

CAPÍTULO XIV

MÉTRICAS DEL PAISAJE Y SOSTENIBILIDAD TERRITORIAL EN CUENCA HIDROGRÁFICA INTERVENIDA

<https://doi.org/10.47212/tendencias2025vol.xxviii.15>

José David Peñuela Lizcano

Doctor en Desarrollo Sostenible, Economista, Magíster en Ciencias Económicas. Docente Investigador de la Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas de la Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Medellín-Colombia. E-mail: jose.penuela@tdea.edu.co ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7331-5140>

Lina Marcela Sánchez Vásquez

Doctora en Administración Gerencial, Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente Investigadora de la Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas de la Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Medellín-Colombia. E-mail: lina.sanchez42@tdea.edu.co ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3911-8367>

Luis Andrés Salas Portillo

Doctorante en Economía y Finanzas, Magíster en Administración Financiera y Economía, Economista. Docente Investigador de la Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas de la Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Medellín-Colombia. E-mail: luis.salas24@tdea.edu.co ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5678-926X>

Resumen

La construcción de la Central Hidroeléctrica Sogamoso en el departamento de Santander-Colombia, alteró el cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca alta del río Sogamoso, acelerando la deforestación y fragmentación. El propósito de la presente investigación es analizar mediante una batería de métricas del paisaje el cambio en la composición, estructura y funcionalidad de la cuenca alta del río Sogamoso: 2005-2024, con la finalidad de generar insumos empíricos para la gestión ambiental territorial. La investigación se ubicada en el paradigma socioecológico, el cual aborda el cambio de cobertura y uso del suelo como una simbiosis producto de la relación hombre naturaleza. Se adoptó un enfoque de corte mixto y el método no experimental de tipo multitemporal para los intervalos 2005, 2013, 2019 y 2024. La fundamentación teórica del objeto de estudio se centra en los planteamientos de Simental-Nájera et al., (2022), Köche Marcon et al., (2020) y González Valencia, (2020), entre otros. Los hallazgos evidencian procesos de antropización en las coberturas vegetales naturales antes y después de la construcción de la hidroeléctrica, lo que exterioriza la degradación de la cuenca hidrográfica y la posible reducción de sus servicios ambientales. Se concluyó que la generación de métricas del paisaje son una herramienta fundamental para el monitoreo, seguimiento y control de la deforestación y fragmentación en cuencas

hidrográficas perturbadas por embalses hidroeléctricos. Tales procesos son vitales, no solamente para evaluar la degradación y sus implicaciones, sino también; aportan evidencia empírica para la gestión ambiental territorial en los ecosistemas estratégicos para el alcance de los objetivos del desarrollo sostenible.

Palabras Clave: deforestación, embalse hidroeléctrico, fragmentación, métricas del paisaje, río Sogamoso.

LANDSCAPE METRICS AND TERRITORIAL SUSTAINABILITY IN AN INTERVENED WATERSHED

Abstract

The construction of the Sogamoso Hydroelectric Power Plant in the department of Santander, Colombia, altered land cover and land use in the upper Sogamoso River basin, accelerating deforestation and fragmentation. The purpose of this research is to analyze, using a battery of landscape metrics, the change in the composition, structure, and functionality of the upper Sogamoso River basin from 2005 to 2024, with the aim of generating empirical inputs for territorial environmental management. The research is based on the socio-ecological paradigm, which addresses changes in land cover and land use as a symbiosis resulting from the relationship between humans and nature. A mixed-method approach and a non-experimental multitemporal method were adopted for the intervals 2005, 2013, 2019, and 2024. The theoretical basis for the object of study focuses on the approaches of Simental-Nájera et al., (2022), Köche Marcon et al., (2020) and Gonzalez Valencia (2020), among others. The findings show processes of enthronezation in natural vegetation cover before and after the construction of the hydroelectric plant, which highlights the degradation of the watershed and the possible reduction of its environmental services. It was concluded that the generation of landscape metrics is a fundamental tool for monitoring, tracking, and controlling deforestation and fragmentation in watersheds disturbed by hydroelectric reservoirs. Such processes are vital, not only for assessing degradation and its implications, but also for providing empirical evidence for territorial environmental management in ecosystems that are strategic for achieving sustainable development goals.

Keywords: deforestation, hydroelectric reservoir, fragmentation, landscape metrics, sogamoso river.

Introducción

En el actual paradigma de globalización y del desarrollo sostenible, la problemática de la deforestación y fragmentación del paisaje es cada vez compleja y crítica, fundamentalmente, por su impacto en la biodiversidad (Hernández-Pérez et al., 2022) y su relación con el cambio climático. Una de las principales causas de dicha problemática, radica fundamentalmente en el cambio cobertura y uso de suelo (CCUS), la cual no solo reduce la extensión de las coberturas vegetales naturales del paisaje, sino que también, altera la

composición, estructura y funcionalidad del paisaje, generando externalidades negativas como la degradación de los suelos, alteración del ciclo hidrológico, erosión, reducción del hábitat de especies y reducción de la cantidad y calidad de los servicios ambientales (SA); externalidades que intervienen a diferentes escalas espaciales, temporales y sociales.

En consecuencia, se afirma que los motores propulsores de la deforestación y de la fragmentación en paisajes estratégicos son diversos, no solo son naturales, en gran parte, son una sumatoria histórica de la relación del hombre con la naturaleza. Así por ejemplo, a nivel internacional y nacional se consideran como factores propulsores a la expansión agrícola extensiva, el crecimiento urbano, la ganadería extensiva, la minería ilegal, los cultivos ilícitos y la implementación de políticas públicas relacionadas con los agronegocios; factores que en el fondo evidencian una alta correspondencia con la demanda de bienes y servicios de los principales mercados globales (Leija et al., 2021).

Ahora, las cuencas hidrográficas son objetos pertinentes como unidades de estudio para el ordenamiento, gestión y planeación del territorio, fundamentalmente por el valor material e inmaterial de sus “funciones ambientales, ecológicas, hidrológicas y socioeconómicas” (Araque et al., 2019, p.17-18). Sin embargo, dichas cuencas hidrográficas se han visto alteradas desde su composición, estructura y funcionalidad. De ahí que, la implementación de embalses hidroeléctricos en cuencas hidrográficas, no solo contribuyen a una mayor intensidad de la deforestación y fragmentación, sino que también, alteran el caudal hídrico, reducción de la evapotranspiración, conflictos socioeconómicos y políticos por el acceso al recurso hídrico, contribuyendo a problemáticas tan complejas como el cambio climático y su relación con la precipitación (Simental-Nájera et al., 2022; Köche et al., 2020).

En este sentido, de acuerdo con Roa y Duarte (2013) la construcción y puesta en funcionamiento de la Central Hidroeléctrica Sogamoso (CHS), no solamente perturbó la cuenca del río Sogamoso por los múltiples impactos ambientales y socioeconómicos generados, sino que también, alteró sustancialmente la dinámica espacial y temporal de la cuenca. En la denominada zona de influencia directa, la CHS y el plan de usos alternativos influirán en el mediano y largo plazo a mayores cambios del paisaje, mientras en la denominada zona de influencia indirecta, se alteró la dinámica natural del caudal hídrico, lo que transformó sustancialmente los medios de vida de las comunidades ribereñas, por la reducción de la pesca artesanal como sustento de los hogares, menor disponibilidad del recurso hídrico para las actividades productivas; lo que generó desplazamientos, precariedad laboral y mayores presiones antropogénicas relacionadas en los componentes físico ambientales, socioeconómicos, culturales y político administrativos (CAS, 2018).

Por lo tanto, desde el punto de vista científico, la presente investigación aporta evidencia empírica de cómo la construcción de embalses hidroeléctricos altera la composición, estructura y funcionalidad de los ecosistemas estratégicos impactados, comprometiendo la calidad y cantidad de sus SA; aportes esenciales para el ordenamiento ambiental del territorio y generación de políticas públicas. Ahora, desde lo social se requiere más que documentar dichos procesos, crear espacios de reflexión en torno a las nuevas dinámicas territoriales del CCUS y su influencia para alterar el esquema de las relaciones socioeconómicas e institucionales, como son: la transfiguración de las economías locales, la gobernanza del agua, la justicia hídrica territorial y el esfuerzo fiscal de los entes territoriales para afrontar el cambio, principalmente.

Como se mencionó en líneas anteriores, el propósito fundamental de la presente investigación es analizar mediante una batería de métricas del paisaje el cambio en la composición, estructura y funcionalidad de la cuenca alta del río Sogamoso: 2005-2024, con la finalidad de generar insumos empíricos para la gestión ambiental territorial. Por último, entre las principales razones que impulsaron la investigación, se resalta que el CCUS en cuencas hidrográficas se instaure como un problema central por los efectos irreversibles causados, los cuales alteran la integridad del paisaje, disminuyen su conectividad y reducción de sus SA. Por otra parte, los enfoques de carácter multitemporal permiten obtener una mirada dinámica y evolutiva de la tendencia de la deforestación y fragmentación. En este sentido, el involucramiento de imágenes satelitales y métricas del paisaje robustecen metodológicamente, no solo los resultados, sino también la pertinencia de las decisiones en la gestión ambiental territorial.

Fundamentación teórica

Se define por cobertura de la tierra a los diferentes elementos ubicados sobre ella, como son los bosques, los cuerpos de agua, las diferentes variedades de rocas, tierras con poca vegetación y ordenaciones realizadas por el hombre, como: cultivos, carreteras, industrias, viviendas u otro tipo de artefactos, mientras, el cambio hace relación a las diferentes actividades y/o dinámicas que el hombre desarrolla sobre la tierra para su beneficio propio o satisfacción de sus necesidades (Simental-Nájera et al., 2022). Ahora bien, para visualizar y entender el CCUS se debe “1) enlazar el comportamiento de las personas y sociedad en interacción con el uso del suelo, 2) comprender el tipo de relaciones que establece la sociedad con su ambiente y 3) un criterio multitemporal para incorporar los eventos pasados y presentes” (Pineda, 2011, pp. 10-11).

Ahora, gracias al rol de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2004) se dignificó el valor material e inmaterial de las cuencas hidrográficas, lo que las ha convertido en ecosistemas estratégicos a diferentes escalas espaciales, temporales y sociales. De ahí, que identificar, reconocer, concientizar e incluir su valor

estratégico en los procesos del desarrollo regional; son hoy en día una condición sine qua non para la construcción y alcance de los ODS. Por esta razón, las cuencas hidrográficas se conciben actualmente como un sistema socioecológico estratégico que poseen una estructura, una composición y unas funciones (relaciones y conexiones), que demandan un abordamiento integral y holístico-no parcializada, no solo por la cantidad y calidad de sus SA, sino esencialmente, por su vinculación estratégica a las políticas públicas de crecimiento y desarrollo sostenible; como complementos articuladores vitales para una mejor calidad de vida y ampliación de los derechos sociales (un ambiente sano) de los seres humanos. De esta manera, las cuencas hidrográficas, no solo son espacios geográficos contenedoras de recursos naturales (visión tradicional), sino medios significativos y vitales para la construcción del DS en sus diferentes dimensiones. En este sentido, se debe generar conciencia de sus aportes intangibles a diferentes escalas, como son: las dinámicas ambientales, la biodiversidad, la huella de carbono y la regulación climática, entre otros aportes (Köche et al., 2020).

El concepto de SA ha evolucionado en las últimas décadas en paralelo con el de DS. Así, el concepto de SA tiene su acuña en las ciencias de la “Ecología y la economía”. Desde la ecología; el concepto de “ecosistema es fundamental, 1) para visualizar y comprender desde lo físico el conjunto de relaciones sistemáticas entre las parte o actores-incluido el ser humano y 2) la vinculación de los Sistemas Socioecológico como una “categoría funcional”, vital para la reproducción de la vida de cada una de las especies que conviven en el espacio físico. Mientras desde las ciencias económicas, existen diferentes enfoques, siendo el de “las externalidades y el bioeconómico de los recursos naturales renovables” los de mayor dominancia. Ahora, los anteriores esfuerzos conceptuales, se logran consolidar con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, donde “se definieron los ecosistemas como un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales, microorganismos y el medio ambiente inorgánico, que interactúan como una unidad” (González, 2020, pp. 130-134).

Asimismo, para determinar el CCUS se requiere de insumos esenciales como fotografías aéreas, mapas cartográficos e imágenes satelitales, donde por medio de la percepción remota o teledetección, la clasificación supervisada de imágenes satelitales y el análisis visual y en función de las diferentes coberturas de la tierra, se pueden procesar y obtener los respectivos mapas temáticos multitemporales del CCUS, donde los Sistemas de Información Geográficos SIG desempeñan un papel esencial como herramientas de análisis para el procesamiento e interpretación de la información, así; finalmente se puede generar material cartográficos relevante multitemporal a diferentes escalas (Moizo, 2004). Técnicamente, lo que se hace es generar un mapa para el tiempo t_1 el cual se intercepta con el mapa del tiempo t_2 . De esta manera, la intersección de los dos mapas cartográficos a diferente escala temporal permite identificar visual y cuantitativamente los cambios, su intensidad y ubicación de donde sucedieron. Estos procesos técnicos se pueden obtener mediante el uso del

SIG Arcgis 10.5, entre otros softwares. Por otra parte, de acuerdo con Aguilera (2010) las métricas del paisaje son herramientas de corte cuantitativo, que, mediante el uso de funciones matemáticas y estadísticas, permiten “valorar las características espaciales y territoriales de los procesos ecológicos, como la deforestación, fragmentación, diversidad, dominancia, forma, aislamiento, compacidad y la elongación” (2010, p. 12).

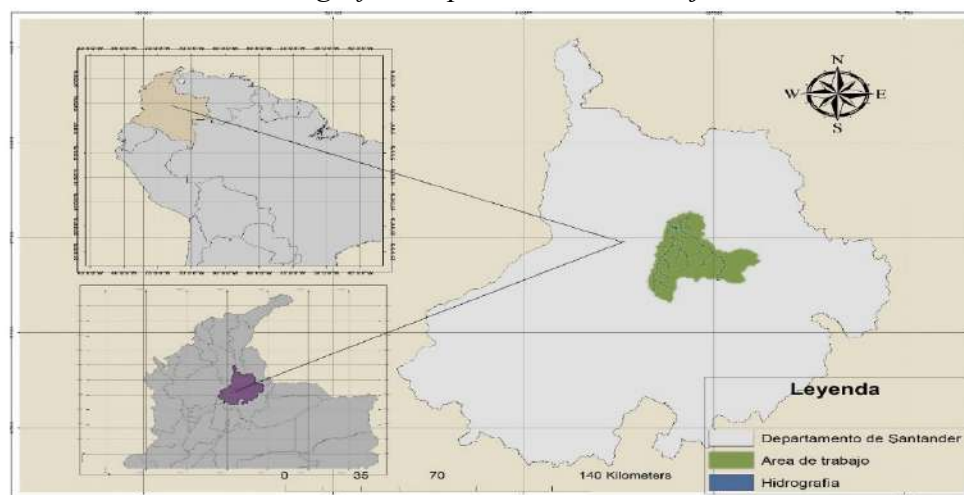
Metodología

La investigación se desarrolló bajo el paradigma socioecológico, el cual, involucra la multidimensionalidad y/o conjunto de relaciones donde interactúan al mismo tiempo las variables biofísicas, socioeconómicas, institucionales y culturales. De ahí la necesidad de adoptar un enfoque de corte mixto; que permitiera capturar cuantitativamente la deforestación y fragmentación, y por otra, deducir la naturaleza de las acciones del hombre en el territorio. Por ello, se empleó el método no experimental de tipo multitemporal para los intervalos 2005, 2013, 2019 y 2024, para observar y analizar mediante el uso de imágenes satelitales, mapas cartográficos o fotografías aéreas, y de esta manera; analíticamente explicar los cambios en el espacio territorial en diferentes momentos del tiempo; sin manipular las variables que intervienen en el fenómeno del CCUS, y con los cuales se puede identificar las variaciones, tendencia y patrones del CCUS.

Al mismo tiempo, el área objeto de estudio se ubica en la denominada zona de influencia directa del embalse “Hidrosogamoso” (ZIDH), según las coordenadas N 8°02'03" - 6°02'03" y W 73°02'03" - 74°02'03", impacta gran parte los municipios: Mesa de los Santos, Zapatoca, Carmen de Chucurí, San Vicente de Chucurí, Betulia, Girón, Lebrija y Piedecuesta y posee una extensión territorial de 1385.35 km² (CAS, 2018, p. 493-494). Ver la figura N°1.

Figura 1.

Ubicación Geográfica Espacial del Área Objeto de Estudio



Fuente: elaboración propia (2024).

La ZIDH se caracteriza por un sistema montañosos accidentado con una altitud mínima de 596 msnm y una máxima de 1737 msnm. En las áreas altas de algunos de sus municipios presenta regímenes climáticos fríos y en las partes bajas y planas regímenes de temperatura promedio de 35 grados centígrados. Posee una alta riqueza paisajística donde se encuentran ecosistemas estratégicos vitales para la biodiversidad y generación de SE como: el Parque Nacional Natural Serranía de los Yariguíes, el páramo de la Floresta, el distrito de manejo integrado de la Serranía de los Yariguíes y áreas de reserva de la sociedad civil.

Tradicionalmente, la ZIDH se ha caracterizado por el desarrollo de actividades productivas de economía campesina. Sin embargo, en las últimas dos décadas, su estructura productiva se ha intensificado por la producción industrial avícola, cultivos de palma de aceite, explotación de hidrocarburos, concesiones mineras, expansión de áreas de pastos para la explotación pecuaria y, por último; la generación de energía mediante el uso de fuentes hídricas.

Al mismo tiempo, el cálculo de las métricas del paisaje demandó los mapas de coberturas vegetales y uso del suelo de los años 2005, 2013, 2019 y 2024, los cuales, los tres primeros fueron aportados por Peñuela (2021), mientras que el mapa cartográfico del 2024, se generó con el apoyo de una imagen satelital descargada del sensor COPERNICUS del mes de enero de 2024, se tuvo en cuenta dicho mes por la época de verano que tradicionalmente experimenta el área objeto de estudio, con el fin de evitar la nubosidad, la cual dificulta la visualización y clasificación de las respectivas cubiertas.

Posteriormente, con el apoyo del Sistema de Información Geográfico ArcGIS 10.5, se procedió a la clasificación supervisada de las coberturas vegetales a escala 1.25.000, teniendo en cuenta la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010). Como producto final, se obtuvieron 51 tipos de coberturas vegetales, las cuales se reagruparon como: 1) Territorios Artificializados (TA), 2) Cultivos (CULT), 3) Pastos (PAS), 4) Bosque (BD), 5) Bosque Abierto (BA), 6) Áreas con Vegetación Herbácea y Arbustales (AVHA), 7) Áreas Abiertas + Superficies de Agua (AH+SA), 8) Otras Coberturas (O.CO) y 9) Embalse (EMB).

Posteriormente, la selección de las métricas del paisaje pertinentes para analizar el cambio en la composición y estructura de la cuenca alta del río Sogamoso: 2005-2024, demandó una revisión documental previa, ante su vasto número, sus funcionalidades y aplicación. Ahora, teniendo en cuenta la problemática de la deforestación y fragmentación en la ZIDH, se seleccionaron métricas del paisaje a nivel de clase, según los tipos de coberturas objeto de estudio. Inicialmente, se seleccionaron 15 métricas, teniendo en cuenta el componente de Área, el de Forma y el componente de agregación. Finalmente, una vez obtenidos los valores

de cada una de las métricas previamente seleccionadas, se revisó la correlación con la finalidad de reducir la redundancia de la información, dejándose para la presentación de los resultados, solo las que demostraron mayor poder de explicación, las cuales fueron: CA; NP; PLAND %, LPI (parche más grande, % de participación), el PD (Densidad de cada fragmento) y la cohesión (Aguilera, 2010).

Resultados

Se encontró que las métricas de clases totales (CA/TA), evidencian que la clase de áreas agrícolas heterogéneas poseen la mayor extensión de ocupación con 25.621 ha, seguida de la cobertura de pastos con un total de 16.093,2 ha y con menores extensiones se encuentran los cultivos permanentes con 5.191.7 ha y las zonas industriales con 1.351,7 ha. Ahora, en relación con las coberturas naturales se considera que ocupan una extensión significativa. El bosque denso representa una extensión de 18.407, 3 ha, seguido del bosque abierto con una extensión 12.700,8 ha, el bosque de galería y riparios con una extensión de 4.247,9 ha, y las áreas de vegetación herbácea y arbustales ocupan una extensión de 47.414, ha. Mientras los cuerpos de agua ocupan una extensión de 3.787, 1 ha y en una menor proporción se encuentran las áreas sin o con poca vegetación con 1.679.1 ha.

Adicionalmente, se encontró mediante la métrica (NP), que dentro de las coberturas vegetales de tipo natural, las áreas de vegetación herbácea y arbustiva son las más fragmentadas, junto con los bosques de galería y riparios; el primero al registrar para el año 2005 272 parches y para el año 2024 503 parches; es decir el número de parches prácticamente se duplicaron, aunque para la segunda cobertura en mención se evidencia un comportamiento estable que oscila entre 432 a 449 parches para el 2005-2024. En suma, el bosque denso muestra comportamientos estables desde el año 2005 hasta el 2019, y para el 2019-2024, evidencia un mayor número de parches y por ende procesos antrópicos de deforestación y fragmentación al pasar de 81 a 232 parches. Mientras el bosque abierto evidencia un aumento del número de parches al registrar 173 en el año 2013 y 213 en el año 2024. Por último las áreas denominadas con poca vegetación reflejan un mayor número de parches para el 2013-2024, al pasar de 86 a 196 parches.

Al contrario, las áreas intervenidas por el ser humano, resalta el cambio en cuanto al número de parches en la cobertura de cultivos permanentes, al pasar de 50 parches en el año 2019 a 449 en el año 2024. Ahora bien, los pastos experimentaron un crecimiento significativo y acelerado en cuanto al número de parches al pasar de 366 año 2005 a 712 en el año 2024. Dinámica similar pero menos volátil experimentó la cobertura de áreas agrícolas heterogéneas, al pasar de 375 parches en el año 2005 a 434 en el año 2024. Finalmente, la cobertura denominada zonas industriales refleja una dinámica significativa pero constante en cuanto al número de

parches por año. Otro punto es que, mediante la métrica densidad de parches del paisaje (PLAND), se halló que las coberturas denominadas áreas con vegetación herbácea y arbustiva poseen un valor que oscila entre el 38.10 al 30.31, lo que señala una mayor fragmentación en este tipo de coberturas. Mientras el bosque denso y abierto registra una densidad con valores entre el 13.79 al 12.90 para el primero y 9.98 al 8.55 para el caso del segundo; indicando que, aunque están levemente fragmentados, poseen una estructura más continua y conectada, es decir, una fragmentación moderada. Para el caso de las coberturas antrópicas o intervenidas, las coberturas de pastos y áreas agrícolas heterogéneas evidencian valores que se mueven entre 12 al 11.24 y, para el caso de los pastos valores que oscilan entre 17.67 al 19.42, lo que indica una mayor deforestación en este tipo de coberturas.

Además, mediante las métricas de forma (Shape-MN), fractalidad promedio (FRAC-Mn) y contigüidad (CONTIG), se encontró una variabilidad entre los diferentes tipos de coberturas objeto de estudio en la ZIDH. Así, por ejemplo, se encontraron valores cercanos a 1.35 para la cobertura de pastos, lo que demuestra formas muy simples, junto con valores de fractalidad cercanos a 1.04, lo que demuestra un paisaje homogéneo o poco fragmentado. Por otra parte, las áreas agrícolas heterogéneas, junto con los cultivos permanentes poseen formas más complejas, con valores Shape-MN iguales a 1.46 y 1.48, con una fractalidad un poco mayor con valores FRAC_MN entre 1.05 -1.06, justificando una conectividad moderada, con valores de contigüidad que oscila entre 0.29 y 0.34, lo que refleja un paisaje más fragmentado, pero con una conectividad mucho más concreta que la de los pastos.

Ahora, se halló que los bosques abiertos poseen una forma mucho más irregular al encontrarse un valor Shape_MN de 1.49 y una fractalidad equivalente con un valor FRAC_MN de 1.05, pero a su vez con una contigüidad considerada moderada con un valor CONTIG de 0.28, lo que señala que, aunque es mayor la fragmentación, los parches conservan una conectividad alta. En cambio, la cobertura de bosque de galería y riparios certifican una menor conectividad al evidenciar un CONTIG de 0.09, lo que señala una aislación significativa entre los respectivos parches, junto con formas menos complejas como la de Shape-MN 1.12 y una fractalidad baja con un valor de FRAC-MN de 1.02. Adicionalmente, se detecta que el bosque posee formas complejas al registrar un valor Shape-MN de 1.58, aunque su fractalidad es baja con un valor FRAC-MN de 1.05 y una contigüidad considerada como moderada, según el valor CONTG de 0.30. lo que demuestra una mejor conectividad en comparación con el resto de las coberturas analizadas.

En suma, con lo anterior la métrica de distancia promedio entre parches vecinos (ENN_MN), demuestra que la cobertura Cultivos Permanentes comprueban poseer las distancias más lejanas de 948.41 metros (m), lo

que comprueba que dichos parches están más alejados entre ellos mismos, en comparación con otros tipos de coberturas. Según los resultados obtenidos, el bosque denso demuestra distancias considerables entre parches de 862.16m, aunque no tan grandes como los mostrados por la cobertura de cultivos permanentes, registrando una estructura más continua, pero con cierta dispersión entre parches. Adicionalmente, se encontró que las coberturas de pastos y áreas agrícolas heterogéneas evidencian distancias promedio menores que oscilan entre los 602.79 y 537.09 metros, los que permite derivar que los parches de este tipo de coberturas están mucho más cercanos entre sí en comparación por ejemplo con el bosque denso y los cultivos permanentes. Mientras, el bosque abierto evidencia una distancia intermedia de 623.79 m, dando a entender que, aunque sus parches están un poco dispersos, siguen siendo más cercanos que los registrados en la cobertura de cultivos permanentes y/o bosque denso.

Ahora, desde el punto de vista del número de parche y la densidad, los pastos registran un número alto de parches con un valor de 366 y una densidad de parches considerada moderada con un valor PD de 0.27. Lo que indica sin duda alguna que los pastos están fragmentados con pequeños parches distribuidos relativamente de forma uniforme en el la ZIDH. Continuando, las áreas agrícolas heterogéneas evidencian un número significativo en cuanto al número de parches con un total de 375 y una densidad de parches de PD de 0.27, lo que sugiere un patrón de fragmentación similar al registrado por los pastos. Por otra parte, se topó que los cultivos permanentes registran un número pequeño en cuanto al número de parches con un valor de 36 y una densidad de parches baja con un valor de PD 0.03. Lo que evidencia, que los cultivos permanentes están menos fragmentados y registran áreas continuas, lo que es típico de este tipo de coberturas, debido a que los cultivos suelen ocupar áreas extensas y menos divididas, registrando una baja o menor fragmentación. Para el caso del bosque abierto, el número de parches es moderado con un total de 146 y una densidad moderada de parches de PD 0.11.

Indicando que, aunque los parches están relativamente fragmentados, no son en la misma medida que lo registrado por los pastos y áreas agrícolas heterogéneas, los parches del del bosque abierto pueden registrar una mayor conectividad. Mientras los parches de bosque de galería y riparios presentan un número alto de parches 432 y una densidad de parches de PD 0.31, lo que registra una estructura fragmentada y dispersa, posiblemente, por ser coberturas que se ubican en áreas cercanas a las fuentes hídricas. Finalmente, el bosque denso registra un número bajo de parches de 80 y una densidad de parches baja de PD 0.06. Lo que deja ver un patrón de paisaje mucho más continuo, parches mucho más grandes, que poseen una menor fragmentación y por ende una mejor conectividad en comparación con otras coberturas.

Discusión

El análisis de las métricas CA (área de fragmentos) y NP (número de parches) evidencia un incremento sostenido de la deforestación y fragmentación en coberturas naturales, particularmente en áreas con vegetación herbácea y arbustiva (AVH) y bosques de galería y riparios (BGR). Este patrón refuerza lo documentado por Hernández-Pérez et al., (2022), quienes argumentan que el CCUS es un factor preponderante en la degradación de paisajes estratégicos. Además, la métrica PLAND muestra una pérdida significativa de continuidad espacial en los bosques denso (BD) y abierto (BA), lo cual puede influir negativamente en la biodiversidad y los servicios ambientales, como lo señalan Galeano-Rendón y Mancera-Rodríguez (2018). Mientras, la dinámica observada en coberturas intervenidas por el hombre, como pastos (PAS) y áreas agrícolas heterogéneas (AGH), refleja una mayor homogeneización del paisaje. Esta tendencia puede estar asociada a prácticas agrícolas y ganaderas intensivas y su influencia sobre la conectividad ecológica.

En suma, con lo anterior, las métricas de forma, como Shape-MN y FRAC, demuestran que las coberturas naturales poseen una estructura más irregular, mientras que las coberturas antropogénicas tienden a ser más homogéneas. Esto sugiere que las intervenciones humanas están simplificando la complejidad estructural del paisaje, un fenómeno que intensifica la vulnerabilidad de los ecosistemas, como lo sostiene Köche et al., (2020). Es preocupante, el caso de los bosques de galería y riparios, que presentan una conectividad baja ($CONTIG=0.09$) y una alta fragmentación, lo que podría comprometer su función como corredores ecológicos. Este resultado es consistente con los hallazgos de Vega-Vela et al., (2018), quienes destacan la importancia de estos bosques en la mitigación del cambio climático y la protección de fuentes hídricas.

El aumento en el número de parches en cultivos permanentes y pastos, junto con la disminución de la cohesión en coberturas naturales, indica una tendencia hacia la pérdida de integridad ecológica en la ZIDH. Esta situación podría exacerbar problemáticas como la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, tal como lo discuten Da Costa Dias et al., (2023). Además, los conflictos socioeconómicos y políticos asociados con el acceso al recurso hídrico, descritos por Campos-Medina y Noguer (2023) pueden intensificarse a medida que la fragmentación compromete la provisión de servicios ecosistémicos esenciales.

Conclusiones

La batería de métricas aplicadas, evidencian una significativa desintegración de la cuenca alta del río Sogamoso o ZIDH, donde la deforestación y fragmentación producto de las actividades antropogénicas, ha generado profundas repercusiones en la biodiversidad, los servicios ambientales y la sostenibilidad territorial; amenazando nodos estratégicos como la continuidad ecológica, la regulación hídrica y el soporte de la

biodiversidad. Es preocupante la deforestación y fragmentación de las coberturas vegetales naturales en la ZIDH, especialmente las evidenciadas para el intervalo 2019-2024. Esta dinámica se debe posiblemente, a la expansión de las coberturas antropogénicas, las cuales reflejan una tendencia mucho más activa.

En este sentido, las métricas de forma y cohesión insinúan que las áreas intervenidas presentan una mayor fragmentación y ocupan territorios extensos, reflejando una presión intensa sobre en la cuenca alta del río Sogamoso. Esto corrobora que las actividades humanas, como la ganadería y los cultivos permanentes, son los motores preponderantes de la transformación en la ZIDH.

Sintetizando, los resultados subrayan la urgencia de implementar políticas sostenibles que integren restauración ecológica, planificación territorial y regulación de las actividades humanas. En este orden de ideas, la priorización de soluciones basadas en la naturaleza podría mitigar los efectos negativos observados y fomentar la sostenibilidad ambiental y social en la ZIDH.

Referencias

- Aguilera, F. (2010). Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 30 (2), 9-29. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC1010220009A>
- Campos-Medina, F., y Noguer, V. (2023). Construcción de nuevas territorialidades; el territorio como horizonte de acción en la reforma energética chilena. *Revista de geografía Norte Grande*, (85), 1-21. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-34022023000200101>
- CAS, Corporación Autónoma de Santander. (2018). *Fase De Diagnóstico Documento General Vol. I. Caracterización Básicas y del Sistema Físicobiótico. Formulación Pomca Río Sogamoso. Plan de Ordenación y Manejos de la Cuenca Hidrográfica. I*, 1322.
- Da Costa, T., Silveira, L. F., y Francisco, M. R. (2023). Spatiotemporal dynamics reveals forest rejuvenation, fragmentation, and edge effects in an Atlantic Forest hotspot, the Pernambuco Endemism Center, northeastern Brazil. *PLoS ONE*, 18(9 Septembe). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291234>
- Galeano-Rendón, E., y Mancera-Rodríguez, Nueva Jersey (2018). Efectos de la deforestación sobre la diversidad de macroinvertebrados y la estructura de ensamblaje en cuatro quebradas andinas en Colombia. *Revista De Biología Tropical*, 66 (4), 1721–1740. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.31397>
- González, A. (2020). Aproximación al concepto de Servicios Ecosistémicos y su evolución a través del tiempo. *Revista mbiental ÉOLO*, 18(1). ecuperado a partir de <https://revistaeolo.fconvida.org/index.php/eolo/article/view/13>
- Hernández-Pérez, E., García-Franco, J. G., Vázquez, G., y Cantellano de Rosas, E. (2022). Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989 – 2015). *Madera Y Bosques*, 28 (1), e2812294. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>

- IDEAM - Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. En *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* (Número 257).
- Köche, A., Galvão, F., Renán, M. M., Thomas, C., Botosso, P. C., y Geronazzo, K. (2020). Dinámica del paisaje alrededor de una central hidroeléctrica en el estado de Paraná, Brasil. *Ciencia forestal*, 48(126), 1-14.
- Leija, E., Pavón, N., Sánchez-González, A., y Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Revista cartográfica*, (102), 43-68. Epub 14 de marzo de 2022. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>
- Moizo, P. (2004). La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. Geoenfoque. *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*, (4), 1-24. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/40>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2004). Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis. WorldFish Center, Malaysia: National Institute of Public Health and the Environment, Netherlands.
- Peñuela, J. D. (2021). Incidencia del cambio en la cobertura de la tierra del Alto Río Sogamoso en el marco del desarrollo territorial sostenible. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/5860>
- Pineda, O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. México, D.F: CentroGeo. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/41>
- Roa, T., y Duarte, B., 2012. Aguas represadas. El caso del proyecto Hidrosogamoso en Colombia. Censat Agua Viva; Amigos de la Tierra Colombia, Bogotá, DC. <https://censat.org/es2/publicaciones/aguas-represadas-el-caso-del-proyecto-hidrosogamoso-en-colombia>
- Simental-Nájera, J. G., Arreguán-Cortés, F. I., Farfán-Gutiérrez, M., y Cervantes-Jaimes, C. E. (2023). Impacto del cambio de cobertura y uso de suelo y cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca de la presa El Rejón mediante el uso de inteligencia artificial. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 14(4), 456-494. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-04-10>
- Araque, M. C., Vásquez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, y Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas* (Universidad Politécnica Salesiana (ed.). Abya-Yala. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19038>
- Vega-Vela, V., Muñoz-Robles, C. A., Rodríguez-Luna, E., López-Acosta, J. C., y Serna Lagunes, R. (2018). Análisis de la fragmentación del paisaje de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 227-238. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1442>