones ambientales.

La necesidad de herramientas sólidas para las acciones en conservación impulsa esta investigación, con objetivos que incluyen desarrollar un marco metodológico robusto y mejorar la integración de variables ambientales y socioeconómicas para una planificación efectiva y sostenible. Además, teniendo en cuenta que la zonificación de AVC representa un papel fundamental en escenarios de adaptación al cambio climático, al proporcionar información clave para identificar y proteger ecosistemas críticos como los humedales, se espera que estas áreas, al ser mapeadas y gestionadas adecuadamente, actúen como refugios para la biodiversidad y contribuyan a mitigar impactos negativos del cambio climático, al restaurar y mantener servicios ecosistémicos cruciales.

Este primer ejercicio de zonificación de AVC mediante herramientas SIG para el país, se convierte

² Proceso de dividir un área en diferentes zonas según su importancia para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

mitación a partir de las microcuencas definiendo un área con una extensión de 228 261.66 hectáreas (Figura 1); ajuste que permitió evaluar el complejo bajo el concepto de ecosistema de humedal, tomando en cuenta las variaciones en las dinámicas del recurso hídrico.

A pesar de su relevancia, el CCZ enfrenta amenazas, como la pérdida de hábitat debido a actividades humanas, el uso ineficiente del agua, la contaminación hídrica y del suelo, entre otras. Su conservación requiere medidas efectivas para proteger su biodiversidad y mantener la salud del sistema hidrológico, permitiendo que este ecosistema estratégico siga siendo considerado un aliado frente al cambio climático.

Zonificación de Altos Valores de Conservación (AVC)

La zonificación de AVC del CCZ consistió en cuatro fases (Figura 2), para obtener como resultado los mapas en que se representan los indicadores propuestos y un mapa final del resultado de la superposición de los AVC identificados.

Fase 1. Identificación de los AVC del área de interés
Se identificaron las categorías de los AVC que aplican para el CCZ de acuerdo con lo establecido por la High Conservation Value Resource Network (Brown y Senior, 2014):

- AVC 1. Diversidad de especies, concentraciones de diversidad biológica que contengan especies endémicas o especies raras, amenazadas o en peligro de extinción.
- AVC 2. Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje que contienen poblaciones viables de la mayoría de las especies presentes de manera natural bajo patrones naturales de distribución y abundancia.
- AVC 3. Ecosistemas y hábitats amenazados o en peligro.
- AVC 4. Servicios ecosistémicos críticos, como protección a zonas de captación de agua, control de la erosión de suelos y pendientes vulnerables.
- AVC 5. Necesidades de las comunidades locales representadas en áreas fundamentales para satisfacer las necesidades básicas (subsistencia, salud, nutrición, agua, etc.) de comunidades locales, identificadas mediante el diálogo participativo con dichas comunidades.

Fase 2. Revisión y generación de insumos geográficos para el área de estudio

Se seleccionó la información geográfica primaria y secundaria, se priorizaron los indicadores (Tabla 1), se realizó el acondicionamiento de datos geográficos, teniendo en cuenta el sistema de coordenadas, la escala y el cubrimiento espacial y se definieron

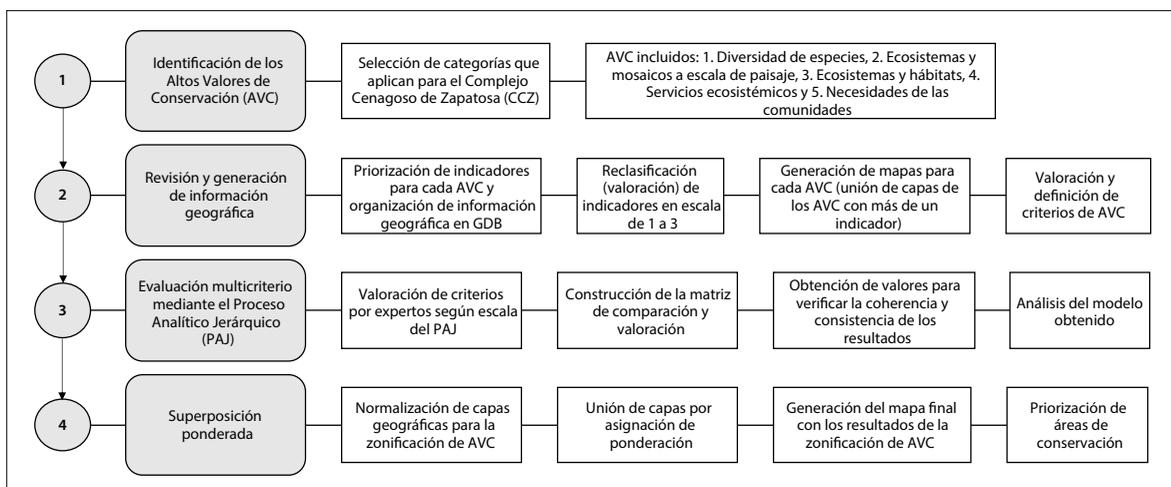


Figura 2. Fases metodológicas para la zonificación de AVC. Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 1. Descripción de insumos geográficos para los indicadores de AVC. Escala espacial: 1:25 000. Resolución espacial indicadores en formato ráster: 10 m. Área mínima cartografiable: 1.5625 ha.

Indicador	Descripción	Insumo / Fuente
AVC 1 Indicador 1. Distribución de especies de peces con grado de amenaza (CR, EN, VU).	<i>Áreas con presencia de especies prioritarias para la conservación en categoría de peligro crítico (CR), amenazadas (EN) y vulnerables (VU).</i>	Capa geográfica vectorial de Áreas Claves para la Conservación (ACC) de la biodiversidad dulceacuícola de peces. Generada para el plan de manejo del DRMI Complejo Cenagoso de Zapatosa (Fundación Natura, 2022).
AVC 1 Indicador 2. Distribución potencial de especies de peces.	Hábitats en los que la ictiofauna desarrolla la totalidad (especies residentes) o parte de su ciclo de vida (especies de hábito migratorio) y está relacionado con las estrategias de supervivencia (alimentación, reproducción, crecimiento, dispersión), así como factores hidroclimáticos.	Capa geográfica ráster con la compilación de los modelos de distribución de cinco especies priorizadas: <i>Prochilodus magdalenae</i> , <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i> , <i>Plagioscion magdalenae</i> , <i>Pimelodus yuma</i> , <i>Sorubim cuspicaudus</i> . Modelación en Maxent a partir de datos de presencia capturados en campo y datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF), junto con variables ambientales de precipitación, temperatura mínima, media y máxima, radiación solar, velocidad del viento.*
AVC 1 Indicador 3. <i>Áreas de uso temporal crítico para peces.</i>	Zonas potenciales donde los peces desarrollan un proceso vital como reproducción (por ej., rutas de migración, áreas de desove y refugios, entre otros) o alimentación.	Capa geográfica vectorial generada a partir de cartografía social de monitoreo comunitario participativo pesquero, identificando <i>áreas de influencia de 500 m a la redonda de cada punto</i> , aptas para la reproducción, alimentación, crecimiento y desarrollo de los peces.*
AVC 2 Indicador 4. Sistemas de agua dulce con patrones hídricos intactos	Sistemas hídricos con funcionamiento intacto permitiendo que el humedal controle de manera natural las inundaciones; se mantiene el hábitat para la flora y fauna asociada y a largo plazo conservar la capacidad adaptativa para mantener la producción de esos bienes y servicios ecosistémicos.	Capa geográfica ráster generada con el modelo hidrológico InVEST Water Yield (producción de agua) y obteniendo como resultado el valor de escorrentía superficial.*
AVC 3 Indicador 5. Ecosistemas en riesgo, amenaza y peligrosidad (RAP)	Ecosistemas en diferentes categorías de amenaza tales como vulnerables (VU), en peligro (EN) y en peligro crítico (CR).	Capa geográfica vectorial de la Lista Roja de Ecosistemas de la UICN (Keith <i>et al.</i> 2013) recortada para el área de estudio donde se representan los ecosistemas evaluados según las categorías de riesgo de la UICN.
AVC 3 Indicador 6. Ecosistemas naturales con altos valores de vigor de la vegetación	Valores altos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) que indica mayor densidad y salud de la vegetación asociada al humedal (bosques, arbustales, herbazales y otra vegetación leñosa inundable).	Capa geográfica ráster con el NDVI calculado para ecosistemas naturales (arbustal, bosque, herbazal, laguna, río, sabana, subxerofítia, zona pantanosa, zonas arenosas naturales) a partir del mosaico Sentinel-2.*

Tabla 1. Continúa.

Indicador	Descripción	Insumo / Fuente
AVC 3 Indicador 7. Superficies quemadas y en regeneración	<i>Áreas con grado de quema y áreas en regeneración</i> para comprender cómo los ecosistemas de humedal se recuperan naturalmente después de un incendio y cuánto tiempo puede llevar este proceso.	Capa geográfica ráster con el Índice de Quemadas Normalizado (NBRI) calculado para el área de interés a partir del mosaico Sentinel-2.*
AVC 4 Indicador 8. Zonas críticas para la gestión o el mantenimiento de eventos extremos relacionados con el caudal	Valores de pendiente (%) por prever la propagación de inundaciones, ya que áreas con pendientes pronunciadas aceleran el flujo del agua mientras que las pendientes suaves permiten un flujo más gradual como es el caso de los humedales.	Capa geográfica ráster con la pendiente calculada a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución espacial para el periodo 2006 a 2011*.
AVC 5 Indicador 9. Biomasa de peces por área de pesca	Peso total de la pesca artesanal realizada con fines comerciales y de subsistencia, por área (zonas de pesca o caladeros), en una unidad de tiempo determinada.	Capa geográfica ráster con la interpolación de los valores del peso total de la pesca (biomasa) para siete zonas de muestreo.*
AVC 5 Indicador 10. Sitios y recursos para satisfacer necesidades básicas	Sitios cuyas condiciones ambientales garanticen la mayor representatividad (en especies y biomasa) de peces considerando además las variaciones hidro climáticas.	Capa geográfica vectorial representando los sitios donde los pescadores realizan actividades de pesca artesanal, con un área de influencia de 100 m, como lugares fundamentales para conseguir el sustento que les garantiza satisfacer sus necesidades alimentarias.*

* Capa propia: año de generación 2023. Fuente: elaboración propia (2024).

los métodos para generar insumos de cada variable.

Al contar con la información geográfica de los indicadores, se reclasificaron los valores en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia para unificar la clasificación (Tabla 2).

Con las capas geográficas reclasificadas se generaron nuevos archivos en los que se representan las *áreas con AVC*. En aquellos casos en que para el AVC identificado se planteó más de un indicador, se unieron las capas geográficas para tener una capa final por cada criterio, y así tomar en cuenta los polígonos que representan cada AVC desde una perspectiva de conservación. Para esto se sumaron los valores de los indicadores específicos luego de ser reclasificados (Tabla 2). Los mapas resultantes muestran la suma de estos valores, y posteriormente se asignaron los valores de la Tabla 3 para obtener una representación consolidada de la diversidad en los AVC; el sistema de puntuación consideró la

importancia de diferentes áreas en función de los criterios establecidos.

Se hizo la conversión de formato vectorial a ráster a partir del valor asignado y a las celdas vacías se les asignó un valor de 0 definida como 'No aplica'.

Fase 3. Evaluación multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico

Se utilizó la evaluación multicriterio (EMC) y se creó la matriz de comparación entre criterios, según la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), donde se aplican procesos de decisiones multicriterio, cuyo uso permite solucionar problemas complejos que involucran diferentes variables o indicadores (Saaty, 2008), en este caso los AVC. Los criterios se valoraron teniendo en cuenta los niveles jerárquicos del PAJ con la participación de expertos (Fuenzalida Díaz *et al.*, 2013), que se usa como una regla de decisión sobre la importancia relativa de

Tabla 2. Valoración de los indicadores para la reclasificación de la información geográfica.

Indicador	Clases	Valor
Distribución de especies de peces con grado de amenaza (CR, EN, VU).	Presencia	1
	Probabilidad muy alta	3
Distribución potencial de especies de peces.	Probabilidad alta	2
	Probabilidad media	1
Áreas de uso temporal crítico.	Presencia	1
	Alta escorrentía	2
Sistemas de agua dulce con patrones hídricos intactos	Moderada escorrentía	1
	Ecosistemas en peligro crítico (CR)	3
Ecosistemas en riesgo, amenaza o peligro (RAP)	Ecosistemas amenazados (EN)	2
	Ecosistemas vulnerables (VU)	1
Ecosistemas naturales con altos valores de vigor de la vegetación	Muy alto vigor	2
	Alto vigor	1
Superficies quemadas y en regeneración	Áreas quemadas	2
	Áreas en regeneración	1
Zonas críticas para la gestión o el mantenimiento de eventos extremos relacionados con el caudal	Pendiente plana	2
	Pendiente plano cóncava y ligeramente plana	1
Biomasa de peces por área de pesca	Muy alta	3
	Alta	2
	Media	1
Sitios y recursos para satisfacer necesidades básicas	Presencia	1

Fuente: elaboración propia (2024).

cada criterio, resultante del proceso analítico. Para esto, se creó una matriz de clasificación, en donde cada experto dio un peso referido a la importancia o preferencia a cada criterio frente a los demás.

El PAJ define una jerarquía por niveles de importancia: el nivel (0) presenta el objetivo de investigación, el nivel (1) los criterios considerados para la zonificación de AVC, el nivel (2) los factores representados por los indicadores, en el nivel (3) se generan las alternativas y en el nivel (4) las decisiones.

Los cinco AVC se definieron como criterios, tomados como puntos de referencia para la toma de decisiones, medidos o caracterizados de acuerdo con la importancia, y valorados según el proceso de evaluación multicriterio (Gómez Delgado y Barredo Cano, 1996).

Los indicadores representaron características de la biodiversidad, de los hábitats y del ecosistema como tal (Gómez Delgado y Barredo Cano, 1996); por ejemplo, el CCZ se nutre principalmente de los ríos César y Magdalena, y su régimen hidroclimático bimodal (Restrepo *et al.*, 2021), combinado con pendientes que varían de planas a ligeramente inclinadas, facilita el flujo y la conectividad entre el plano inundable y sus tributarios, favoreciendo así las dinámicas biológicas asociadas a estas condiciones. En este contexto, la ictiofauna se destaca por reunir atributos para describir la relevancia del CCZ (Tabla 1) al ser un ecosistema importante para procesos de su ciclo de vida (Jiménez-Segura y Lasso, 2021), entre ellos, aspectos reproductivos de especies migratorias (Moreno-Arias *et al.*, 2021),

Tabla 3. Valores y descripción de las clases finales para cada AVC del Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ).

Criterio	Valor	Definición
AVC 1 Diversidad de especies	5	Máxima diversidad de especies
	4	Alta diversidad de especies
	3	Diversidad promedio de especies
	2	Moderada diversidad de especies
	1	Baja diversidad de especies
	0	No aplica
AVC 2 Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje	2	Alta conectividad de los sistemas de agua dulce
	1	Moderada conectividad de los sistemas de agua dulce
	0	No aplica
AVC 3 Ecosistemas y hábitats	7	Ecosistemas, hábitats o refugios conservados y resilientes
	6	Ecosistemas, hábitats o refugios estables
	5	Ecosistemas, hábitats o refugios en estado de preocupación
	4	Ecosistemas, hábitats o refugios vulnerables
	3	Ecosistemas, hábitats o refugios en peligro moderado
	2	Ecosistemas, hábitats o refugios en peligro severo
	1	Ecosistemas, hábitats o refugios en peligro crítico
0	No aplica	
AVC 4 Servicios ecosistémicos	2	Pendientes estables
	1	Pendientes vulnerables
	0	No aplica
AVC 5 Necesidades básicas de comunidades locales	4	Alta importancia para comunidades locales
	3	Significativa importancia para comunidades locales
	2	Moderada importancia para comunidades locales
	1	Poca o importancia para comunidades locales
	0	No aplica

Fuente: elaboración propia (2024).

con algún grado de vulnerabilidad (IUCN, 2024) que a su vez sostienen la pesquería artesanal y, aportan a la seguridad alimentaria de las comunidades locales (AUNAP, 2024).

Para evaluar estos criterios, se construyó la matriz de comparación y se asignó la valoración, de acuerdo con la escala jerárquica del 1 al 9 (Saaty, 2008); cada celda representa la comparación de la importancia del criterio *i* frente al criterio *j*. A partir de los datos numéricos se calculó la moda para completar la matriz (Tabla 4). Posteriormente, la matriz se normalizó calculando el vector propio

Tabla 4. Matriz de comparación de criterios de altos valores de conservación (AVC).

	C1	C2	C3	C4	C5	W_i	C_i
C1	1.00	3.00	3.00	7.00	9.00	3.55	0.46
C2	0.33	1.00	3.00	5.00	9.00	2.14	0.27
C3	0.33	0.33	1.00	7.00	9.00	1.48	0.19
C4	0.14	0.20	0.14	1.00	3.00	0.41	0.05
C5	0.11	0.11	0.11	0.33	1.00	0.21	0.03

Fuente: diligenciada según la valoración de expertos.

(W_i), que representa los pesos relativos de los criterios, y el índice de consistencia (C_i) dividiendo el vector propio por la suma de los elementos de cada fila, asegurando la coherencia y obteniendo los pesos finales.

Se evaluó la consistencia de la matriz calculando $\lambda_{max} = \sum \lambda_i$, cuyo valor debe acercarse al número de variables independientes (n), que para este caso fue 5.46 (Tabla 5), indicando que hay consistencia debido a que se usaron cinco criterios.

Luego se calculó el Índice de Consistencia (CI) para determinar la desviación del vector λ_{max} respecto a n , y el Índice de Consistencia Aleatorio (RCI):

$$C_i = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.114 \quad RCI = \frac{1.98 * (n - 2)}{n} = 1.188$$

Lo anterior para hallar la relación de la consistencia ($CR = CI / RCI$); mientras menor sea la CR, más consistentes son los criterios dados por los especialistas; pero si la CR, es mayor a 0.10 los criterios son inconsistentes. Para este estudio la CR fue igual a 0.0961, indicando consistencia en los criterios definidos para la zonificación de los AVC del CCZ.

Finalmente, se analizó el modelo, la emisión de juicios y las evaluaciones que se generaron de la matriz de comparaciones para proceder con la superposición ponderada a partir de los pesos calculados.

Fase 4. Superposición ponderada para la zonificación de AVC

Se procedió con la superposición ponderando cada valor de los AVC, de acuerdo con los pesos calculados (Tabla 7) a partir de la matriz de valoración de criterios (Tabla 6).

Primero se hizo un proceso de 'Dissolve' para evitar conflictos de superposición, con el fin de unificar campos que tuvieran la misma información en los atributos de las clases y descripciones. Luego, mediante la unión de las capas geográficas de los cinco AVC, se hizo la combinación de atributos en función de la relación espacial o de atributos comunes para obtener las zonas finales. Sobre esta capa se hizo la sumatoria de los valores de los cinco

Tabla 5. Evaluación de la consistencia para la matriz construida para la EMC

Criterio	λ_i
C1	0.88
C2	1.27
C3	1.37
C4	1.08
C5	0.85
λ_{max}	5.46

Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 6. Pesos calculados para la superposición ponderada

Criterio	AVC	Peso (%)
1	AVC 1 - Diversidad de especies	46
2	AVC 2 - Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje	27
3	AVC 3 - Ecosistemas y hábitats	19
4	AVC 4 - Servicios ecosistémicos	5
5	AVC 5 - Necesidades de las comunidades locales	3
Total	100	

Fuente: elaboración propia (2024).

criterios, se calculó el promedio de los valores (sum / 5) y el valor ponderado:

$$\text{Suma ponderada} = (C1 * 0.46) + (C2 * 0.27) + (C3 * 0.19) + (C4 * 0.05) + (C5 * 0.03)$$

Donde, C_i es el valor de cada criterio.

Finalmente, los resultados de la superposición ponderada se interpretaron mediante la creación de clases basadas en los valores resultantes de la zonificación, estableciendo rangos a través del método de quiebres naturales de Jenks, que busca minimizar la varianza interna dentro de cada clase y maximizar la varianza entre clases. A partir de las clases se diferenciaron las áreas en el humedal, buscando optimizar la conservación y equilibrar de manera justa el uso humano y la protección ambiental.

Tabla 7. Clasificación de valores para las zonas de AVC para el CCZ.

Clase	Nombre clase	Rango	Definición
1	Prioridad baja	0.03-0.90	Zonas con AVC de resiliencia climática. contribuyendo al manejo de impactos climáticos, pero ocupando una posición menos crítica en la jerarquía general.
2	Prioridad intermedia	0.92-1.39	Zonas que no alcanzan los niveles más altos en todos los criterios evaluados pero que deben ser restauradas o rehabilitadas para mejorar su importancia ecológica.
3	Prioridad moderada	1.40-1.87	Zonas de uso sostenible que presentan características paisajísticas únicas, conectividad ecológica y potencial de regeneración natural. Se permite cierto nivel de actividad humana controlada, equilibrando la conservación con el uso del suelo.
4	Prioridad alta	1.88-2.44	Zonas consideradas hábitats clave con valores sustanciales en términos de biodiversidad, de importancia única para el funcionamiento del humedal.
5	Prioridad muy alta	2.45-3.70	Zonas consideradas núcleos de conservación por obtener los valores más altos en la superposición ponderada, críticas para la conservación y esenciales para la salud a largo plazo del ecosistema.

Fuente: elaboración propia (2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron de manera precisa áreas con AVC que reflejan la riqueza y singularidad de las coberturas terrestres y ecosistemas presentes en el área de estudio, permitiendo comprender la compleja interacción de factores que contribuyen a la biodiversidad (Gómez y Barredo, 2005).

Capas geográficas reclasificadas

Como resultado del proceso se obtuvo una representación cartográfica coherente y comparable de los indicadores evaluados. Las clases presentadas en la Tabla 2 de la metodología, proporcionan una visión sistemática y unificada de la adecuación o preferencia de las áreas analizadas en términos de su idoneidad con respecto a los AVC.

En la Figura 3 se presentan los mapas de los tres indicadores del AVC 1: en el mapa del indicador 1 se muestran los polígonos donde las especies de peces con grado de amenaza se reportaron (CR, EN, VU), en el mapa del indicador 2 las áreas con probabilidad significativa de albergar las cinco especies prioritarias, categorizadas según su distribución potencial, y en el mapa del indicador 3 las áreas propicias para el uso temporal crítico de los peces, detallando condiciones óptimas como calidad del

agua, temperatura adecuada, hábitat idóneo y otros factores. A partir de estos tres indicadores se identificaron áreas donde se concentran especies de peces, lo que ayuda a reconocer los hábitats críticos para la supervivencia de las especies e implementar medidas de conservación específicas para proteger estos ecosistemas (Babcock *et al.*, 2005).

En el mapa del indicador 4 (Figura 4), se delimitan los sistemas de agua dulce con patrones hídricos intactos, destacando las áreas con escurritía superficial alta (> 135 mm/pixel) y media (120-134 mm/pixel). Este indicador se centra en el flujo de agua que se desplaza por la superficie del suelo en lugar de penetrar en este, y está vinculado a factores como la precipitación, la disponibilidad de agua en el suelo, la evapotranspiración y las coberturas asociadas. La representación visual de estos patrones ofrece una perspectiva sobre la dinámica de los recursos hídricos del área de interés, contribuyendo a la comprensión de la interrelación entre los sistemas acuáticos y los factores ambientales circundantes. Así, se identifican áreas críticas de recarga y drenaje hacia los humedales, permitiendo priorizar su protección y restauración para conservar su calidad y cantidad de agua, así como la biodiversidad; además, estos modelos son fundamentales para evaluar el impacto del cambio

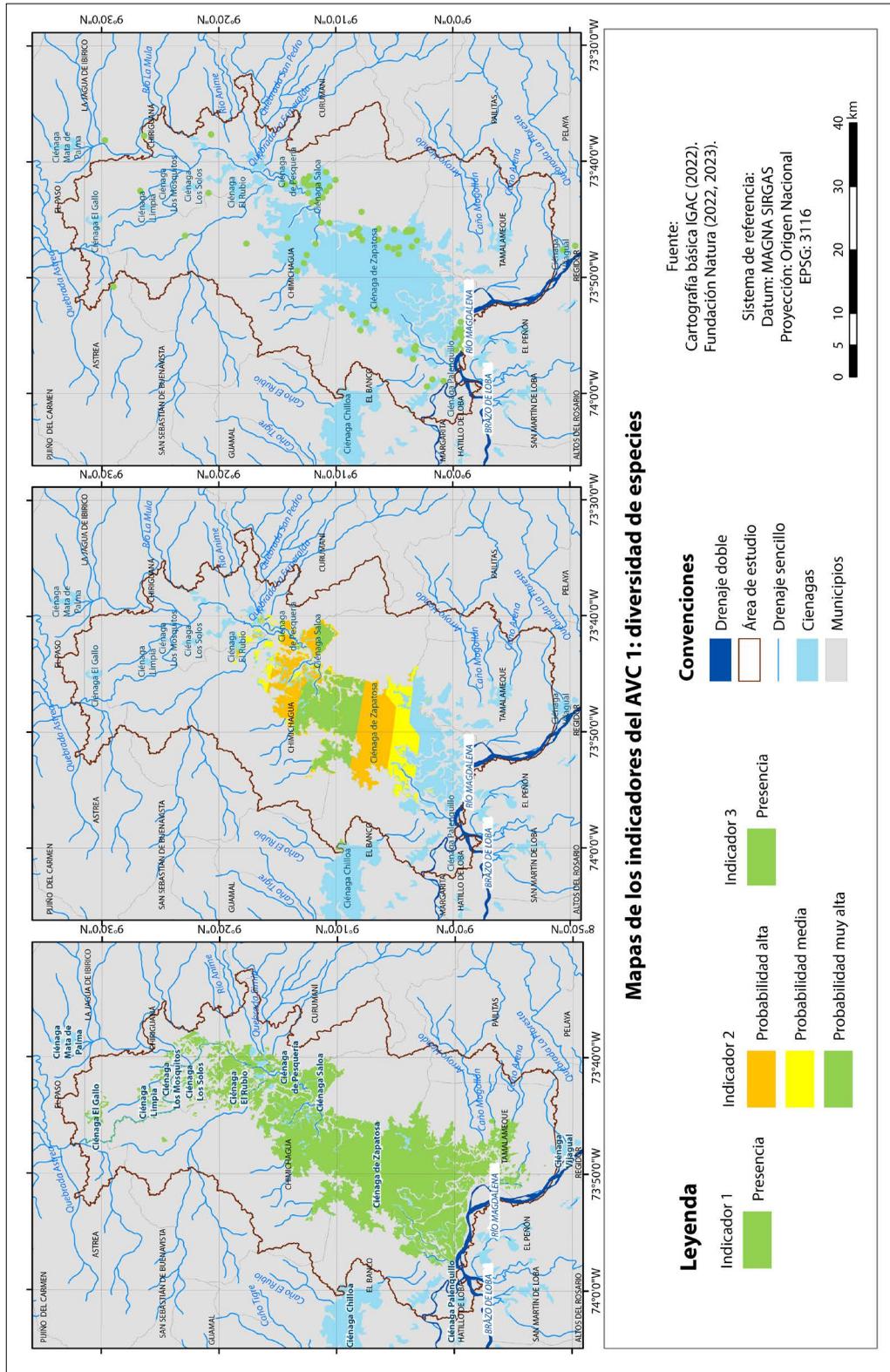


Figura 3. Mapas de los indicadores 1, 2 y 3 del AVC 1. Fuente: elaboración propia (2024).

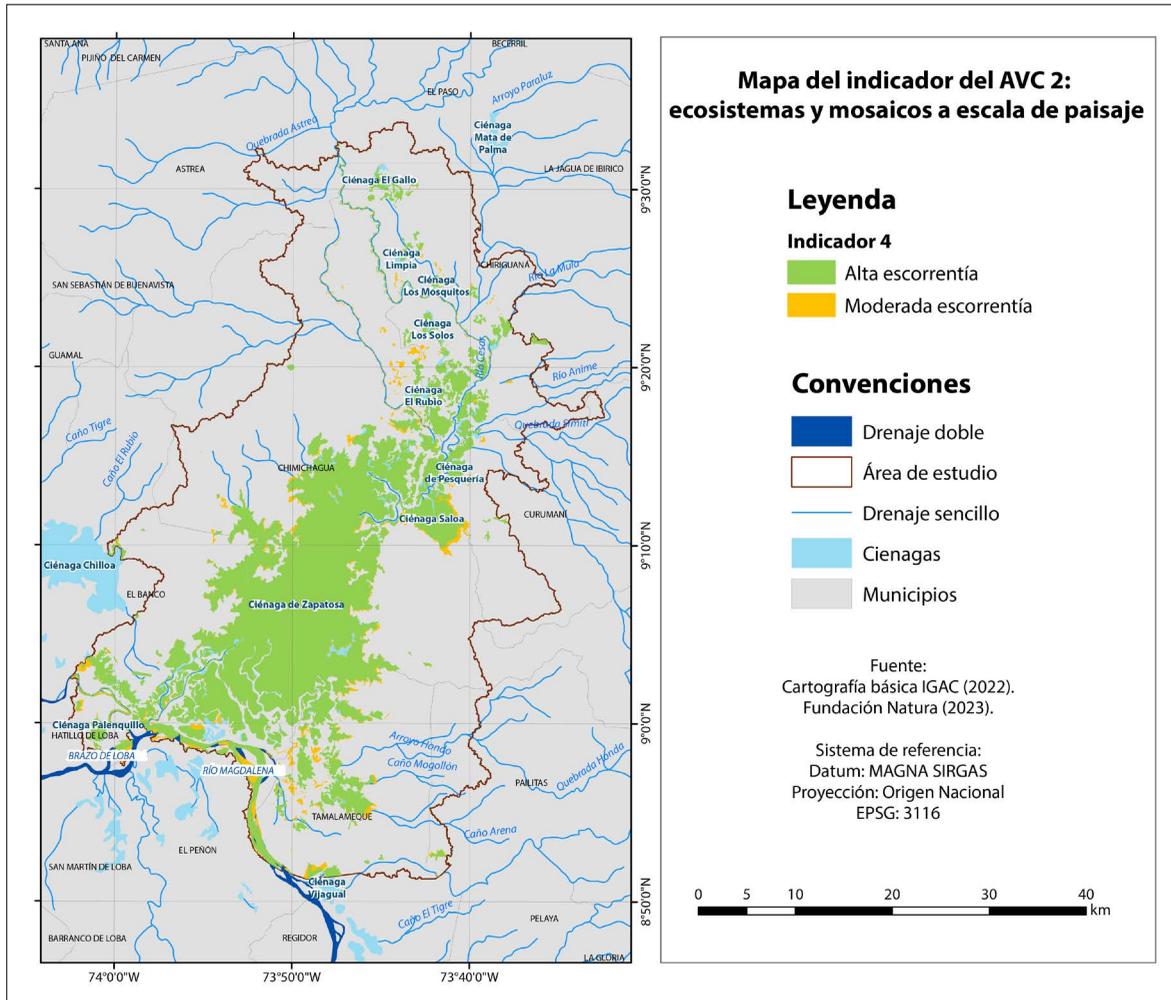


Figura 4. Mapa del indicador 4 del AVC 2. Fuente: elaboración propia (2024).

climático en los patrones hidrológicos de los humedales, facilitando la formulación de estrategias de adaptación y mitigación para proteger estos ecosistemas vulnerables (Vagaría y Gaspari, 2010).

El conjunto de mapas de los indicadores 5, 6 y 7 (Figura 5) proporcionaron una visión integral de la salud y la dinámica de los ecosistemas del CCZ. En el mapa del indicador 5 se detallan las áreas evaluadas en peligro crítico (CR) con un valor de 1, mientras que aquellas en peligro (EN) y vulnerables (VU) tienen valores de 2 y 3, respectivamente. Por otro lado, el mapa del indicador 6 revela los ecosistemas naturales con vigor de la vegetación muy alto (> 0.5) y alto (0.3-0.49). Por último, el

mapa del indicador 7 ilustra las superficies afectadas por quemadas (> 0.1) y aquellas en proceso de regeneración de vegetación luego de las quemadas (< -0.25 y -0.25– -0.1), representando los eventos de fuego y los procesos de recuperación en curso. Estos mapas proveen herramientas para comprender la complejidad y la interconexión de aspectos ambientales en el área estudiada, principalmente los índices espectrales brindan detalles del estado de la vegetación, tanto en condiciones estables como en condiciones de intervención como las quemadas (Fernando Ávila Vélez, 2019; Zhou *et al.*, 2009).

El mapa del indicador 8 (Figura 6) destaca las zonas críticas para la gestión o mantenimiento

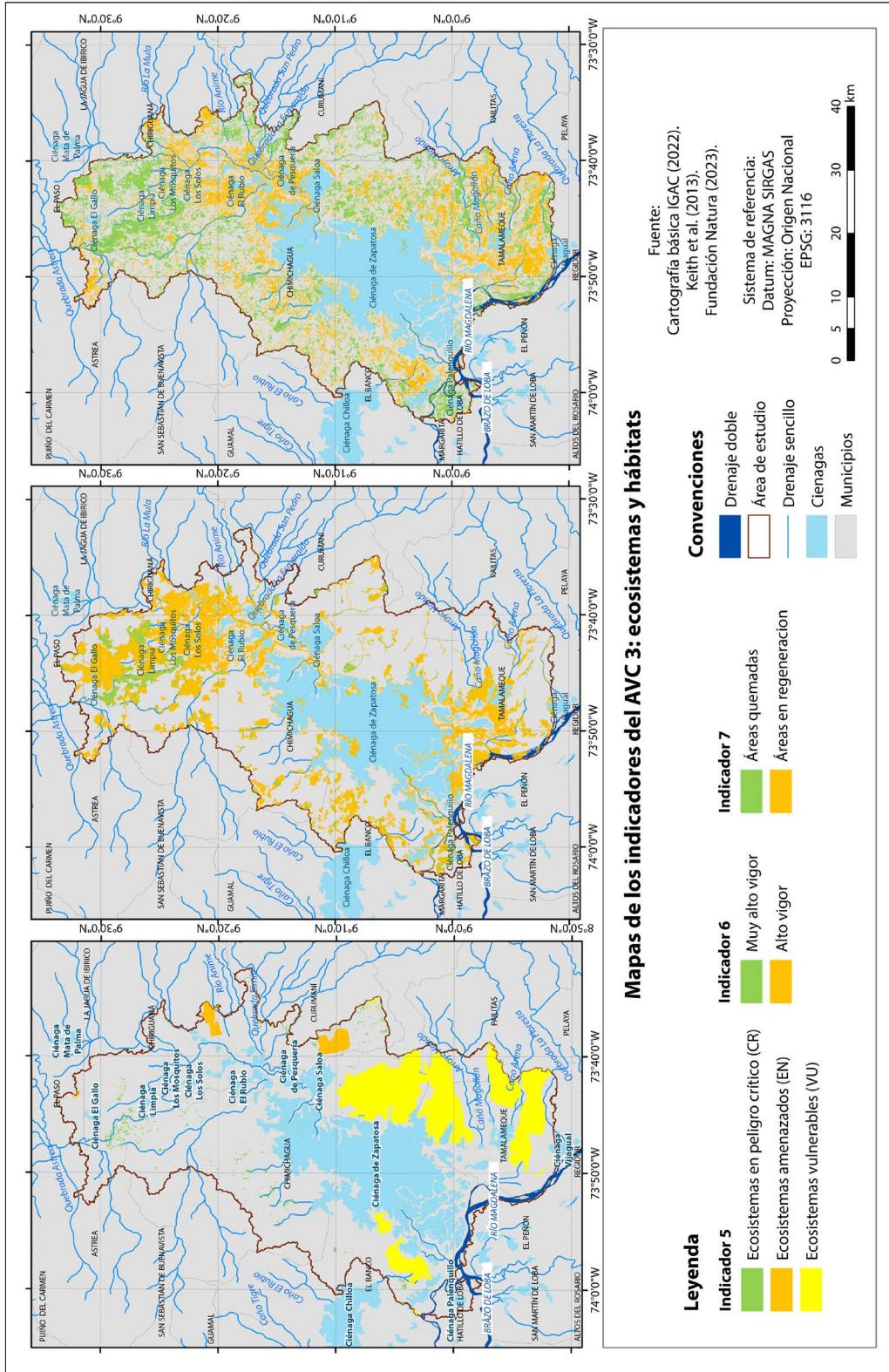


Figura 5. Mapa de los indicadores 5, 6 y 7 del AVC 3. Fuente: elaboración propia (2024).

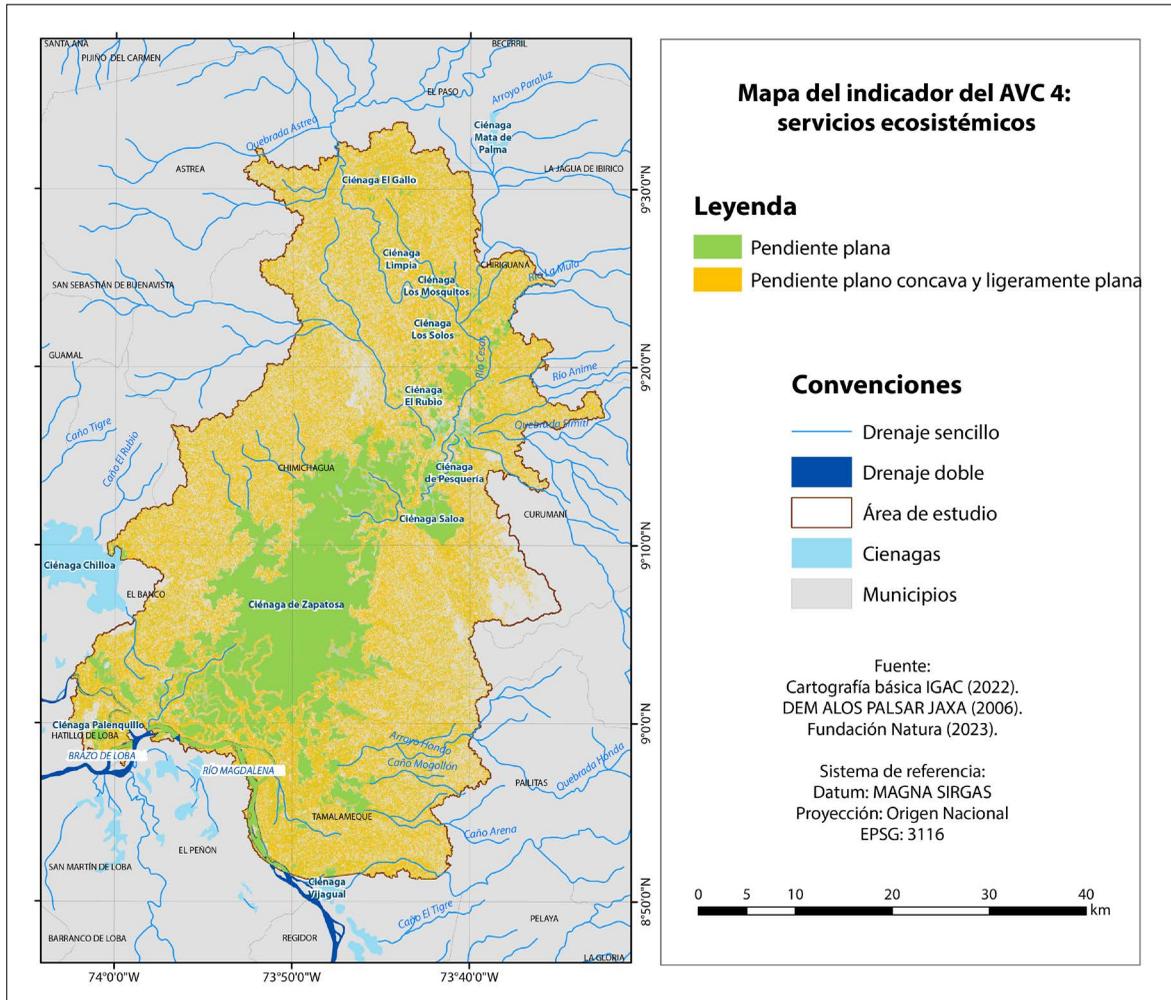


Figura 6. Mapa del indicador 8 del AVC 4. Fuente: elaboración propia (2024).

de eventos extremos relacionados con el caudal, representando áreas con pendiente plana (0-1%), plano cóncava y ligeramente plana (1-3%). La selección de estas áreas se basa en consideraciones para la conservación de humedales, teniendo en cuenta factores como la vegetación circundante, la geología y necesidades específicas de las especies. La pendiente de estas regiones se ajusta, de manera general, a un rango suave, facilitando el flujo de agua a una velocidad adecuada y evitando pendientes empinadas que causen erosión del suelo o pérdida de hábitat; por tanto, este mapa proporciona información crucial para la gestión sostenible de eventos extremos relacionados con

el caudal, contribuyendo así a la conservación de entornos acuáticos (Stei *et al.*, 2004).

Respecto a los dos indicadores del AVC 5 (Figura 7), el mapa del indicador 9 representa la biomasa de peces por área de pesca, identificando las áreas con valores de biomasa más destacados y clasificándolas como muy alta (> 60), alta (50-59) y media (40-49); estos datos geográficos son esenciales para la gestión pesquera, permitiendo una evaluación precisa de las áreas con abundancia significativa del recurso. Por otro lado, el mapa del indicador 10 destaca los sitios y recursos cruciales para satisfacer necesidades básicas de las comunidades, en particular los caladeros o zonas de pesca con un área de

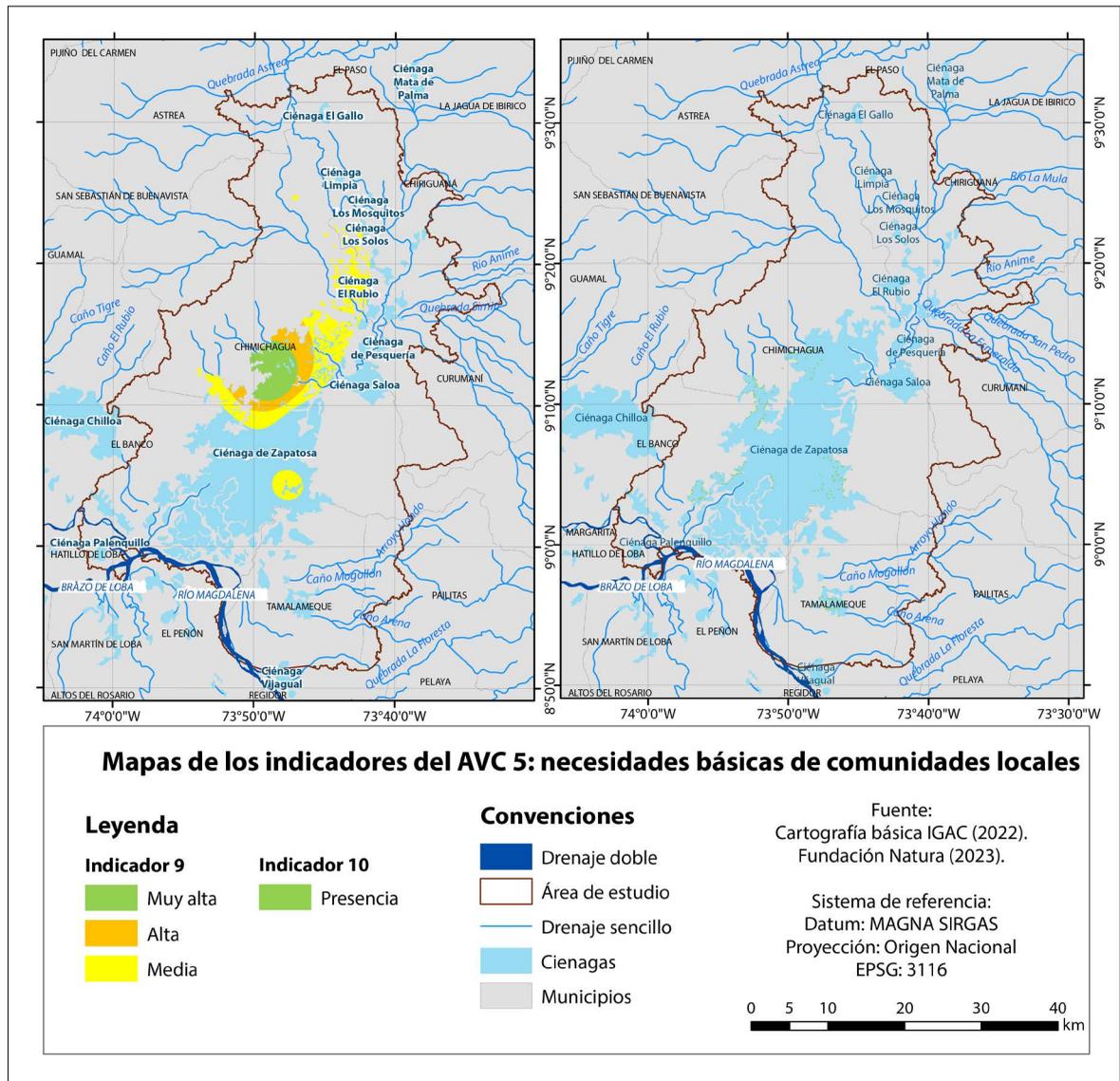


Figura 7. Mapa de los indicadores 9 y 10 del AVC 5. Fuente: elaboración propia (2024).

influencia de 100 metros (valor = 1). Estas regiones geográficas son identificadas como sitios donde la pesca se realiza regularmente, caracterizadas por una alta diversidad de especies de peces, convirtiéndolas en recursos naturales vitales tanto para la industria pesquera como para la alimentación humana (Olaya Rodríguez *et al.*, 2017).

Como parte del proceso de evaluación de AVC para el CCZ, mediante la integración de capas geográficas correspondientes a los indicadores, se

crearon las capas finales para cada criterio (AVC 1 al 5, Figura 8). La interpretación del resultado final de cada AVC se facilitó mediante el sistema de puntuación propuesto, que resalta la importancia de las áreas en función de los criterios establecidos (Tabla 3).

El análisis comparativo de las áreas asignadas a las clases del AVC 1, diversidad de especies, revela notables disparidades. La categoría “Baja diversidad de especies” se destaca con la mayor extensión

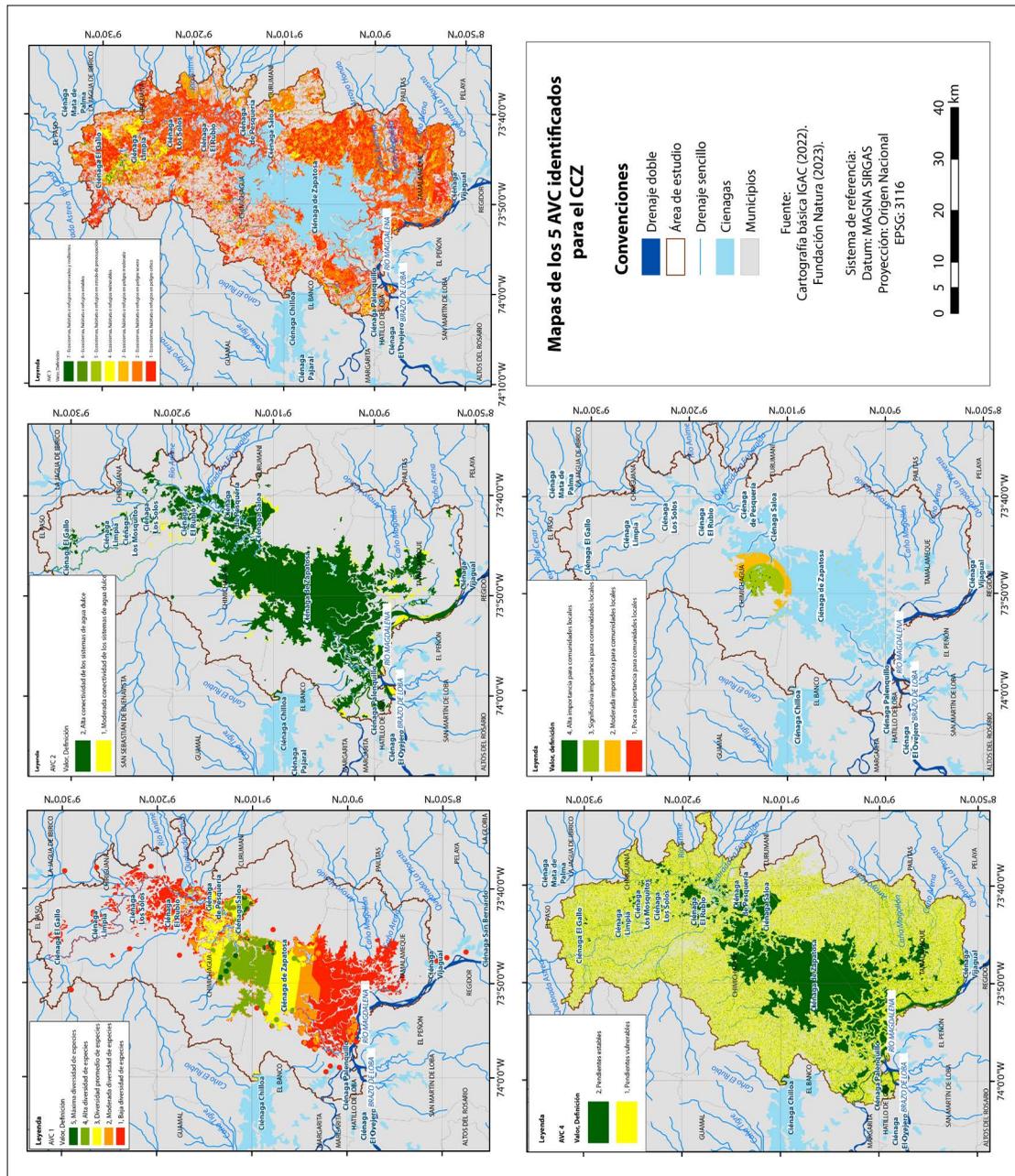


Figura 8. Mapas de los 5 AVC del CCZ según la clasificación de valores. Fuente: elaboración propia (2024).

de 28 589.30 hectáreas, mientras que “Máxima diversidad de especies” presenta la menor área, con solo 719,90 hectáreas. Las clases intermedias, como “Moderada diversidad de especies”, “Diversidad promedio de especies” y “Alta diversidad de especies” muestran variaciones significativas en sus extensiones. Este análisis destaca la importancia de considerar la distribución espacial de la biodiversidad en función de las áreas asignadas a cada clase.

Para el AVC 2, ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje, se presenta la clase “Moderada escorrentía” que sugiere que hay una relación equilibrada entre la cantidad de agua que fluye y la conexión entre los cuerpos de agua en el área de interés, con un área de 4 010.24 hectáreas. En comparación, la clase “Alta escorrentía” presenta una extensión significativamente mayor, alcanzando un total de 55 401,69 hectáreas, indicando un flujo de agua sustancialmente elevado en la zona. Esta diferencia en áreas sugiere una relación directa entre la intensidad de la escorrentía y la conectividad de los sistemas de agua dulce, facilitando la comprensión de la dinámica hídrica del CCZ.

El análisis comparativo de áreas asignadas a las clases del AVC 3, ecosistemas y hábitats, revela disparidades notables en los niveles de peligro y conservación. La clase “Ecosistemas en peligro crítico” presenta la mayor ocupación con 61 365.80 hectáreas, señalando una situación de conservación crítica del CCZ; contrariamente, la clase “Ecosistemas conservados y resilientes” presenta la menor área, con 338.80 hectáreas, indicando un estado más favorable y resiliente. Entre estas áreas extremas, las clases intermedias reflejan áreas con grados variables de amenaza y vulnerabilidad, resaltando la importancia de abordar la conservación en áreas críticas, señalando la urgencia de medidas específicas para fortalecer la resiliencia en ecosistemas más pequeños pero conservados.

En cuanto a los mapas resultantes del AVC 4, servicios ecosistémicos, demuestran que las pendientes vulnerables abarcan una extensión mayor, con 66 511.27 hectáreas, en comparación con las 63 978.21 hectáreas de las pendientes estables. Esta diferencia sugiere una distribución significativa de terrenos más propensos a la vulnerabilidad en el área de estudio, aspecto fundamental para

la planificación del uso del suelo, resaltando la importancia de adoptar medidas específicas en las zonas con pendientes vulnerables.

A partir del último mapa de los AVC, para el AVC 5, necesidades de las comunidades locales, las áreas revelan que la clase “Poca importancia para comunidades locales” se destacan con la mayor extensión de 8 618.73 hectáreas, sugiriendo que una porción considerable del área de estudio posee poca relevancia directa para las comunidades del área de estudio. En contraste, las clases de “Moderada importancia para comunidades locales” y “Significativa importancia para comunidades locales” abarcan extensiones más limitadas (2 895.18 y 3 090.05 hectáreas respectivamente), indicando áreas más específicas pero significativas para las comunidades del CCZ. La clase “Alta importancia para comunidades locales” muestra la menor extensión, con 66.00 hectáreas, resaltando su relevancia, aunque en áreas geográficas más pequeñas.

Mapa final con las zonas de AVC

Los resultados de la superposición ponderada se clasificaron para facilitar su interpretación (Carver, 1991). Dado que la prioridad de conservación puede variar según los criterios, la información geográfica disponible y la ponderación aplicada (Garmendia *et al.*, 2010), se estableció una clasificación general basada en cinco niveles de prioridad, desde el más bajo hasta el más alto. Esta clasificación refleja cómo la información geográfica utilizada en la evaluación multicriterio influye en la determinación de las zonas prioritarias para la conservación (Del Amo *et al.*, 2007) del CCZ, de las que hacen parte los polígonos que representan las superficies de agua, así como los de coberturas terrestres e inundables que componen el humedal.

El mapa de zonificación de AVC del CCZ (Figura 8) proporciona una representación detallada de las zonas prioritarias para la conservación ambiental. Estas áreas son identificadas por su significativa importancia debido a su biodiversidad excepcional, hábitats críticos o funciones ecológicas esenciales, que son fundamentales para mantener la salud ecosistémica del humedal y su capacidad para albergar vida silvestre. Cabe resaltar que, dado que el 50% de los indicadores seleccionados para los AVC (los

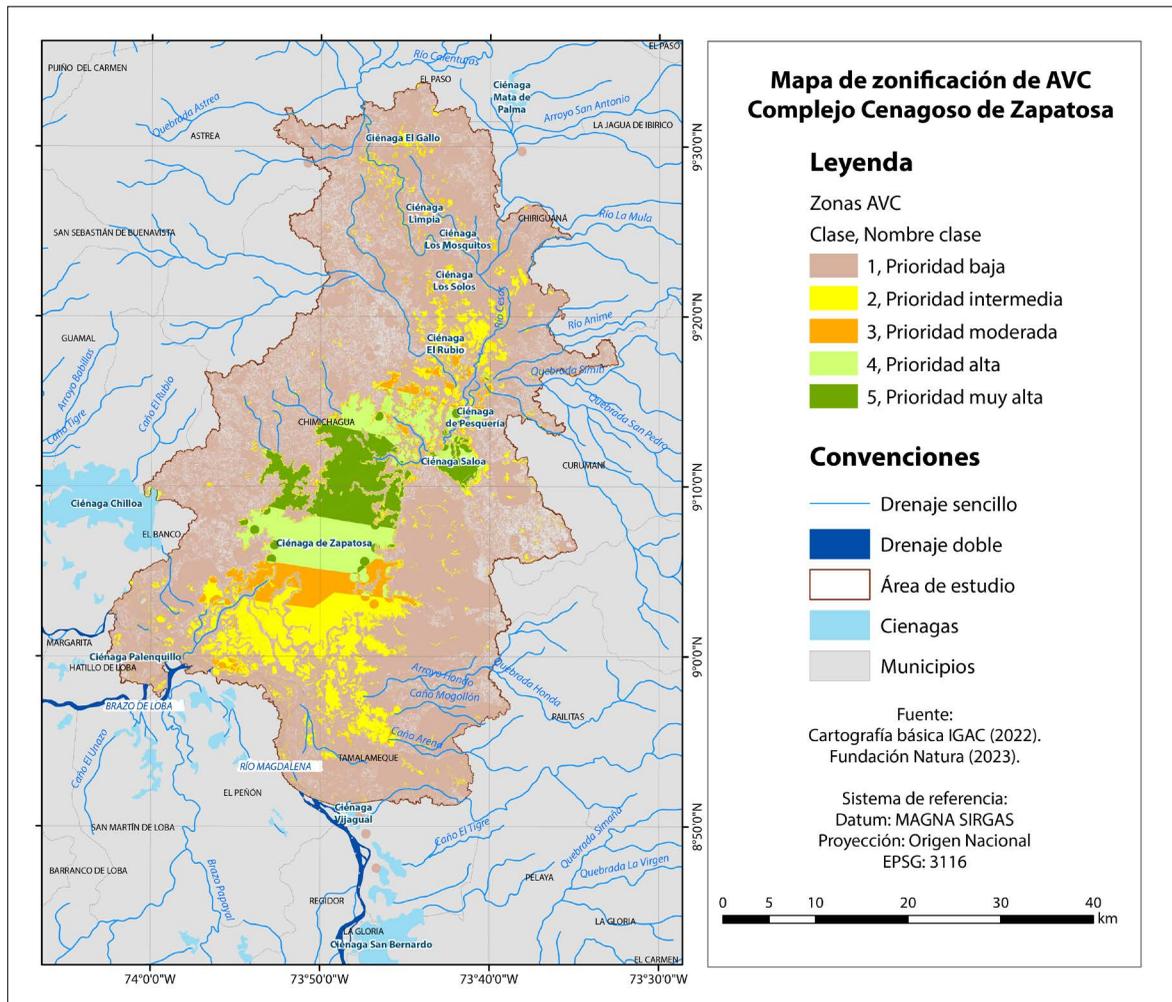


Figura 9. Mapa de zonas de Altos Valores de Conservación del Complejo Cénagoso de Zapatosa por prioridad de conservación. Fuente: elaboración propia (2024).

tres indicadores del AVC 1 y los dos indicadores del AVC 5) están estrechamente relacionados con el espejo de agua, ésta fue la zona con mayor priorización de conservación. Sin embargo, se aclara que este es el primer análisis de AVC para el CCZ y que, a partir de estos resultados, se pretende incorporar otros indicadores relacionados con la vegetación y la fauna terrestre, con el fin de ampliar el análisis; lo que seguramente modificaría algunas de las categorías de priorización aquí presentadas.

Finalmente se calculó el área en unidades de hectáreas (ha) para conocer la ocupación de los polígonos de cada categoría (Tabla 8).

Tabla 8. Áreas totales (ha) por cada clase de zonas de AVC para el CCZ.

Clase	Nombre clase	Área (ha)
1	Prioridad baja	140 044.44
2	Prioridad intermedia	22 234.97
3	Prioridad moderada	7 685.45
4	Prioridad alta	12 288.71
5	Prioridad muy alta	10 081.38

Fuente: elaboración propia (2024).

Según los resultados de la categoría de “Prioridad baja” muestra un valor considerable indicando una extensión significativa de áreas con menor urgencia de conservación. En contraste, la clase de “Prioridad intermedia” sugiere la existencia de zonas que requieren atención focalizada de conservación. Las categorías de “Prioridad moderada”, “Prioridad alta” y “Prioridad muy alta” indican la existencia de áreas críticas que demandan acciones prioritarias para proteger la integridad ecológica del humedal.

La clasificación de las áreas según su prioridad de conservación permite identificar cuáles requieren medidas urgentes y específicas, mientras que otras pueden tener un enfoque de gestión más flexible (Garmendia *et al.*, 2010), diferenciación que garantiza la sostenibilidad a largo plazo del ecosistema, ya que una gestión uniforme puede no ser efectiva en contextos con necesidades y presiones ambientales diversas. De esta forma, la integración de datos geoespaciales y la evaluación multicriterio contribuyeron a una comprensión detallada de prioridades y acciones para preservar el ecosistema (Jelokhani-Niaraki, 2021).

En este sentido se debe mencionar que, las acciones contempladas para la protección del CCZ (relacionadas principalmente con la restauración de la vegetación boscosa y la conectividad entre cuerpos de agua; la rehabilitación de las zonas de ribera y el control de quemadas) incluyen desde zonas de prioridad baja hasta de mayor prioridad; es decir, tienen un enfoque ecosistémico para el humedal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zonificación de AVC emerge como una herramienta esencial para la gestión sostenible de recursos naturales y la protección ambiental. Este enfoque requiere establecer criterios específicos para identificar zonas que se deban salvaguardar y conservar en el CCZ.

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) es un método fundamental, por plantear un marco estructurado y sistemático para evaluar y ponderar múltiples criterios, garantizando la toma de decisiones objetiva y basada tanto en datos de aspectos

biológicos y ecológicos como socioeconómicos y culturales. Además, permite la participación de diferentes partes interesadas y expertos, lo que promueve la transparencia y legitimidad del proceso de zonificación precisa para la conservación, con la posterior definición de actividades permitidas desde una perspectiva inclusiva, fomentando la participación comunitaria y la integración de conocimientos locales en el proceso.

Se plantea la implementación de un sistema de monitoreo para asegurar el cumplimiento de las regulaciones y la efectiva conservación de los AVC, con consideraciones a largo plazo para la adaptación al cambio climático.

La robustez del análisis de los AVC para seleccionar las áreas de conservación, serán cada vez más precisas en cuanto se tenga más información georreferenciada de la biodiversidad del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto CO2 Humedales, convenio específico N.º 3044288 firmado entre la Fundación Natura Colombia y Ecopetrol, y, particularmente, al equipo técnico del proceso de formulación del Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo, en el marco del cual se desarrolló el presente estudio. También, a los apoyos locales, concedores del CCZ por su contribución para el levantamiento de la información en campo. Finalmente, se agradece al equipo editorial y las personas revisoras anónimas por las observaciones que enriquecieron la versión final del escrito

REFERENCIAS

- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP). (2024, 12 de agosto). Sistema Estadístico Pesquero Colombiano (SEPEC). https://www.google.com/url?q=http://sepec.aunap.gov.co/&sa=D&source=docs&ust=1723740599478555&usq=AOvVaw05vPt_cw_P6EV3SE1kWP-bu
- Babcock, E. A., Pikitich, E. K., McAllister, M. K., Apostolaki, P., y Santora, C. (2005). A perspective on

- the use of spatialized indicators for ecosystem-based fishery management through spatial zoning. *ICES Journal of Marine Science*, 62(3), 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.010>
- Brown, E. y Senior, M. J. M. (2014). Common Guidance for the Management and Monitoring of High Conservation Values. www.hcvnetwork.org
- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3), 321-339. <https://doi.org/10.1080/02693799108927858>
- Convención Ramsar. (2023). Ficha Informativa Ramsar. Colombia, Complejo Cenagoso de Zapatosa. <https://rsis.ramsar.org/ris/2521>
- Del Amo, A., Garmendia, L., Gómez, D. y Montero, J. (2007). A Spatial Classification Model for Multicriteria Analysis.
- Fernando Ávila Vélez, E. (2019). Propuesta metodológica para cuantificar áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Caso de estudio páramo del Almorzadero, Colombia. *Revista UD y La Geomática*.
- Fuenzalida Díaz, M., Figueroa Sterquel, R. y Negrete Sepúlveda, J. (2013). Estudios y Perspectivas en Turismo. *Estudios y perspectivas en turismo*, 22(1), 120-137. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180725735007>
- Fundación Natura. (2022). Armonización Plan de Manejo Distrito Regional de Manejo Integrado y sitio Ramsar Complejo Cenagoso de Zapatosa. www.natura.org.co
- Garmendia, E., Gamboa, G., Franco, J., Garmendia, J. M., Liria, P. y Olazabal, M. (2010). Social multicriteria evaluation as a decision support tool for integrated coastal zone management. *Ocean and Coastal Management*, 53(7), 385-403. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.05.001>
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. RA-MA Editores.
- Gómez, M. y Barredo, J. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2ª. ed.). RA-MA Editores.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Pontificia Universidad Javeriana. (2015). *Evaluación de servicios ecosistémicos en humedales en Colombia: una propuesta de insumos espaciales para su delimitación*.
- IUCN. (2024, 12 de agosto). *The IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/>
- Jelokhani-Niaraki, M. (2021). Collaborative spatial multicriteria evaluation: a review and directions for future research. En *International Journal of Geographical Information Science*, 35(1), 9-42. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1776870>
- Jiménez-Segura, L. y Lasso, C. A. (2021). Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. En *Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://doi.org/10.21068/a2020rrhhxix>
- Mendoza, G. A. y Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230(1-3), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.023>
- Moreno-Arias, C., López-Casas, S., Rogeliz-Prada, C. A. y Jiménez-Segura, L. (2021). Protection of spawning habitat for potamodromous fish, an urgent need for the hydropower planning in the andes. *Neotropical Ichthyology*, 19(3). <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2021-0027>
- Olaya Rodríguez, M. H., Escobar Lizarazo, M. D., Cusva, A., Lasso Alcalá, C. A. y Londoño Murcia, M. C. (2017). Mapping the ecosystem service of food associated with fishing in inland wetlands of Colombia. *Ecología Austral*, 27(1-bis), 123-133. <https://doi.org/10.25260/ea.17.27.1.1.261>
- Pressey, R. L., Cabeza, M., Watts, M. E., Cowling, R. M. y Wilson, K. A. (2007). Conservation planning in a changing world. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(11), 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.001>
- Restrepo, J. D., Cárdenas-Rozo, A., Panuagua-Arroyave, J. F. y Jiménez-Segura, L. (2021). Aspectos físicos de la cuenca del río Magdalena, Colombia: geología, hidrología, sedimentos, conectividad, ecosistemas acuáticos e implicaciones para la Biotas. En *Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 41-84). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://doi.org/10.21068/B2020RRHHXIX01>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Senhadji-Navarro, K., Ruiz-Ochoa, M. A. y Rodríguez Miranda, J. P. (2017). Estado ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: Una evaluación prospectiva. *Colombia Forestal*, 20(2), 181-191. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a07>
- Stei, E. D., Mattson, M., Fetscher, A. E. y Halama, K. J. (2004). Influence of geologic setting on slope wetland hydrodynamics. *Wetlands*, 24(2), 244-260. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2004\)024\[0244:iogsos\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2004)024[0244:iogsos]2.0.co;2)

- Universidad del Magdalena, C. C. (2017). Documento síntesis para la declaratoria del Complejo Cenagoso de Zapatosa como área protegida.
- Vagaría, R. y Gaspari, A. (2010). GeoQ: Herramienta para la determinación del número de curva y escurriencia bajo entorno SIG. Idrisi Andes°. 10. www.geo-focus.org
- Vega, L. F., Nunes Da Cunha, C., Rothaupt, K. O., Moreira, M. Z. y Wantzen, K. M. (2014). Does flood pulsing act as a switch to store or release sediment-bound carbon in seasonal floodplain lakes? Case Study from the Colombian Orinoco-llanos and the Brazilian Pantanal. *Wetlands*, 34(1), 177-187. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0495-9>
- Zhou, X., Guan, H., Xie, H. y Wilson, J. L. (2009). Analysis and optimization of NDVI definitions and areal fraction models in remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 30(3), 721-751. <https://doi.org/10.1080/01431160802392620>