

Lo que el agua se llevó: Análisis de la transformación del paisaje en torno a un
proyecto hidroeléctrico en el Caribe colombiano

Ana Sofía Romero Álvarez

Director: Camilo Andrés Correa Ayram
Codirectora: Úrsula Jaramillo Villa

Pregrado en Ecología

Mayo de 2024



“Me encuentro entre quienes consideran que es aún conveniente construir nuevas represas en forma selectiva, y me encuentro, también, entre quienes consideran que en algunos lugares del mundo las grandes represas simplemente no se deben construir dado sus masivos daños”

Manuel Rodríguez Becerra, *Nuestro planeta, nuestro futuro*

Resumen

Las necesidades de provisión eléctrica y mitigación de eventos climáticos extremos han acelerado el desarrollo de proyectos hidroeléctricos multipropósito. El proyecto hidroeléctrico Urrá, en el Caribe colombiano, representa el 3% de la capacidad de generación nacional y regula las inundaciones del río Sinú. No obstante, desde su inicio en 1993, ha transformado el paisaje de la cuenca alta del río Sinú, donde el PNN Paramillo protege el último relicto de bosque primario de la cuenca. Pocas investigaciones han hecho una evaluación integral a largo plazo de los cambios en los atributos de estructura y conectividad de paisajes con emplazamientos hidroeléctricos.

Esta investigación aborda vacíos dejados por los estudios de impacto ambiental y otras investigaciones, respondiendo la pregunta: ¿cómo se ha transformado el paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993? A través de un análisis espacial se cuantificaron los atributos del paisaje desde 1985 hasta 2022. Se caracterizaron las clases aplicando métricas de área relativa, número de parches, índice del parche más grande, tamaño del parche, distancia al vecino más cercano, índice de conectancia y área conexas equivalente. Por medio de un análisis de contenido de fuentes documentales sobre el proyecto hidroeléctrico Urrá se identificaron causas y consecuencias subyacentes a los cambios.

La llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá invirtió las trayectorias históricas de fragmentación forestal, no obstante, estas se reiniciaron en 2014. La clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* mantuvo patrones inversos a los mencionados y la clase *Río o lago* pasó a constituir más de 1% del paisaje solo con la formación del embalse. Las ganancias de la clase *Bosque* desde 1993 favorecieron la conectancia forestal en su conjunto. Aunque las pérdidas desde 2014 provocaron el aumento de la distancia al vecino más cercano y la disminución de la conectancia, el área conexas equivalente aumentó. La identificación de causas y consecuencias de tipo socioeconómico, político, natural, tecnológico y cultural permitió concluir que las dinámicas de las clases *Bosque* y *Mosaico de agricultura y/o pasto* fueron resultado de la formación del embalse, las labores de compensación ambiental y el aumento del acceso al territorio por la apertura de vías.

Abstract

The need to provide electricity and mitigate extreme climate events have accelerated the development of multipurpose hydroelectric projects. Urrá hydroelectric project, located in the Colombian Caribbean region, represents 3% of the national generating capacity and regulates the Sinú river's flooding. However, since its start date in 1993, it has transformed the Upper Sinú river basin's landscape, where Paramillo Natural National Park protects the last primary forest remains in the basin. Few investigations have performed a long-term, comprehensive assessment of structure and connectivity changes in landscapes with hydroelectric sites.

This investigation addresses gaps left by environmental impact studies and other investigations, by answering the question: how has the Upper Sinú river basin's landscape been transformed since the arrival of Urrá hydroelectric project in 1993? Through spatial analysis, landscape attributes were quantified from 1985 to 2022. Landscape classes were characterized by applying relative area, patch number, largest patch index, patch size, nearest neighbor distance, connectance index and equivalent connected area metrics. Through content analysis of documentary sources on Urrá hydroelectric project, underlying causes and consequences to the changes were identified.

The startup of Urrá hydroelectric project inverted historical forest fragmentation trajectories, however, these started over in 2014. *Agriculture and/or pasture mosaic* class showed patterns opposite to those mentioned and *River or lake* class went on to represent more than 1% of the landscape only after the dam's formation. Increases in *Forest* class since 1993 favored overall connectivity. Even though decreases since 2014 caused an increase in nearest neighbor distance and a decrease in connectance, equivalent connected area increased. The identification of socioeconomic, political, natural, technological, and cultural causes and consequences made it possible to conclude that *Forest* and *Agriculture and/or pasture mosaic* classes' dynamics were the result of reservoir creation, environmental compensatory tasks, and increased access to the territory due to roads creation.

Introducción

La necesidad de satisfacer demandas humanas básicas como la provisión de energía ha estimulado el desarrollo de proyectos hidroeléctricos a nivel mundial (Cho & Qi, 2021; Andrade Navia & Olaya Amaya, 2023). Esto se debe, por un lado, a que la satisfacción de estas demandas con las fuentes fósiles convencionales de energía acarrearía innumerables perjuicios ambientales debido a la emisión de gases de efecto invernadero que sumarían a la crisis del calentamiento global actual (Rahman et al., 2022). Por otro lado, dado que los combustibles fósiles son limitados y no renovables, es probable que no podamos seguir dependiendo de ellos para satisfacer el aumento de la demanda energética humana más allá de la mitad de este siglo (Strielkowski et al., 2021). En contraste, las plantas hidroeléctricas, que pueden operar hasta por 100 años, representan una alternativa duradera y económicamente ventajosa (Rahman et al., 2022). No obstante, dado que la infraestructura hidroeléctrica puede ser multipropósito, su construcción es, en ocasiones, impulsada por la búsqueda de soluciones de mitigación y adaptación a los eventos climáticos extremos como las sequías e inundaciones, de manera que la producción de electricidad es un valor agregado (Lin & Qi, 2017).

La generación hidroeléctrica ha sido la fuente de energía renovable más importante desde finales del siglo XIX y es actualmente la más desarrollada a nivel comercial, proveyendo alrededor del 16% de la electricidad global (Usher, 2019; Strielkowski et al., 2021). Sin embargo, esta solución ingenieril a los problemas de provisión eléctrica y variabilidad climática puede dejar de lado consideraciones ecológicas y sociales (Lin & Qi, 2017). Como este tipo de generación implica la construcción de infraestructuras en concreto o metal para controlar el flujo natural de los ríos, sus principales efectos son el producto de este represamiento (Rahman et al., 2022). Aunque los proyectos hidroeléctricos tienen implicaciones positivas para el desarrollo humano (Cho & Qi, 2021), también modifican significativamente su entorno acuático y terrestre (Rahman et al., 2022). Esto se debe a que controlan la conectividad longitudinal de los ríos, dificultando procesos ecológicos como la migración de especies acuáticas; modifican las propiedades fisicoquímicas de los ríos, afectando la supervivencia de especies nativas; e inundan o desecan terrenos alrededor de los ríos, reduciendo el hábitat de múltiples especies y amenazando la subsistencia de comunidades humanas (Pacheco et al., 2022; Rahman et al., 2022). No obstante, existe una gran

necesidad de estudios que profundicen en sus impactos de manera integral, ya que, según Usher (2019), las perspectivas respecto al tema se encuentran polarizadas.

Adicionalmente, es importante investigar los impactos sociales y ambientales de las hidroeléctricas a una escala acorde con aquella a la que éstas operan: una escala amplia (International Renewable Agency, 2012), una escala de paisaje. Si bien los impactos de las hidroeléctricas y los patrones de transformación que desencadenan en el paisaje pueden establecerse de manera intuitiva (Cho & Qi, 2021), no existen suficientes investigaciones que hagan una evaluación integral de la variación espaciotemporal de los atributos de un paisaje donde se han instalado proyectos hidroeléctricos (p.e. Magintan et al., 2017; Velástegui-Montoya et al., 2019; Pacheco et al., 2022). Además, estos impactos se hacen notorios tras dos décadas (Pacheco et al., 2022) y tienden a estabilizarse tras alrededor de tres décadas del inicio de su construcción y operación (Zarco-González et al., 2022). Por esto, son pocas las investigaciones que se han acercado a dilucidar las trayectorias históricas de transformación del paisaje tras décadas de operación (p.e. Bauni et al., 2015; Pacheco et al., 2022; Zarco-González et al., 2022), así que es necesario ampliar el conocimiento sobre los procesos que se desencadenan en los territorios años después de construirse los proyectos hidroeléctricos.

En Colombia, desde principios del siglo XX se han implementado proyectos hidroeléctricos (Hurtado Hidalgo, 2014) y desde 2000 se ha incrementado su instalación (Andrade Navia & Olaya Amaya, 2023). Esto se debe a que Colombia posee un gran potencial para este tipo de generación eléctrica por su contexto orográfico y riqueza hídrica (Banco Interamericano de Desarrollo et al., 2016); potencial reconocido desde finales del siglo XIX, cuando se iniciaron los planes para constituir el sistema energético nacional (Unidad de Planeación Minero-Energética et al., 2015). No obstante, esta expansión hidroeléctrica podría asociarse a la duplicación de la población colombiana y al aumento de sus demandas entre 1975 y el presente, lo cual impulsó al sector energético en su conjunto (Ministerio de Minas y Energía & UPME, 2020). Además, hitos como El Apagón de 1992, provocado por un periodo de El Niño en exceso seco, impidieron satisfacer las demandas de un país cuya estructura eléctrica era hidráulica en un 80% (UPME, 1998; Hurtado Hidalgo, 2014). Así, el gobierno inició la expansión de la potencia instalada nacional con proyectos tanto hidroeléctricos como termoeléctricos (Hurtado Hidalgo, 2014).

Como resultado, en 2014 operaban 28 grandes centrales hidroeléctricas (Andrade Navia & Olaya Amaya, 2023), el 64 % de la capacidad total de generación eléctrica del país (BID et al., 2016). Estas están mayoritariamente en la región Andina y, en menor proporción, en departamentos al suroccidente del país (BID et al., 2016). Además, en el departamento de Córdoba existe la gran central hidroeléctrica Urrá, la única en el Caribe (BID et al., 2016), que genera 340MW de energía y representa el 3% del total nacional (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018). Esta está ubicada en la Angostura de Urrá en el río Sinú, a 30km al sur del municipio de Tierralta (Bedoya Paniagua, 2016). El proyecto hidroeléctrico Urrá fue fruto del programa de expansión eléctrica de la década de 1990 y uno de los primeros en recibir una licencia ambiental tras su reglamentación por la Ley 99 de 1993 (ANLA, 2018). Adicionalmente, su carácter multipropósito refleja la gran importancia que ostenta su regulación del caudal del río Sinú para reducir el riesgo de inundación desde su emplazamiento hasta el mar Caribe (ANLA, 2018). Por esto, el proyecto se inició a pesar de la deficiencia de sus estudios de declaratoria de impactos, cuyo acceso ha sido altamente restringido (Alzate et al., 1987).

Según la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (2004) el paisaje de la cuenca alta del río Sinú ha experimentado transformaciones debido a la construcción y entrada en operación de la central hidroeléctrica Urrá, así como la formación de su embalse. Estas transformaciones se deben, por un lado, a la construcción de infraestructura y a la remoción de cobertura vegetal para extraer material de construcción (CVS, 2004). Asimismo, están relacionadas con la inundación de 7678 ha de tierra para constituir el embalse, entre las que se cuentan 1000 ha del Parque Nacional Natural Paramillo y 417 ha del Resguardo Embera Katío del Alto Sinú (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Por otro lado, la reforestación de 2058 ha y revegetalización de 234.46 ha extendieron coberturas vegetales como plantaciones forestales y arreglos agroforestales simples, respectivamente (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Así, la transformación del paisaje de la cuenca alta del río Sinú tras la construcción del proyecto hidroeléctrico Urrá ha dado lugar a consecuencias de naturaleza positiva y negativa (CVS, 2004).

Por un lado, la CVS (2004) determinó que la alteración de la cuenca afectó el funcionamiento de sus ecosistemas, particularmente los bosques de colinas con valles intermontanos, y provocó la pérdida de humedales aledaños al río que presentaban inundaciones periódicas. Así, se afectó la fauna y flora silvestre al modificar los hábitats de diversas especies, algunas amenazadas como el

tigrillo y las ranas de cristal, y fósiles vivientes como la zamia (Observatorio de Conflictos Ambientales et al., 2017). Adicionalmente, según la CVS (2004), la transformación del paisaje propició el inicio de actividades de explotación no vinculadas a la generación eléctrica como la minería, además de cambios culturales y de estilo de vida en las comunidades asociadas al río. Por otro lado, la transformación ha creado la capacidad de amortiguar eventos fluviales extremos, protegiendo el valor socioeconómico del territorio (CVS, 2004). Así mismo, la reforestación y revegetalización que impulsó la Empresa URRÁ se ha hecho en zonas deforestadas aledañas al embalse, donde también se proyectan planes de restauración en más de 80000 ha, restituyendo procesos ecológicos y sustentando la biodiversidad (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022).

En Colombia, un país predominantemente hidroeléctrico, hay poca literatura científica sobre los cambios en las coberturas de la tierra o la transformación del paisaje que estos proyectos provocan (p.e. Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013; Avendaño Cañas et al., 2023; Godwyn-Paulson et al., 2023). El interés científico por los impactos de estos proyectos, particularmente para Urrá, se ha centrado en los efectos sobre las especies (p.e. García, 2000), los regímenes hidrológicos (p.e. Jove Wilches et al., 2020; Alvarado et al., 2023) y las dinámicas socioeconómicas de la cuenca (p.e. Leguizamón Castillo, 2015; Barrera Villalba, 2021). El estudio de este caso ha atravesado décadas de vacíos de información satelital (CVS, 2004). En consecuencia, existen discrepancias respecto al grado de pérdida forestal que provocó el inicio y operación del proyecto; la CVS (2004) y Empresa URRÁ S.A. E.S.P (2022) determinaron que fue nula, mientras que OCA et al. (2017) afirman que fue significativa. La presente investigación busca contribuir a llenar los vacíos dejados por la declaratoria de impactos original y otras investigaciones, a resolver las discrepancias que existen en la literatura y a establecer vínculos entre los patrones espaciotemporales de transformación y los procesos subyacentes a ellos. En suma, se indagará la respuesta a la pregunta: ¿cómo se ha transformado el paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993?

Objetivos

General

Analizar las trayectorias de transformación del paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993.

Específicos

- Determinar los cambios en la estructura del paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993.
- Determinar los cambios en la conectividad del paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993.
- Identificar las causas y consecuencias reportadas en la literatura que subyacen a los cambios en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en 1993.

Marco referencial

Marco conceptual

El paisaje es concebido como un área geográficamente heterogénea en las dimensiones de interés del investigador (Wu, 2013), la cual está formada por unidades homogéneas o coberturas de la tierra (Zonneveld, 1989; Etter, 1991). Por esto, su delimitación puede responder a unidades administrativas, geográficas o ecológicas a distintas escalas (Wu, 2013; Bastian, 2001). Desde un enfoque de ecología del paisaje, esta heterogeneidad emerge de “una asociación característica de patrones estructurales, funcionales y temporales” (Etter, 1991, p. 19). Así, la ecología del paisaje estudia la estructura y función, o dimensión espacial, y los cambios, o desarrollo temporal, del paisaje a través de herramientas de SIG y métricas que cuantifican estos atributos (Forman, 1981 y Forman & Godron, 1986, como se citaron en Bastian, 2001; Turner, 2005; Wu, 2013). Además, dado que el paisaje es el resultado de la interacción entre las esferas biótica, abiótica y antropogénica (Troll, 1959, como se citó en Etter, 1991), la ecología del paisaje considera los procesos subyacentes que dan significancia a los patrones espaciotemporales (Bastian, 2001).

Así, como afirma Bastian (2001), una perspectiva completa y holística del paisaje demanda la indagación de estos tres atributos clave: la estructura, la función, y los procesos subyacentes como factores contextuales que revelan la relación coevolutiva entre las tres esferas que moldean al paisaje. La estructura del paisaje describe su variedad y cantidad de elementos (Turner, 2005), así como el arreglo espacial de estos (Wu, 2013); mientras, la función del paisaje es entendida a través de la cuantificación de la conectividad (Forman & Godron, 1986, como se citó en Bastian, 2001). Esta puede ser estructural, si hace referencia a la adyacencia física del hábitat, o funcional,

si alude a la permeabilidad del paisaje según las capacidades dispersivas de especies focales (With & Crist, 1995; Wu, 2013). Como en los estudios de Camargo Martensen et al. (2017) y Murillo-Sandoval et al. (2022), esta investigación emplea umbrales de dispersión inespecíficos y un parámetro de distancia euclidiana, por lo que la conectividad funcional se conceptualizará como conectividad estructural-funcional. Por último, como exponen Lambin et al. (2001), aunque se conozcan bien los patrones de cambio del paisaje, suelen existir concepciones erróneas respecto a los procesos causantes. Por esto, Bürgi et al. (2004) y Hersperger et al. (2010) resaltan la importancia de vincular los cambios del paisaje con sus causas, llamadas fuerzas motoras, y con sus consecuencias.

Antecedentes

Múltiples estudios a nivel internacional han investigado las transformaciones desencadenadas en el paisaje por la instalación de proyectos hidroeléctricos, sin embargo, muchos manejan un enfoque de cambio en el uso y cobertura de la tierra, LULCC, que se limita a cuantificar la extensión del cambio, dejando de lado otros atributos importantes del paisaje (p.e. Andrade Castañeda, 2013; Bauni et al., 2015; Magintan et al., 2017; Almeida Affonso et al., 2022; Pacheco et al., 2022; Zarco-González et al., 2022), incluso cuando se hace uso de algunas métricas de estructura del paisaje (p.e. Velástegui-Montoya et al., 2019). Adicionalmente, existen investigaciones que se centran en los cambios de las coberturas boscosas, ignorando la importancia de los cambios en otras coberturas (p.e. Andrade Castañeda, 2013; Magintan et al. 2017). Por el contrario, otros estudios se han adentrado en la cuantificación de los atributos de estructura y conectividad estructural del paisaje (p.e., de Siqueira Cardinelli et al., 2020), estableciendo que la construcción de centrales hidroeléctricas fragmenta el paisaje, diversifica sus coberturas y reduce su conectividad (Xie et al., 2022).

Asimismo, la capacidad de algunas investigaciones para establecer patrones y trayectorias espaciotemporales de transformación en paisajes con emplazamientos hidroeléctricos se ve limitada por el reducido intervalo de tiempo analizado (p.e. Magintan et al., 2017; de Siqueira Cardinelli et al., 2020; Xie et al., 2022) o por el bajo número de momentos analizados en periodos largos (p.e. Bauni et al., 2015; Velástegui-Montoya et al., 2019). Almeida Affonso et al. (2022) reconocen la necesidad de monitoreos continuos de los impactos de este tipo de proyectos mediante series temporales. No obstante, investigaciones como las de Bauni et al. (2015) y

Velástegui-Montoya et al. (2019) analizaron las transformaciones excluyendo los primeros años desde el inicio de los proyectos hidroeléctricos por su enfoque en la pérdida de ecosistemas tras la inundación y por dificultades en la obtención de información satelital, respectivamente. Por el contrario, algunos estudios incluyen en su análisis periodos de tiempo previos a la instalación de estos proyectos hidroeléctricos, pasando por alto la distinción entre las transformaciones que son producto de ésta y aquellas que hacen parte de la historia del paisaje (p.e. Andrade Castañeda, 2013; Magintan et al., 2017; de Siqueira Cardinelli et al., 2020; Almeida Affonso et al., 2022).

Como resultado, se han establecido patrones de transformación de paisajes con emplazamientos hidroeléctricos caracterizados por la pérdida y fragmentación de coberturas boscosas a causa de la expansión urbana y, en mayor medida, de áreas antropizadas como las coberturas agrícolas (p.e. Bauni et al., 2015; Velástegui-Montoya et al., 2019; Almeida Affonso et al., 2022; Xie et al., 2022; Zarco-González et al., 2022). Algunos autores asocian esto a la deforestación para la excavación de los sitios de ubicación de las represas hidroeléctricas e infraestructura vial asociada a los proyectos (p.e. Magintan et al., 2017; Velástegui-Montoya et al., 2019; Cho & Qi, 2021; Almeida Affonso et al., 2022). Además, según Velástegui-Montoya et al. (2019) y Cho & Qi (2021), la fragmentación forestal ocurre primero por la creación de carreteras y caminos vecinales para mejorar la conectividad entre los centros urbanos y la infraestructura hidroeléctrica, impulsando una mayor pérdida forestal alrededor de las vías de acceso.

Sin embargo, los patrones de transformación identificados pueden ser disímiles para las distintas etapas de un proyecto hidroeléctrico (Pacheco et al., 2022; Cho & Qi, 2021; Xie et al., 2022). Puntualmente, Almeida Affonso et al. (2022) establecieron que los proyectos hidroeléctricos atraen nuevos pobladores que, tras finalizar su empleo en las obras, se establecen en la región para desarrollar actividades agrícolas. Por ende, la transformación se intensifica con los años de operación (Velástegui-Montoya et al., 2019) y podría evidenciarse con desfase temporal (Chin et al., 2002, como se citó en Pacheco et al., 2022). Así, además de las transformaciones desencadenadas por la instalación de las centrales hidroeléctricas y sus represas, hay efectos indirectos asociados al cambio en las dinámicas socioeconómicas propias del territorio (Almeida Affonso et al., 2022; Pacheco et al., 2022; Zarco-González et al., 2022).

Adicionalmente, uno de los principales desencadenantes del cambio en las coberturas de la tierra es el represamiento del flujo de los ríos (Magintan et al., 2017; de Siqueira Cardinelli et al., 2020;

Cho & Qi, 2021; Almeida Affonso et al., 2022; Xie et al., 2022). Así, la regulación hídrica de la represa puede directa o indirectamente causar transformaciones en el paisaje (p.e. Pacheco et al., 2022), y la inundación de grandes extensiones puede, en ocasiones, implicar la pérdida de ecosistemas nativos (p.e. Bauni et al., 2015; Zarco-González et al., 2022). No obstante, Velástegui-Montoya et al. (2019) encontraron que en las zonas donde existe alguna figura de protección ambiental la pérdida forestal es mínima, mientras que Andrade Castañeda (2013), de Siqueira Cardinelli et al. (2020) y Almeida Affonso et al. (2022) reconocen que la reforestación asociada a proyectos hidroeléctricos provoca ganancias en las coberturas boscosas. A pesar de esto, es importante considerar que estos patrones de transformación difieren aguas arriba y abajo de los emplazamientos hidroeléctricos (Bauni et al., 2015; Almeida Affonso et al., 2022).

A nivel nacional, pocos estudios usan métricas del paisaje para cuantificar la transformación que impulsan los proyectos hidroeléctricos (p.e. Marín et al., 2008; Avendaño Cañas et al., 2023). Estos han determinado que la instalación de las hidroeléctricas Porce II y Porce III en Antioquia favoreció la conectividad estructural y heterogeneidad del paisaje al aumentar las coberturas boscosas (Marín et al., 2008; Avendaño Cañas et al., 2023). Por el contrario, otras investigaciones parten del enfoque de LULCC (p.e. Andrade et al., 2013 en la hidroeléctrica Miel I en Caldas; Godwyn-Paulson et al., 2023 en el embalse Peñol-Guatapé en Antioquia; Salomão et al., 2024 en las hidroeléctricas Hidrosogamoso en Santander y El Quimbo en Huila), estando algunas dentro de la literatura gris (p.e. Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017 en El Quimbo). Adicionalmente, la investigación nacional presentó las mismas limitaciones que la internacional en cuanto al empleo de un número bajo de imágenes para el análisis de periodos largos (p.e. Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013), incluso excluyendo los primeros años tras la construcción de las hidroeléctricas (p.e. Godwyn-Paulson et al., 2023; Avendaño Cañas et al., 2023).

La mayoría de estas investigaciones coinciden en que la instalación de estos proyectos impulsa la regeneración natural en áreas de escasa vegetación (p.e. Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013; Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017; Avendaño Cañas et al., 2023; Godwyn-Paulson et al., 2023; Salomão et al., 2024). Los procesos que subyacen a este fenómeno involucran las labores compensatorias de los proyectos hidroeléctricos (Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017) y la creación de áreas de protección de los embalses, lo que frena, indirectamente, las trayectorias históricas de explotación del territorio (Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013). Así, se sustenta

la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en beneficio de la sociedad y la vida silvestre (Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013). No obstante, la instalación de estos proyectos puede atraer pobladores y turistas, aumentando los asentamientos y la cobertura vial (Godwyn-Paulson et al., 2023). Asimismo, la inundación puede afectar asentamientos y coberturas vegetales naturales, perjudicando poblaciones humanas y hábitats silvestres (Godwyn-Paulson et al., 2023).

Un mayor número de investigaciones se aproxima a los impactos biológicos, hidrológicos y socioeconómicos de los proyectos hidroeléctricos. Se estudian sus afectaciones sobre las comunidades acuáticas (p.e. Valencia-Rodríguez et al., 2022) o la creación de nuevos hábitats al interior de los embalses (p.e. Rojas-Morales et al., 2018). Otras investigaciones han encontrado impactos en la capacidad de almacenamiento de los cauces represados, lo que afecta el régimen de inundaciones (p.e. Angarita et al., 2018), reduciéndolas en invierno y facilitando el abastecimiento hídrico en verano (p.e. Ramírez Callejas et al., 2010). Además, se ha encontrado que los proyectos hidroeléctricos afectan las dinámicas locales al inundar tierras productivas y desplazar habitantes rurales (p.e. Torres et al., 2014; Roa et al., 2019). Aunque el represamiento puede causar conflictos sociales, el pago de transferencias del sector eléctrico disminuye la pobreza al impulsar el producto interno bruto de los municipios (Corzo Arévalo, 2022).

De manera similar, el caso del proyecto hidroeléctrico Urrá ha sido examinado desde múltiples perspectivas, por lo que se encuentra bien documentado a pesar de la alta nubosidad de la región que ha dificultado estudios satelitales (p.e. Alzate et al., 1987; CVS, 2004; Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Estudios establecen que su construcción afectó el régimen hidrológico del río al regular sus caudales y modificar la morfología del cauce (p.e. Diaz Carvajal, 2022; Alvarado et al., 2023), alterando los ecosistemas de la planicie de inundación y, por ende, a las especies de fauna y flora (p.e. Acosta, 2013; OCA et al., 2017). Además, afectó a especies ícticas, algunas de consumo humano, al interrumpir sus procesos migratorios y reproductivos (García, 2000; Acosta, 2013), y alterar los parámetros fisicoquímicos del río (Leguizamón Castillo, 2015; OCA et al., 2017; Jove Wilches et al., 2020), favoreciendo la biomagnificación de mercurio (Marrugo-Negrete et al., 2015). Se ha investigado también el conflicto social con la comunidad indígena Embera Katío del Alto Sinú, la cual no fue consultada previamente como demanda la ley (p.e. Comisión Colombiana de Juristas, 2011). Así, se perdieron tierras productivas y sagradas, el sustento pesquero y agrícola, la navegación tradicional y su estructura sociocultural (Comisión

Colombiana de Juristas, 2011; Rodríguez González, 2017); lo mismo ocurrió con otras comunidades rurales del embalse (Acosta, 2013; Leguizamón Castillo, 2015; OCA et al., 2017; Gómez Zárate & Arroyave Arrubla, 2020; Barrera Villalba, 2021).

Área de estudio

La cuenca alta del río Sinú se origina en la zona de páramos Nudo de Paramillo y en el cerro Murrucucú, los cuales se encuentran al interior del PNN Paramillo (CVS, 2004). Este sector de la cuenca termina a la altura de la Angostura de Urrá (CVS, 2004) y está bajo la jurisdicción de los municipios de Ituango, Tierralta y Valencia (Bedoya Paniagua, 2016). La importancia hidrográfica de la cuenca del río Sinú se reconoce nacionalmente por su extensión y la gran dependencia de la población de Córdoba de su recurso hídrico (CVS, 2004). Además, el Alto Sinú es el sector de la cuenca con mayor importancia para la oferta hídrica porque allí se unen al río Sinú los afluentes que más le aportan caudal, tales como los ríos Esmeralda, Manso, Verde y Nain (CVS, 2004). El PNN Paramillo, creado en 1977, se ubica mayoritariamente en los municipios de Ituango, Tierralta y Puerto Libertador (Parques Nacionales Naturales de Colombia, s.f.). En su interior se encuentra el Resguardo Embera Katío del Alto Sinú y nacen ríos como el Sinú y el Verde que alimentan sus aguas al embalse de la central hidroeléctrica Urrá (CVS, 2004). La protección del PNN Paramillo es estratégica por ser el último remanente de bosque primario en la cuenca (CVS, 2004), por la riqueza hídrica que encierra y por la confluencia de regiones naturales en su interior, lo que favorece la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Parques Nacionales Naturales de Colombia, s.f.). Además, Suárez Castaño et al. (2020) han identificado que esta área protegida genera una contribución clave para la conectividad regional. Como casi toda la cuenca alta del río Sinú está bajo la protección de esta figura, dentro de la cual se genera el 75% de su caudal, la operación de la central hidroeléctrica Urrá depende en gran manera de la existencia del PNN Paramillo (CVS, 2004; Bedoya Paniagua, 2016). Así, el área de estudio (**Figura 1**) abarca la cuenca alta del río Sinú y el PNN Paramillo, ocupando 586004.8 hectáreas al noroccidente de Colombia y suroccidente de la región Caribe, en los departamentos de Córdoba y Antioquia (CVS, 2004; Bedoya Paniagua, 2016).

La escogencia del área de estudio respondió a diversas consideraciones: en primer lugar, la cuenca es una unidad territorial definida según las dinámicas hídricas de un sistema natural (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013), pero también presenta

dinámicas socioeconómicas particulares producto de sus elementos naturales (Rangel-Blanco et al., 2017). Mientras, el PNN Paramillo es una delimitación administrativa basada en el sustento de procesos ecológicos (Departamento Nacional de Planeación, 2020). Como esta investigación examinó las causas y consecuencias de las transformaciones del paisaje, la unidad de información debía virtualmente dar cuenta de todos los procesos socioeconómicos involucrados. Asimismo, se identificaron los cambios en la conectividad del paisaje, por lo que se consideró pertinente un contexto geográfico delimitado por parámetros ecológicos. En segundo lugar, la cuenca alta, al superponerse con el PNN Paramillo, presenta los menores niveles de intervención antrópica de toda la cuenca, ya que presenta pocos núcleos poblados (CVS, 2004). Esto permitió discriminar las transformaciones del paisaje producto de la instalación de la central hidroeléctrica Urrá y no de dinámicas de transformación preexistentes. Por último, la cuenca alta es la zona del río Sinú en la que se emplaza la represa Urrá (CVS, 2004), por lo que, según Rahman et al. (2022), en ella se habrían evidenciado los principales impactos del proyecto hidroeléctrico.



Figura 1. Mapa del área de estudio

El área de estudio presenta ecosistemas de páramo; bosque andino, subandino, de serranía, de colinas con valles intermontanos y seco tropical; y humedal (CVS, 2004). Dado que la ribera del

Alto Sinú tiene los mayores niveles de fertilidad de la cuenca (Acosta, 2013), en el área de estudio predomina una economía agrícola de maíz, yuca, ñame, plátano, entre otros; ganadera de vacunos, ovinos y porcinos; y, en menor medida, extractiva maderera (Bedoya Paniagua, 2016). Este desarrollo agropecuario abarca zonas fuera del PNN Paramillo, pero también en su interior debido a la presencia histórica de pequeños núcleos campesinos dispersos y de los indígenas Embera Katío (CVS, 2004). Según el Departamento Nacional de Estadística (2018), el área de estudio presenta condiciones de pobreza, por lo que las actividades agropecuarias presionan la cobertura dominante de bosque denso alto de tierra firme y el recurso hídrico (CVS, 2004; Bedoya Paniagua, 2016). Además, históricamente existen al interior del PNN Paramillo cultivos ilícitos y grupos armados (CVS, 2020), lo que ha aumentado la deforestación (Suárez Castaño et al., 2020). Por ello, el área de estudio tiene niveles críticos de sensibilidad, por lo que la conservación de los remanentes naturales y la mayor biodiversidad de la cuenca dependen de la figura de protección del PNN Paramillo (CVS, 2004; Suárez Castaño et al., 2020).

Aproximación metodológica

La presente es una investigación mixta que aborda la cuantificación multitemporal de los atributos del paisaje de la cuenca alta del río Sinú y la caracterización de los procesos asociados a estos cambios. Partiendo de un enfoque teórico y metodológico de ecología del paisaje, esta investigación se desarrolló en tres fases (**Figura 2**) entre enero y mayo de 2024. La unidad analítica de transformación del paisaje fue explicada en su dimensión espacial por los cambios en los atributos de estructura y conectividad, y en su dimensión temporal por las causas y consecuencias de estos (**Anexo 1**). Por un lado, los cambios en las variables de atributos se cuantificaron por medio de siete métricas del paisaje, explicadas en la **Tabla 1** y escogidas considerando que el área de estudio es dominada por la cobertura forestal. Por esto, se emplearon métricas representativas del fenómeno de fragmentación forestal (Cheţan et al., 2018; Olariu et al., 2022) que tienen significancia ecológica y la mayor independencia estadística posible (Masoudi et al., 2024), sin dejar de lado que fuesen adecuadas para cuantificar los cambios en otras coberturas (Gounaridis et al., 2014). Adicionalmente, se consideró un componente funcional que contempla la existencia de parches de paso que favorecen la conectividad (Camargo Martensen et al., 2017). Por otro lado, las variables de causas y consecuencias se indagaron por medio del análisis de contenido de los referentes bibliográficos del proyecto hidroeléctrico Urrá.

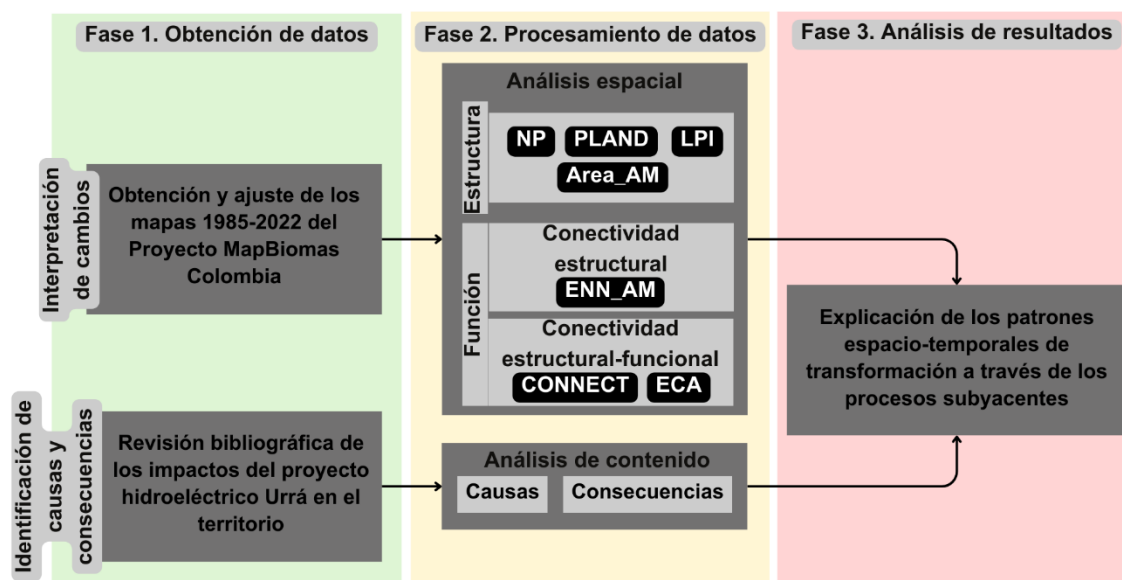


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico de la investigación. NP=Número de parches, PLAND=Área relativa de clase, LPI=Índice del parche más grande, Area_AM=Tamaño medio del parche, ENN_AM=Distancia media al vecino más cercano, CONNECT=Índice de conectancia, ECA=Área conexas equivalente

Obtención de datos

Por un lado, se emplearon los mapas de uso abierto del Proyecto de Mapeo Anual de Cobertura y Uso del Suelo de Colombia, MapBiomias Colombia, disponibles para el periodo 1985-2022 (<https://colombia.mapbiomas.org/>). Esta iniciativa proveniente de Brasil implementa procesamiento de imágenes Landsat en Google Earth Engine y clasificación con algoritmos de aprendizaje computacional Random Forest (Souza et al., 2020). Los productos del Proyecto MapBiomias cuentan con una alta resolución espaciotemporal y suplen las limitaciones de mapeo de LULC por la nubosidad de las imágenes satelitales (Borja et al., 2020). Así que su empleo subsana lo que Andrade Castañeda (2013) reconoce es la limitación del uso de imágenes Landsat: problemas de calidad, ausencia de datos y obstrucción. Se realizaron múltiples ajustes con el software ArcGIS a los 38 mapas en formato ráster para posibilitar su procesamiento en el análisis espacial, incluyendo una reclasificación de sus clases que se explica en el **Anexo 2**. A pesar de que el proyecto hidroeléctrico Urrá inició su construcción en 1993 (ANLA, 2018), se emplearon los mapas desde 1985 para dilucidar las dinámicas preexistentes de transformación del paisaje.

Por otro lado, se realizó una revisión bibliográfica para indagar sobre los procesos que pudieron desencadenar y ser desencadenados por las transformaciones del paisaje identificadas en esta investigación. Para esto, se hizo una búsqueda de fuentes documentales sobre los impactos del proyecto hidroeléctrico Urrá a través de motores de búsqueda y bases de datos, excluyendo aquellos documentos pertenecientes a la literatura gris y/o centrados en las cuencas media y baja. Así, se obtuvieron siete artículos científicos; cuatro reportes, de los cuales dos fueron expedidos por la Empresa URRÁ S.A. E.S.P.; dos documentos institucionales; y un libro.

Procesamiento de datos

Por un lado, se aplicaron las métricas del paisaje (**Tabla 1**) con excepción de ECA por medio del software Fragstats (McGarigal et al., 2012). Las métricas de Area_AM y ENN_AM fueron ponderadas por el área de los parches, en lugar de promediadas aritméticamente (Olariu et al., 2022; Masoudi et al., 2024), ya que esto permite representar las condiciones más probablemente evidenciables en cualquier píxel elegido al azar en todo el paisaje (McGarigal et al., 2012). ECA se calculó con el paquete Makurhini (Godínez-Gómez & Correa Ayram, 2020) del software RStudio cada cinco años a partir del año previo al inicio de las obras asociadas al proyecto hidroeléctrico, es decir, para los mapas de 1992, 1997, 2002, 2007, 2012, 2017 y 2022. Las métricas de ENN_AM, CONNECT y ECA se aplicaron únicamente a la clase *Bosque*. Estas dos últimas emplearon distintos umbrales inespecíficos de distancia euclidiana con el fin de abarcar la accesibilidad de múltiples especies a este tipo de hábitat: 200 m, un valor central para especies de corta dispersión; 10000 m, un valor estándar para especies de larga dispersión; y 2500 m, un valor intermedio entre ambos (Camargo Martensen et al., 2017; Murillo-Sandoval et al., 2022).

Por otro lado, para el análisis de contenido se realizó una lectura detallada de los 14 documentos de la compilación bibliográfica y se tomó como unidades de codificación a las frases delimitadas por punto en cada uno de ellos. Una vez realizada la lectura, se excluyeron las citas de aquellos documentos que no permitían establecer un vínculo directo entre los procesos que abordaban y las transformaciones del paisaje evidenciadas en esta investigación. Así, para un total de diez fuentes documentales se extrajeron las citas textuales que correspondían a las variables de causas y consecuencias, y se ordenaron en subcategorías adaptadas de los tipos de fuerzas motoras de Bürgi et al. (2004): socioeconómicas, políticas, tecnológicas, naturales y culturales.

Tabla 1. Métricas empleadas, según McGarigal et al. (2012) y Camargo Martensen et al. (2017)

Métrica	Descripción	Importancia	Interpretación
Área relativa de clase (PLAND)	Porcentaje del paisaje ocupado por una clase	Indicador de la composición del paisaje y el grado de dominancia de una clase	Su aumento indica menor rareza y mayor dominancia
Número de parches (NP)	Cantidad de elementos de una clase	Proxy del grado de fragmentación de una clase	Su aumento indica mayor subdivisión
Tamaño medio del parche (Area AM)	Área media de los parches de una clase en hectáreas	Indicador de la composición de una clase	Su aumento indica mayor dominancia de los parches grandes
Índice del parche más grande (LPI)	Porcentaje del paisaje ocupado por el parche más grande de una clase	Indicador del grado de dominancia de una clase	Su aumento indica menor rareza y mayor dominancia
Distancia media al vecino más cercano (ENN_AM)	Distancia euclidiana media de los parches de una clase al parche más próximo de la misma clase en metros	Proxy del contexto y grado de aislamiento de los parches de una clase	Su aumento indica mayor aislamiento de los parches grandes
Índice de conectancia (CONNECT)	Porcentaje de todos los pares de parches de una clase separados por una distancia menor al umbral predeterminado	Proxy de las implicaciones funcionales de la estructura del paisaje para el movimiento de los organismos y procesos ecológicos	Su aumento indica mayor cercanía y accesibilidad entre todos los pares de parches para el umbral predeterminado
Área conexas equivalente (ECA)	Porcentaje del paisaje ocupado por un único parche continuo de una clase que ofrecería la misma probabilidad de conectividad que el conjunto de parches presentes para un umbral de distancia predeterminado	Indicador de las implicaciones funcionales de la estructura del paisaje para el movimiento de los organismos y procesos ecológicos	Su aumento indica mayor accesibilidad a cualquier parche por la cercanía directa o existencia de parches que actúen como puntos de paso dentro del umbral predeterminado

Análisis de resultados

Por un lado, se interpretaron los resultados del análisis espacial desde la ecología del paisaje, estableciendo periodos consistentes de transformación. Por otro lado, las citas extraídas en el análisis de contenido fueron revisadas y sintetizadas de acuerdo con sus puntos comunes. Tras esta codificación de la información pertinente, se asociaron las transformaciones del paisaje evidenciadas en esta investigación con las causas y consecuencias identificadas. Particularmente, se vincularon las trayectorias encontradas alrededor del embalse a los resultados del análisis de contenido. Mientras, los hallazgos obtenidos para toda el área de estudio fueron analizados y explicados a la luz de los antecedentes científicos nacionales e internacionales. Para esto, se hizo una revisión detallada de las investigaciones mencionadas en la sección de *Antecedentes* y se extrajo información respecto a los cambios de coberturas, los patrones de transformación del paisaje, otros impactos de los proyectos hidroeléctricos estudiados y las metodologías empleadas.

Resultados

Análisis espacial

Previo a la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá a la cuenca alta del río Sinú, la tendencia de cambio en el paisaje era la disminución de la clase *Bosque* en proporción similar al aumento de la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto*, lo que indica una trayectoria histórica de presión agropecuaria en forma de pérdida (**Figura 3A**) y fragmentación (**Figura 3C** y **4C**) de los relictos forestales. Las clases *Río o lago*, *Área antropizada* y *Formación natural no forestal* presentaron fluctuaciones en su proporción en el paisaje, no obstante, su cambio fue netamente positivo (**Figura 3B**). Su proporción en el paisaje fue menor a 0.4% previo a la llegada del proyecto hidroeléctrico, así que no son relevantes para dilucidar las trayectorias históricas de transformación del paisaje. En el periodo 1991-1995 todas las clases tendieron a estabilizarse, aunque se evidencia que las clases *Bosque* y *Mosaico de agricultura y/o pasto* invirtieron ligeramente su comportamiento en 1993; posteriormente, algunas clases presentaron tendencias de cambio opuestas o muy disímiles a las del periodo 1985-1991 (p.e. **Figura 3A** y **D**; **Figura 5A**). Por consiguiente, se hace referencia únicamente a los cambios a partir de 1995, y se tratan como independientes de las trayectorias históricas de transformación del paisaje de la cuenca alta del río Sinú y como resultado de la influencia de la central hidroeléctrica Urrá. Se excluye toda mención de la clase *Formación natural no forestal* dado que su área relativa se mantuvo estable

entre 0.12 y 0.16% durante todo el periodo de estudio (**Figura 3A**). Aunque se mencionan los cambios de la clase *Área antropizada*, ésta mantuvo una presencia insignificante en el paisaje (**Figura 7**), con un área relativa menor a 0.2% durante todo el periodo de estudio (**Figura 3A**).

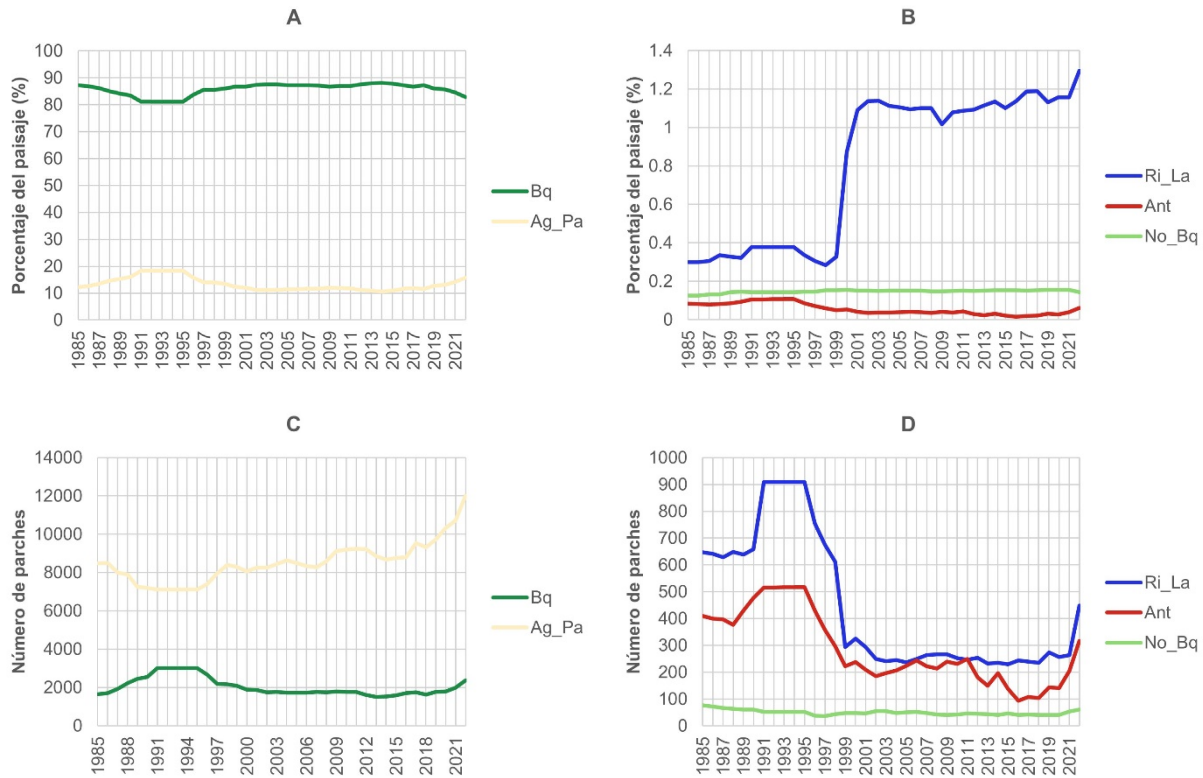


Figura 3. Trayectoria temporal de las métricas de estructura del paisaje: A) y B) Área relativa de clase (PLAND), C) y D) número de parches (NP). A la izquierda se muestran las clases dominantes y a la derecha las demás clases. Bq=Bosque, Ag_Pa=Mosaico de agricultura y/o pasto, Ri_La=Río o lago, Ant=Área antropizada, No_Bq=Formación natural no forestal

La **Figura 3A** muestra que tras la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá, y hasta 2003, la clase *Bosque* aumentó su presencia en el paisaje, mientras que la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* la disminuyó en un porcentaje similar. El aumento del tamaño medio del parche (**Figura 4C**) y la reducción del número de parches (**Figura 3C**) denota que la clase *Bosque* ganó conexión de sus parches, particularmente favoreciendo el área del gran parche que domina el paisaje (**Figura 4A**), como se ve en la disminución de la distancia media al vecino más cercano (**Figura 5A**) y el aumento de la conectancia (**Figura 5B**). Aún más, las ganancias de conectividad fueron mayores que las ganancias en área hasta 2002 (**Figura 6** y **Tabla 2**). Por el contrario, las métricas

de la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* indican que su pérdida de área provocó la subdivisión de sus parches, particularmente del parche que domina la clase (**Figura 4B**), resultando en más (**Figura 3C**) y más pequeños parches (**Figura 4D**). La clase *Río o lago* disminuyó ligeramente y luego aumentó significativamente su proporción en el paisaje (**Figura 3B**), a la vez que su índice del parche más grande (**Figura 4B**) y su tamaño medio del parche (**Figura 4D**) tendieron a aumentar, y su número de parches a disminuir (**Figura 3D**). Esto denota que hubo una pérdida inicial de los parches más pequeños y un posterior crecimiento de los parches más grandes. La clase *Área antropizada* tendió a reducirse (**Figura 3B**), lo que pudo deberse, primero, a la desaparición de parches pequeños (**Figura 3D**) y a la disminución del área de los parches más grandes (**Figura 4D**).

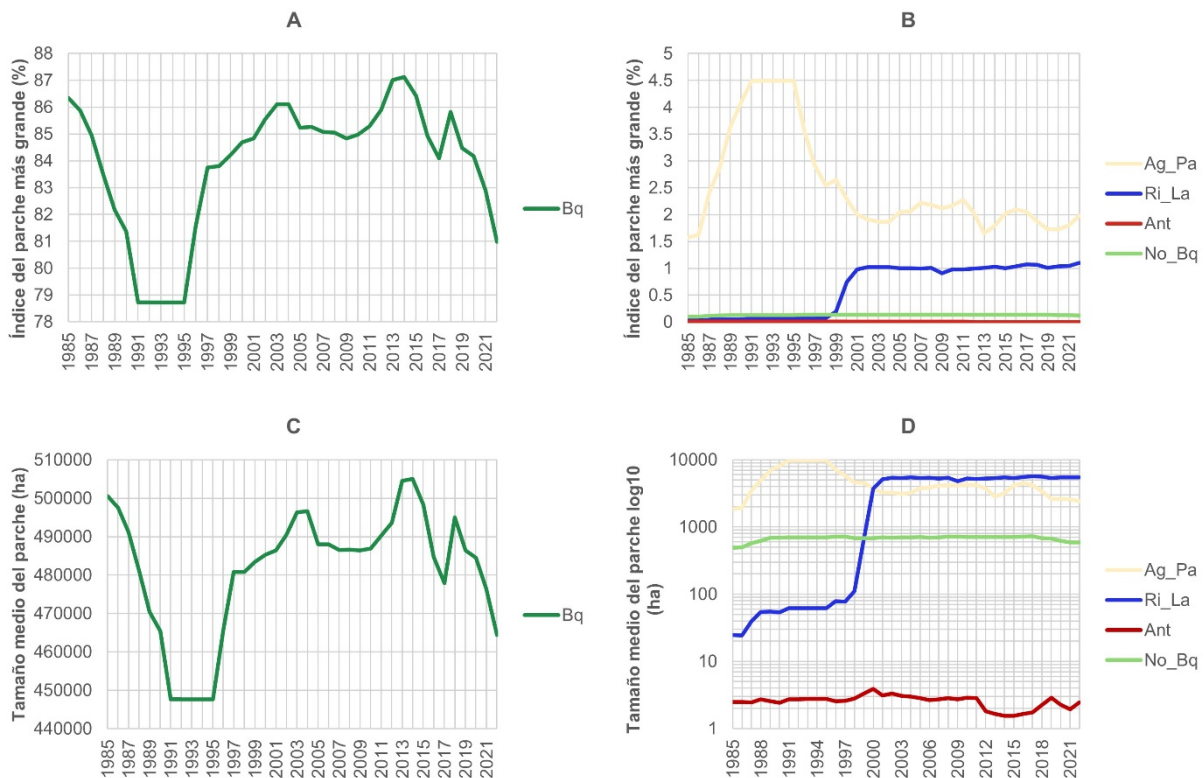


Figura 4. Trayectoria temporal de las métricas de estructura del paisaje: A) y B) Índice del parche más grande (LPI), y área media del parche (Area_AM) C) en escala lineal y D) en escala logarítmica. A la izquierda se muestra la clase dominante y a la derecha las demás clases. Bq=Bosque, Ag_Pa=Mosaico de agricultura y/o pasto, Ri_La=Río o lago, Ant=Área antropizada, No_Bq=Formación natural no forestal

Posteriormente, entre 2003 y 2009, la clase *Bosque* tendió a reducir y la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* a aumentar ligeramente su área relativa (**Figura 3A**), índice del parche más grande (**Figura 4A y B**) y tamaño medio del parche (**Figura 4C y D**). La fluctuación del número de parches de la clase *Bosque* (**Figura 3C**) indica que en algunos años predominó un proceso de fragmentación y en otros, uno de pérdida de los parches más grandes. Por esto, se aislaron ligeramente los parches (**Figura 5A**) y, entre 2002 y 2007, se perdió el 0.5% de conectividad, aunque solo se perdió el 0.3% de la clase *Bosque* (**Figura 6 y Tabla 2**). La conectancia fluctuó durante el periodo, pero el cambio neto es negativo (**Figura 5B**). El número de parches para la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* disminuyó y luego aumentó (**Figura 3C**), indicando que aumentó su presencia en zonas que favorecían la conexión de parches y, luego, lo hizo en forma de parches aislados. Además, la clase *Río o lago* tendió a disminuir ligeramente su área relativa (**Figura 3B**), índice del parche más grande (**Figura 4B**) y tamaño medio del parche (**Figura 4D**), y a aumentar su número de parches (**Figura 3D**), lo que indica que dominaron procesos de fragmentación. La clase *Área antropizada* tuvo un cambio neto positivo en su área relativa (**Figura 3B**), debido a la ampliación de parches (**Figura 4D**) que llevó a su unificación (**Figura 3D**); aunque entre 2007 y 2008 ocurrió el proceso inverso.

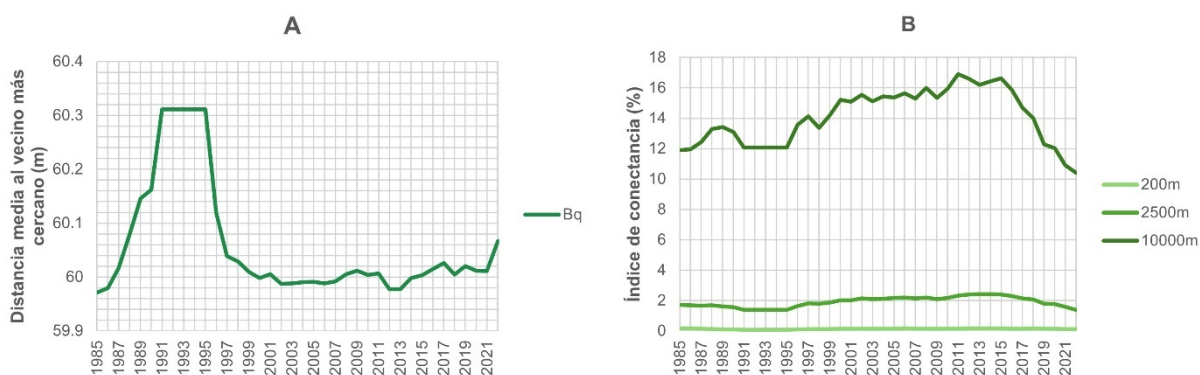


Figura 5. Trayectoria temporal para la clase *Bosque* de A) la métrica de conectividad estructural: Distancia media al vecino más cercano (ENN_AM), y B) la métrica de conectividad estructural-funcional: Índice de conectancia (CONNECT) con tres umbrales de distancia

Entre 2009 y 2014, la clase *Bosque* se comportó de manera similar al periodo 1995-2003 en su extensión (**Figura 3A; Figura 4A y C**); el número de parches (**Figura 3C**), la distancia media al vecino más cercano (**Figura 5A**) y la conectancia (**Figura 5B**) también lo hicieron, aunque con algunas fluctuaciones. Esto provocó aumentos en la conectividad que casi duplicaron el aumento

en el área de la clase *Bosque* entre 2007 y 2012 (**Figura 6** y **Tabla 2**). Esto indica la expansión y conexión de parches, así como la aparición de parches aislados que favorecieron la conectividad entre parches. Aunque la clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* se redujo levemente (**Figura 3A**), su índice del parche más grande (**Figura 4B**), área media del parche (**Figura 4D**) y número de parches (**Figura 3C**) fluctuaron y fueron menos consistentes que entre 1995 y 2003. Esto puede deberse a la reducción del área de los parches más grandes y aparición de parches pequeños; luego, a la desaparición de algunos parches grandes; y, por último, a la desaparición de parches pequeños. Además, la clase *Río o lago* se comportó como al final del periodo 1995-2003 (**Figura 3B**), incrementando levemente el área de los cuerpos de agua más grandes (**Figura 4B**). La clase *Área antropizada* fluctuó en su proporción en el paisaje (**Figura 3B**) debido a la alternancia de procesos de aparición de parches pequeños (**Figura 3D**) que redujeron el tamaño medio del parche (**Figura 4D**) y aumentaron el área relativa, y procesos de pérdida en número y tamaño de los parches.

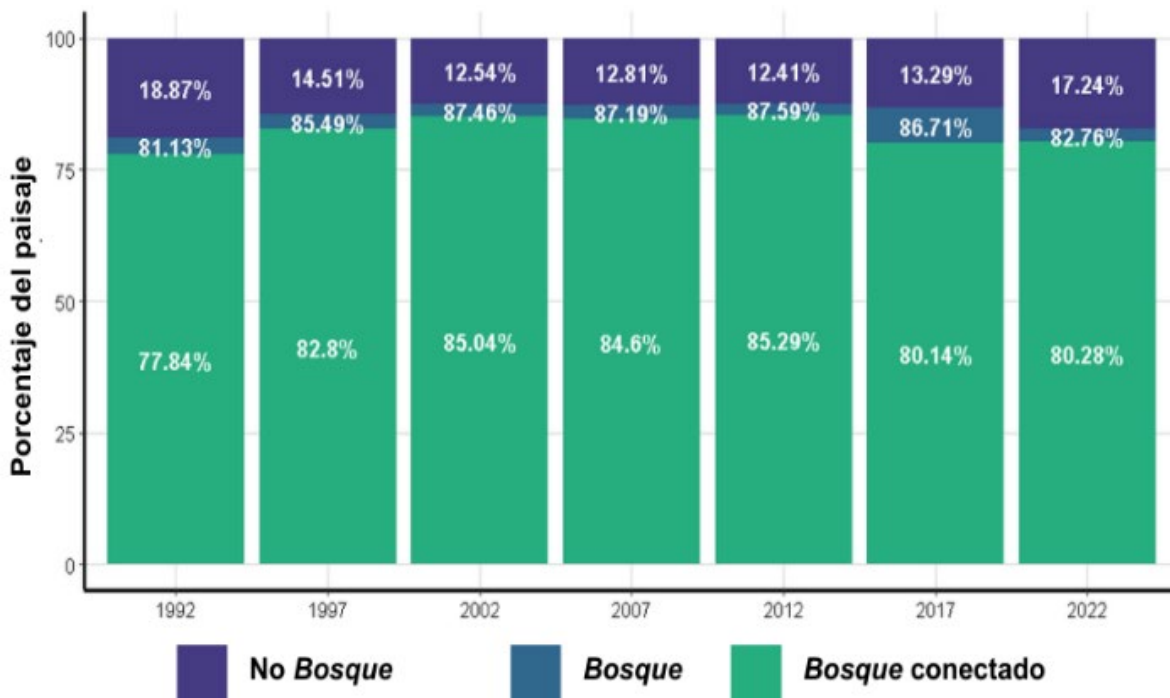


Figura 6. Trayectoria temporal de la métrica de conectividad estructural-funcional para la clase *Bosque*: Área conexas equivalente (ECA) con un umbral de distancia de 200m. Los umbrales de 2500 y 10000m, debido a su comportamiento similar al umbral de 200m, se presentan en el

Finalmente, entre 2014 y 2022, la clase *Bosque* se comportó como en el periodo 2003-2009, pero en mayores proporciones (**Figura 3A y C; Figura 4A y C; Figura 5A**), provocando una pérdida consistente de conectancia (**Figura 5B**) y del 6% del *Bosque* conectado hasta 2017 (**Figura 6**). Entre 2017 y 2022 esta conectividad aumentó ligeramente, aunque continuó perdiéndose área de *Bosque* (**Tabla 2**). La clase *Mosaico de agricultura y/o pasto* tendió a aumentar su área relativa (**Figura 3A**) debido a la ampliación de los parches existentes (**Figura 4D**) y aparición de nuevos parches (**Figura 3C**), y posterior reducción del área de los parches grandes y aparición de parches pequeños. Asimismo, la clase *Río o lago* tendió a aumentar su área relativa (**Figura 3B**), índice del parche más grande (**Figura 4B**) y tamaño medio del parche (**Figura 4D**), aunque presentó una reducción considerable en estas métricas durante 2019. Mientras, su número de parches tendió a disminuir y, luego, a aumentar a partir de 2019 (**Figura 3D**), lo que puede indicar que la conexión de parches favorecida por el aumento en el área fue acompañada por el surgimiento de nuevos parches a partir de 2019. La clase *Área antropizada* tendió a extenderse en el paisaje (**Figura 3B**) debido a una tendencia de aumento en el número (**Figura 3D**) y área de los parches (**Figura 4D**).

Tabla 2. Comparación de los cambios quinquenales del *Bosque* conectado (dECA) y el *Bosque* (dA) con un umbral de distancia de 200m. Los umbrales de 2500 y 10000m, debido a su comportamiento similar al umbral de 200m, se presentan en el **Anexo 4**

Año	dA (%)	dECA (%)	Comparación
1992	-	-	-
1997	5.376	6.366	dECA>dA>0
2002	2.298	2.716	dECA>dA>0
2007	-0.309	-0.526	dECA<dA<0
2012	0.456	0.826	dECA>dA>0
2017	-1	-6.048	dECA<dA<0
2022	-4.559	0.184	dECA>0>dA

El paisaje de la cuenca alta del río Sinú: cuatro décadas de transformación

Leyenda de clases

- Bosque
- Formación natural no forestal
- Mosaico de agricultura y/o pasto
- Río o lago
- Área antropizada

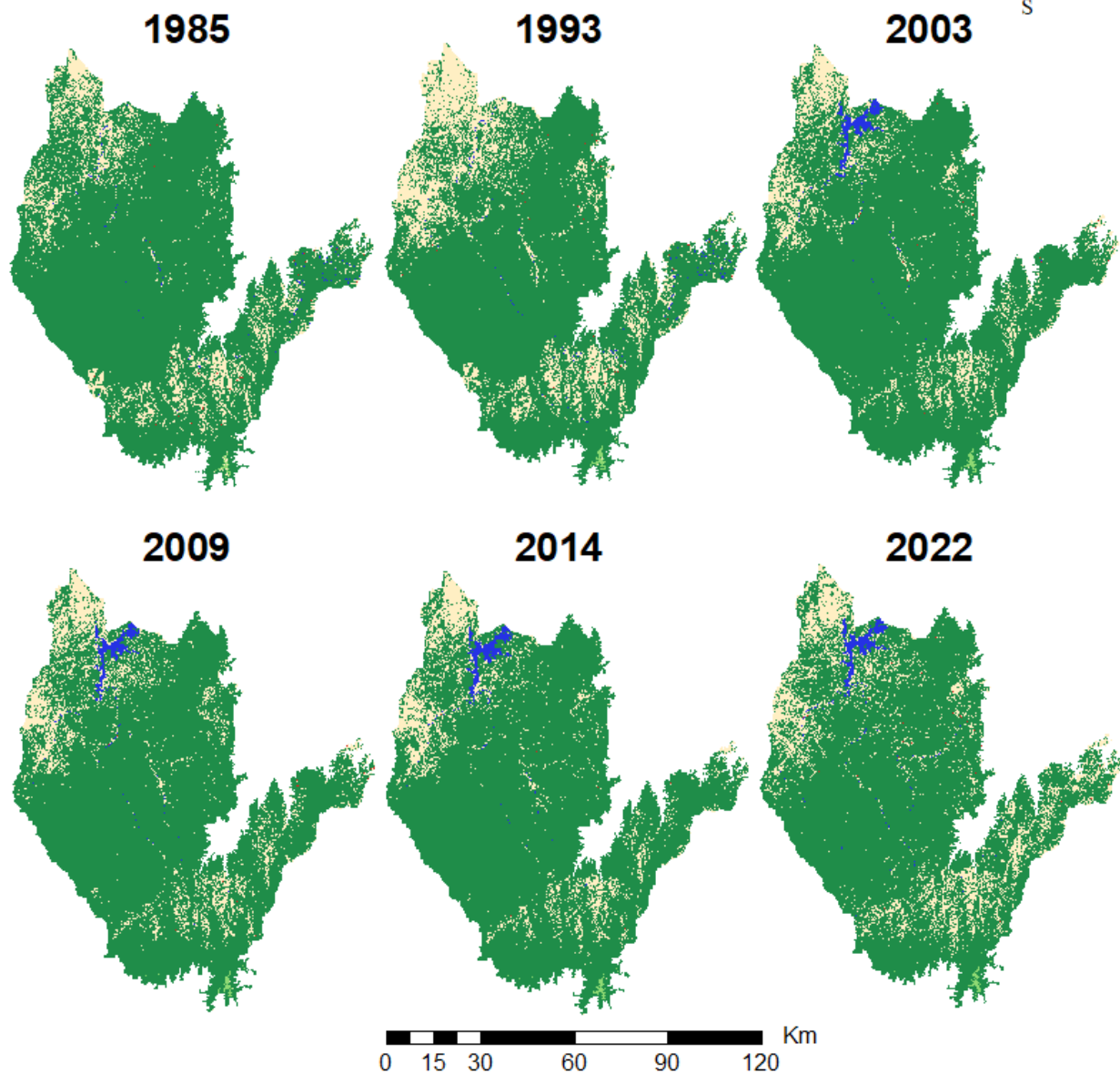


Figura 7. Mapas del paisaje de la cuenca alta del río Sinú durante el periodo 1985-2022

Análisis de contenido

Se presenta una síntesis de la información encontrada en la revisión bibliográfica. El **Anexo 5 y 6** presentan autores, causas y consecuencias no referidos aquí, pero incluidos en la *Discusión*.

Tabla 3. Procesos reportados en la literatura que se asocian al proyecto hidroeléctrico Urrá y son causantes de las transformaciones en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú

Tipo	Causa	Ejemplo	Autor
Socio-económico	Facilitación del acceso a áreas poco alcanzables por procesos de colonización	"Esta [...] problemática de intensificación de la presión sobre las poblaciones silvestres se ve favorecida por la infraestructura que rodea el embalse, especialmente las vías de penetración que facilitan el desplazamiento [...] hasta lugares [...] antes [...] resguardados por la dificultad de acceso."	CVS (2004)
Político	Obligaciones de compensación ambiental en zonas deforestadas alrededor del embalse	"Entre los años 1999 y 2013 se reforestaron un total de 2.058 hectáreas con plantaciones forestales protectoras"	Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022)
Natural	Mantenimiento de niveles similares o mayores a los naturales en las ciénagas	"a nivel medio mensual, los niveles en estos cuerpos de agua son superiores o similares a los naturales históricos para todas las épocas del año."	
Tecnológico	Inundación de terrenos de vocación agropecuaria por el llenado del embalse en noviembre de 1999	"se presentó una pérdida de áreas fértiles, ya que [...] se inundaron [...] tierras para el embalse, a pesar de que Tierralta [...] está ubicada en el Parque Nudo de Paramillo, lo cual [...] perjudicó la siembra que venían haciendo los Embera y el campesinado."	Rodríguez González (2017)
Cultural	Transición de asentamientos dispersos a agrupados de los indígenas Embera Katío	"Los asentamientos indígenas, después de la construcción de la hidroeléctrica [...] cambiaron el patrón disperso y en varias comunidades los tambos se encuentran bastante cercanos el uno del otro"	Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla (2020)

Tabla 4. Procesos reportados en la literatura que se asocian al proyecto hidroeléctrico Urrá y son consecuencia de las transformaciones en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú

Tipo	Consecuencia	Ejemplo	Autor
Socio-económico	Favorecimiento de la expansión de la frontera agrícola	"la influencia que tuvo Urrá I sobre la ampliación de la frontera agrícola en Córdoba, a partir del desecamiento de los espejos de agua"	OCA et al. (2017)
Natural	Reducción del hábitat terrestre y el hábitat acuático	"la inundación redujo el hábitat de especies silvestres amenazadas"	
		"áreas de maduración y desove [de la dorada] serán ocupadas por el embalse."	García (2000)
		"El área inundada era habitada por una variedad de especies"	Acosta (2013)
		"la regulación del caudal cambiará las condiciones hidráulicas de las ciénagas [...] la reducción del hábitat acuático [afectaría] la flora y la fauna"	Alzate et al. (1987)
	Alteración de los regímenes naturales de inundación en los márgenes del río Sinú	"áreas donde ya no existen humedales, áreas aledañas al río Sinú que ya no son periódicamente inundables producto de la entrada en operación de la hidroeléctrica"	CVS (2004)
Modificación de los parámetros de calidad del recurso hídrico a partir de 1999	"un incremento [después del represamiento] de las condiciones anóxicas, acidificación y productividad [...]; condiciones que aumentan la [...] metilación de Hg y [...] biomagnificación"	Marrugo-Negrete et al. (2015)	
Cultural	Desplazamiento de los pobladores de la zona del embalse	"La ejecución del proyecto [...] URRÁ I, trajo [...] la movilización de la población que habitaba las áreas de obras civiles y el embalse"	Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022)
	Afectación de las dinámicas productivas en la zona del embalse	"se presentó una pérdida de áreas fértiles, ya que [...] se inundaron [...] tierras para el embalse, [...] lo cual no solo desplazó a parte de la comunidad indígena, sino que perjudicó la siembra que venían haciendo los Embera y el campesinado."	Rodríguez González (2017)

Discusión

Causas y consecuencias de la transformación alrededor del proyecto hidroeléctrico Urrá

Las pérdidas de *Mosaico de agricultura y/o pasto* entre 1995 y 2003 son consistentes, en primer lugar, con la expropiación, iniciada en 1993, de 6400-7400 ha aprovechadas por casi 600 familias campesinas asentadas en la zona del embalse (Rodríguez González, 2017; Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla, 2020; Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). En segundo lugar, la pérdida es consistente con el inicio del llenado del embalse a finales de 1999 (Rodríguez González, 2017; Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Así, las pérdidas de *Mosaico de agricultura y/o pasto* se deben a su transformación en *Bosque* tras ser deshabitados terrenos con vocación agropecuaria y a su transformación en *Río o lago* donde se formó el embalse (**Figura 7**), con lo que se desplazó a la población ahí asentada y se afectó la economía tradicional de las comunidades (Rodríguez González, 2017; Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). A pesar de que Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022) reporta que las inundaciones ocasionales del Resguardo Embera Katío del Alto Sinú afectan zonas escarpadas no cultivables, se evidenció que afectan *Mosaico de agricultura y/o pasto* dentro y fuera del Resguardo, como afirman Acosta (2013), Leguizamón Castillo (2015) y Rodríguez González (2017). Por otro lado, las pérdidas de *Área antropizada* desde 1996 guardan coherencia con la transición de un patrón de asentamiento disperso a uno agrupado entre las comunidades Embera Katío, lo cual fue impulsado por la construcción de obras civiles asociadas al proyecto hidroeléctrico (Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla, 2020) iniciada en 1993 tras recibir la licencia ambiental (García, 2000; Acosta, 2013).

La CVS (2004) y Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022) reportan que en la zona del embalse existían mayormente pastos, rastrojos bajos, cultivos y áreas quemadas, mientras que 1-2.6% era bosque intervenido, secundario o de galería. La presente investigación evidenció que se subestimó la pérdida forestal (**Figura 7**), ya que los estudios habrían sido previos a la aprobación de la licencia ambiental en 1993 (Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla, 2020) y al aumento de *Bosque*. No obstante, aunque la inundación provocó la pérdida de grandes extensiones de *Bosque*, reduciendo el hábitat de especies silvestres (Acosta, 2013), es desacertada la denuncia de que se inundó una zona formada casi totalmente por bosque húmedo tropical (Marrugo-Negrete et al., 2015), ecosistemas boscosos (OCA et al., 2017) o selva (Leguizamón Castillo, 2015). La pérdida de *Bosque* por su transición hacia *Río o lago* habría sido enmascarada por ganancias en el resto del

área de estudio y por las plantaciones forestales que el proyecto hidroeléctrico Urrá implementó como compensación entre 1999 y 2013 en zonas deforestadas alrededor del embalse (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Las ganancias de *Río o lago* desde 1999 se alinean con el llenado del embalse, cuyo represamiento afecta la calidad del agua (CVS, 2004; Leguizamón Castillo, 2015; Marrugo-Negrete et al., 2015; OCA et al., 2017) y los hábitats de desove de especies ícticas (García, 2000). Además, las ganancias se asociaron con la creación de 19 lagos artificiales en las zonas de extracción de material para la presa (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022).

Las pérdidas de *Bosque*, y las ganancias de *Mosaico de agricultura y/o pasto* y *Área antropizada* entre 2003 y 2009 guardan coherencia con las proyecciones de Alzate et al. (1987) y lo reportado por la CVS (2004) respecto a los efectos de la construcción de vías para comunicar a la hidroeléctrica con los centros urbanos. Según estos autores, se facilitó la entrada a zonas antes poco accesibles, promoviendo la colonización y transformación de *Bosque* en *Mosaico de agricultura y/o pasto* y *Área antropizada* (**Figura 7**), esta última por actividades como la minería. Así, las labores de reforestación que llevó a cabo el proyecto hidroeléctrico durante este periodo (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022) no habrían compensado del todo esta transformación. Por otro lado, la fragmentación de *Río o lago* puede haber impedido la inundación periódica natural de áreas aledañas, según la CVS (2004). En consecuencia, se habrían reducido algunos cuerpos de agua conectados al río Sinú y el hábitat acuático de muchas especies de fauna y flora, según proyecciones de Alzate et al. (1987). Además, la fragmentación habría contribuido a la expansión de la frontera agrícola por la transformación de las zonas desecadas en *Mosaico de agricultura y/o pasto*, como exponen OCA et al. (2017).

Posteriormente, las ganancias de *Bosque* entre 2009 y 2014 se alinean con las labores de reforestación de 2058 ha alrededor del embalse hasta 2013 (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022) en áreas de *Mosaico de agricultura y/o pasto* (**Figura 7**). Aunque la CVS (2004) reporta que la regulación del río Sinú desecó humedales, según Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022), permite que las ciénagas conectadas a él mantengan niveles similares o mayores a los naturales. Además, en 2009 concluyó el aumento de la capacidad del embalse (Acosta, 2013). Todo lo anterior explica las ganancias de *Río o lago* durante el periodo 2009-2014 e, incluso, 2014-2022. Tras las labores de reforestación, se implementaron enriquecimientos vegetales y arreglos agroforestales en más de 234 ha deforestadas alrededor del embalse entre 2014 y 2018 (Empresa URRÁ S.A. E.S.P.,

2022). No obstante, la facilidad de entrada y colonización de zonas antes inaccesibles que promovió el proyecto hidroeléctrico (CVS, 2004), particularmente en las zonas boscosas de protección del embalse (Alzate et al., 1987), habría provocado más pérdidas de *Bosque* a favor de *Mosaico de agricultura y/o pasto* y *Área antropizada* entre 2014 y 2022 (**Figura 7**).

La mayoría de las investigaciones sobre el proyecto hidroeléctrico Urrá han indagado los impactos de la construcción del embalse (p.e. Leguizamón Castillo, 2015; Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla, 2020) e infraestructura (p.e. Alzate et al., 1987; CVS, 2004). En consecuencia, solo ha sido posible vincular las transformaciones alrededor del embalse con los procesos subyacentes que describen estas investigaciones, dejando de lado la discusión detallada de las transformaciones en el resto del área de estudio, las cuales pueden responder a factores a mayor escala y menos directamente vinculados con el proyecto hidroeléctrico como el conflicto armado (Rodríguez González, 2017). Esto resalta la importancia de indagar las dinámicas aguas arriba del embalse, dentro del Resguardo Indígena del Alto Sinú y el PNN Paramillo. Además, otros autores describen impactos del represamiento aguas abajo como la eliminación de las inundaciones periódicas en la zona aluvial o la reducción de la carga de sedimentos (p.e. CVS, 2004; Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Estos procesos podrían manifestarse en transformaciones del paisaje porque afectan clases como *Mosaico de agricultura y/o pasto*, *Río o lago* y *Bosque*. Así, aguas abajo del proyecto hidroeléctrico se conocen algunos impactos, pero no se ha profundizado suficiente en las transformaciones del paisaje que los generan o son generadas por estos, lo cual abre interrogantes clave para la investigación de los impactos del proyecto hidroeléctrico Urrá en el territorio.

El desarrollo hidroeléctrico ha dejado de lado consideraciones ecológicas y sociales, como se vio en la falta de exigencias con que el proyecto hidroeléctrico Urrá cumplió su requisito de estudios de impacto (Alzate et al., 1987). Esta investigación da una perspectiva a largo plazo de sus impactos sobre el paisaje; llena algunos vacíos dejados por estos estudios, lo que permite resolver discrepancias entre autores; y da cuenta de los impactos positivos y negativos. Estos resultados son clave para la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales, como la construcción de un segundo embalse aguas arriba del primero, rechazada por cuenta de afectaciones que se proyectan superiores a las del primero (Comisión Colombiana de Juristas, 2011; OCA et al., 2017). Adicionalmente, el reinicio de las trayectorias de pérdida de *Bosque*

abre interrogantes respecto a los posibles efectos de esta modificación de los ecosistemas forestales del PNN Paramillo sobre el desempeño y operación de la central hidroeléctrica Urrá. Esto se debe a que los cambios en la vegetación presente en torno a los ríos condicionan su morfología e hidrología (Pacheco et al., 2022), por ende, afectando el suministro hídrico a este tipo de infraestructura.

Implicaciones de la instalación de proyectos hidroeléctricos sobre la conectividad forestal

La conectividad de *Bosque* siguió los patrones descritos al inicio de la sección anterior, ya que las presiones históricas de *Mosaico de agricultura y/o pasto* sobre *Bosque* aumentaron la separación entre sus parches y redujeron la proporción de estos que eran alcanzables desde cualquier parche para especies con capacidades cortas e intermedias de dispersión. Luego, con la llegada del proyecto hidroeléctrico en 1993 y las ganancias de *Bosque* que provocó, ambos indicadores de conectividad invirtieron su comportamiento. Asimismo, las ganancias de *Bosque* implicaron ganancias superiores en *Bosque* conectado tras la llegada del proyecto hidroeléctrico, manteniéndose con algunas fluctuaciones hasta 2012. Después de 2014, el crecimiento de *Mosaico de agricultura y/o pasto* invirtió nuevamente el comportamiento de estas métricas porque provocó una reducción continua de *Bosque*. La pérdida de *Bosque* conectado excedió la pérdida de *Bosque* hasta 2017, no obstante, en adelante, se ganó *Bosque* conectado a pesar de la pérdida. Así, como indican Murillo-Sandoval et al. (2022), la pérdida se habría dado primero en áreas clave del paisaje y luego habría sido acompañada por ganancias poco significativas en su extensión, pero importantes en su ubicación. Esto tiene importantes implicaciones de manejo del proyecto hidroeléctrico Urrá y los recursos naturales, ya que el cambio en el área de *Bosque* revela poco sobre los impactos de este si no se considera también la disponibilidad de *Bosque* accesible para distintas especies (Murillo-Sandoval et al., 2022).

En Colombia se han encontrado patrones similares de reducción de la fragmentación y aumento de la conectividad estructural en casos como los de las centrales hidroeléctricas Porce II más de una década después de la puesta en operación y Porce III inmediatamente después de su apertura (Avendaño Cañas et al., 2023). No existen suficientes investigaciones nacionales que indaguen la pérdida de conectividad por la pérdida forestal tras la llegada de proyectos hidroeléctricos, por lo que es difícil la corroboración de los cambios en la conectividad del paisaje de la cuenca alta del río Sinú desde 2014. Sin embargo, Marín et al. (2008), al intentar establecer los cambios del

paisaje a causa de la central hidroeléctrica Porce II comparando el año de inicio de operaciones con un año cuatro décadas antes, evidenciaron que, aunque aumentó el distanciamiento entre los parches de bosque primario, la conectividad estructural-funcional se incrementó, como en la presente investigación entre 2017 y 2022. Por el contrario, como en esta investigación, en otros países se ha encontrado que la pérdida de cobertura boscosa por los proyectos hidroeléctricos involucra procesos de fragmentación, lo que disminuye la conectividad estructural (p.e. Xie et al., 2022). Dado que esto tiene implicaciones ecológicas para la vida silvestre y la provisión de servicios ecosistémicos, llama la atención sobre la necesidad de imponer mayores restricciones a la escala y parámetros de los proyectos hidroeléctricos (Xie et al., 2022).

Los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones para la toma de decisiones de conservación y restauración en paisajes con proyectos hidroeléctricos, aún más considerando la importancia ecológica del PNN Paramillo. Por un lado, la conectancia mostró que para especies con capacidades de dispersión cortas o intermedias poco importan las ganancias de *Bosque* si estas no acortan la distancia entre parches dentro de los umbrales. Por otro lado, ECA mostró que para las especies con capacidades de dispersión tanto largas, como cortas e intermedias (**Anexo 3**) se favorece la disponibilidad de *Bosque*/hábitat accesible cuando las ganancias de éste ocurren en zonas que favorecen la movilidad desde y hacia múltiples parches, incluso si son eclipsadas por las pérdidas. Es importante recordar que no se consideraron las capacidades de dispersión de especies específicas, sino umbrales amplios y representativos de estas (Murillo-Sandoval et al., 2022). Así, en un paisaje donde la protección forestal absoluta es difícil por la existencia de presiones agropecuarias históricas (CVS, 2004), estos hallazgos resaltan la necesidad de una gestión organizada de los remanentes forestales en términos de conservación y restauración de áreas prioritarias que permitan la dispersión de los organismos y la persistencia de las metapoblaciones (Murillo-Sandoval et al., 2022). Aún más, indagaciones futuras sobre la conectividad estructural-funcional deben considerar que la conectancia excluye la posibilidad de que dos parches estén indirectamente conectados a través de un parche intermedio, por lo que tiende a subestimar la conectividad. Pero basarse solo en un ECA calculado con distancias euclidianas puede sobreestimarla al asumir que la distancia entre parches es suficiente para determinar la probabilidad de que las especies alcancen esos parches de paso (Camargo Martensen et al., 2017).

Trayectorias de transformación en paisajes con emplazamientos hidroeléctricos

La extensión de las clases fluctuó por periodos, presentando los cambios más notables *Bosque*, *Mosaico de agricultura y/o pasto* y *Río o lago*, seguidas por *Área antropizada* y, por último, *Formación natural no forestal*. Por un lado, puede establecerse el siguiente patrón de transformación para todo el periodo de estudio: previo a la llegada del proyecto hidroeléctrico, *Bosque* se encontraba bajo presión por la fragmentación que provocaba el crecimiento de *Mosaico de agricultura y/o pasto* (**Figura 7**). El inicio de la primera etapa del proyecto hidroeléctrico no solo frenó esta trayectoria, sino que la invirtió, favoreciendo la reconexión de parches de *Bosque*. Tras superar la extensión inicial de *Bosque* y alcanzar un nuevo mínimo de extensión de *Mosaico de agricultura y/o pasto* entre 2001 y 2002, sus porcentajes en el paisaje tendieron a mantenerse con pequeñas fluctuaciones. Finalmente, después de 2014, *Mosaico de agricultura y/o pasto* volvió a crecer a costa de la fragmentación de *Bosque*, fenómeno que se aceleró en 2019, hasta alcanzar una extensión mayor y reducir a *Bosque* a una menor que en 1991. *Área antropizada* presentó la misma trayectoria que *Mosaico de agricultura y/o pasto*, mientras que *Formación natural no forestal* presentó variaciones despreciables.

Así, un hallazgo importante de la presente investigación es el rol que desempeñó la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá en la interrupción inicial de las trayectorias históricas de pérdida y fragmentación forestal del último remanente de bosque primario de la cuenca ante la expansión de la frontera agropecuaria por la presencia de asentamientos campesinos e indígenas en toda el área de estudio (CVS, 2004). La contribución de los proyectos hidroeléctricos a la recuperación forestal y de otras coberturas vegetales naturales tras periodos de expansión agropecuaria e intervención antrópica se ha evidenciado en otras zonas de Colombia como el departamento de Caldas con la central hidroeléctrica Miel I (Andrade et al., 2013) donde se favoreció la conservación de especies silvestres poco conocidas (Rojas-Morales et al., 2018); Antioquia con Porce II (Marín et al., 2008) y Porce III (Avendaño Cañas et al., 2023); Santander con Hidrosogamoso y Huila con El Quimbo (Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017; Salomão et al., 2024). La instalación de algunas de estas desencadenó una regeneración vegetal en zonas abiertas de uso agropecuario gracias a la adquisición de predios para el área de protección del embalse e implicó la ejecución de labores de restauración. En el caso de Avendaño Cañas et al. (2023) y Matoma Cardona & Cañas Torres (2017), se expandieron los parches existentes, favoreciendo su

reconexión, tal como evidenció la presente investigación. Estudios en otros países han encontrado que la instalación de proyectos hidroeléctricos puede disminuir la pérdida de coberturas forestales (p.e. Andrade Castañeda, 2013 en Guatemala) o contrarrestarla del todo, en parte debido a las labores de reforestación que llevan a cabo algunos proyectos hidroeléctricos (p.e. de Siqueira Cardinelli et al., 2020 en Brasil).

Sin embargo, la presente investigación también encontró que, después de alrededor de dos décadas desde la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá a la cuenca alta del río Sinú, se recuperaron las trayectorias de transformación de *Bosque* en *Mosaico de agricultura y/o pasto* y, en menor medida, *Área antropizada* (**Figura 7**). Estos hallazgos se creen vinculados con la facilidad de acceso que dio el proyecto hidroeléctrico Urrá, tal como encontraron Magintan et al. (2017) en una reserva forestal en Malasia, Cho & Qi (2021) en una cuenca compartida por cinco países asiáticos, Almeida Affonso et al. (2022) en la Amazonía brasileña, Xie et al. (2022) en China, Zarco-González et al. (2022) en México y Velástegui Montoya et al. (2019) en la Amazonía brasileña. En esta última se evidenciaron los mismos patrones de transformación forestal de la presente investigación: aumento en el número y disminución del tamaño medio de los parches por la fragmentación de grandes relictos de bosque. No obstante, Velástegui Montoya et al. (2019) también encontraron que la presencia de una reserva indígena creó una zona de “mínima interferencia forestal”; la figura de protección del PNN Paramillo no habría ejercido este efecto dada la existencia de presiones agropecuarias sobre los relictos forestales antes del inicio del proyecto hidroeléctrico.

Los hallazgos de esta investigación llaman la atención sobre el potencial que tienen los proyectos hidroeléctricos para crear un efecto de protección, un “efecto reserva”, sobre las coberturas naturales al frenar las trayectorias de transformación históricas de un paisaje. Sería desacertado asegurar categóricamente que esto es deseable en todos los casos, por lo que se cuestiona cuáles son los escenarios bajo los cuales el favorecimiento de *Bosque* a costa de *Mosaico de agricultura y/o pasto* es beneficioso. Así, deben considerarse las particularidades del paisaje, ya que, en este caso, aunque incluye un área protegida de gran importancia ecológica (CVS, 2004; Parques Nacionales Naturales de Colombia, s.f.; Bedoya Paniagua, 2016), muchas pérdidas de *Mosaico de agricultura y/o pasto* se dieron fuera de ésta, en las riberas fértiles del Alto Sinú (Acosta, 2013). Otras particularidades que se cree pudieron influir sobre los resultados obtenidos fue la

gran extensión del área de estudio, dado que la mayoría de las investigaciones con las que se compararon los resultados analizaron pequeñas áreas en torno a los embalses (p.e. Marín et al., 2008; Magintan et al., 2017; Almeida Affonso et al., 2022; Godwyn-Paulson et al., 2023), lo que deja incógnitas respecto a la extensión espacial más adecuada para este tipo de análisis.

A esto se suman los resultados que sugieren lo que ya documentaba la literatura internacional: los proyectos hidroeléctricos impulsan nuevas actividades de explotación al facilitar el acceso humano (p.e. Cho & Qi, 2021; Almeida Affonso et al., 2022; Xie et al., 2022; Zarco-González et al., 2022; Velástegui Montoya et al., 2019). Así, las ganancias iniciales de *Bosque* con la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá fueron contrarrestadas, dejando un balance de pérdida y fragmentación para los remanentes forestales tras reiniciarse el avance de *Mosaico de agricultura y/o pasto*. Entonces, la efectividad inicial de la restauración, reforestación y revegetalización obligada de los proyectos hidroeléctricos (de Siqueira Cardinelli et al., 2020; Avendaño Cañas et al., 2023) parece ser anulada por las dinámicas de explotación que estos impulsan indirectamente, lo que cuestiona el razonamiento ecológico detrás de este tipo de obligaciones de compensación ambiental. Por ende, surgen interrogantes sobre las características de un proyecto hidroeléctrico que lo llevan a favorecer las coberturas naturales, y sobre cómo influyó la presencia del PNN Paramillo en los procesos desencadenados en el paisaje. Aún más, lleva a preguntarse por los procesos que movilizaron la pérdida de *Bosque* en 2015, tras dos décadas del inicio de las obras, y a inquirir si es posible establecer una duración del “efecto reserva” o un plazo para la manifestación de los impactos de estos proyectos (Pacheco et al., 2022; Zarco-González et al., 2022). Asimismo, este cambio en las trayectorias de transformación durante la operación de la central hidroeléctrica Urrá refuerza que los patrones de transformación son disímiles para distintas etapas de los proyectos hidroeléctricos (Cho & Qi, 2021; Pacheco et al., 2022; Xie et al., 2022; Salomão et al., 2024).

Lo anterior hace necesario investigar estos patrones de transformación a futuro, una vez haya iniciado el proyecto de restauración en una extensión 40 veces más grande que la reforestada (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Así, se establecerá si las pérdidas de *Bosque* fueron producto de la finalización de las labores compensatorias o si están asociadas a la vía libre que suelen dar los proyectos hidroeléctricos a la explotación de sus territorios de emplazamiento. La continuación de los esfuerzos de la presente investigación aportaría al desarrollo de metodologías

y enfoques integrales como la ecología del paisaje; además, impulsaría la apuesta por proyectos innovadores como MapBiomias Colombia, cuyos insumos permitieron superar décadas de vacíos de información satelital (CVS, 2004). Asimismo, dado que la mayoría de las investigaciones nacionales han considerado periodos cortos tras la instalación de proyectos hidroeléctricos (p.e. Marín et al., 2008; Andrade et al., 2013; Matoma Cardona & Cañas Torres, 2017; Avendaño Cañas et al., 2023; Salomão et al., 2024), futuras investigaciones permitirían determinar si las diferencias entre los patrones de transformación en Colombia y en otros países se mantienen o se reducen con el avance de los años de operación, como sugieren Velástegui-Montoya et al. (2019).

Por otro lado, en esta investigación *Río o lago* fluctuó a partir de 1999 según las dinámicas del embalse. Así, se atribuyeron los aumentos entre 1999 y 2003 al llenado del embalse, como en Godwyn-Paulson et al. (2023) con el embalse Peñol-Guatapé, Almeida Affonso et al. (2022) en Brasil y Xie et al. (2022) en China. Desde 2003, las fluctuaciones de *Río o lago* se asociaron al aumento de caudal que la regulación del embalse provoca aguas arriba (Empresa URRÁ S.A. E.S.P., 2022). Así, los cambios en el régimen hidrológico habrían afectado el estado de los humedales y ciénagas, un fenómeno documentado en Colombia para el embalse de Salvajina en Cauca (Ramírez Callejas et al., 2010) y para múltiples embalses en la cuenca del río Magdalena (Angarita et al., 2018; Valencia-Rodríguez et al., 2022). Adicionalmente, las modificaciones de la capacidad del embalse que finalizaron en 2009 dan cuenta de que los embalses hidroeléctricos pueden continuar creciendo décadas después del momento de llenado. Investigadores como Godwyn-Paulson et al. (2023) demostraron una situación similar en el embalse Peñol-Guatapé, el cual presentó aumentos considerables incluso cuatro décadas después de su formación.

No obstante, la presente investigación analizó conjuntamente el embalse, los ríos y los humedales, por lo que fue difícil identificar las trayectorias de transformación, ya que incluso variaciones ligeras en la extensión del embalse habrían eclipsado los cambios de los demás cuerpos de agua. Bauni et al. (2015) hicieron un análisis similar en Argentina, pero tomaron al embalse como una clase distinta al resto de cuerpos de agua, por lo que pudieron evidenciar con precisión que se pierden humedales durante el proceso de inundación. Asimismo, Pacheco et al. (2022) encontraron que la regulación de un embalse en Chile disminuyó las descargas del río, reduciendo las áreas aledañas cubiertas por agua; algo similar fue identificado por Salomão et al. (2024) en el departamento de Santander. Contrariamente, Xie et al. (2022) encontraron en China

que el represamiento aumenta el área de los cuerpos de agua asociados, algo similar a lo encontrado en la presente investigación. Por esto, nuevas investigaciones sobre la transformación del paisaje a causa de proyectos hidroeléctricos deberían discriminar los cuerpos de agua en estas dos categorías, de manera que se tracen trayectorias de cambio claras y se facilite su vinculación con los procesos subyacentes.

Conclusiones

Desde antes de la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá al paisaje de la cuenca alta del río Sinú, este se encontraba en proceso de transformación debido a la presencia de asentamientos y actividades de explotación agropecuaria dentro y fuera del PNN Paramillo. Ante el avance agropecuario, se fragmentaron grandes relictos de bosque primario, lo que disminuyó la conectividad estructural y estructural-funcional, especialmente para los organismos con menores capacidades de dispersión. No obstante, una vez iniciada la primera etapa del proyecto hidroeléctrico, la estructura del paisaje pasó a ser determinada por dos factores: la ejecución de labores de compensación ambiental por parte de la Empresa URRÁ y la capacidad del proyecto hidroeléctrico para impedir la entrada de actividades de explotación al territorio. De esta manera, tras la creación del área de protección del embalse y durante los años que duraron las labores de reforestación y revegetalización, la cobertura forestal creció y, luego, tendió a mantenerse en niveles similares a los que presentó en 1985. Así, se favoreció la reconexión de sus parches y el aumento de su conectividad, incluso en magnitudes mayores a las de la ganancia forestal, a costa de la continuidad de las áreas agropecuarias que empezaron a fragmentarse.

Cuando finalizaron las labores de compensación ambiental, el mayor determinante de la estructura del paisaje de la cuenca alta del río Sinú fue la facilidad para acceder y explotar el territorio por la apertura de vías que conectaban al proyecto hidroeléctrico con los centros urbanos. Así, la cobertura forestal se redujo hasta niveles similares a los que presentó en 1991 por un avance de las actividades agropecuarias que se equiparó con el evidenciado antes de la llegada del proyecto hidroeléctrico. Como resultado, aumentó la fragmentación forestal y se redujo la conectividad estructural y estructural-funcional, sin importar las capacidades de dispersión de los organismos. No obstante, primero la pérdida de hábitat conectado fue superior a la pérdida forestal y, luego, se ganó hábitat conectado a pesar de que continuó la fragmentación. Así, aunque se abren posibilidades para la restauración y conservación en áreas de la cuenca alta del río Sinú

que favorezcan la conectividad, también se cuestiona la efectividad de estos esfuerzos ante las dinámicas de explotación que los proyectos hidroeléctricos impulsan indirectamente.

Aunque el embalse de Urrá inundó grandes extensiones de áreas agropecuarias y boscosas, no fue un factor determinante de la estructura del paisaje, ya que representó alrededor del 1% de este.

Contrariamente, las dinámicas de regulación hídrica del embalse condicionaron el comportamiento de otros cuerpos de agua presentes en el paisaje, los cuales son clave para el sustento de especies silvestres y de las comunidades humanas asentadas en torno al río Sinú.

Asimismo, los cambios en la estructura y conectividad de la cobertura boscosa pueden vincularse a afectaciones sobre las especies silvestres, mientras que los cambios en la estructura de las áreas agropecuarias dan sentido a impactos que otras investigaciones habían identificado tras la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá como la afectación de la economía tradicional. Como la cuenca alta del río Sinú no está aislada del resto de la cuenca, estas consecuencias de la transformación del paisaje se manifiestan también aguas abajo de la represa, lo que puede provocar, a su vez, cambios en la estructura y conectividad del paisaje de las cuencas media y baja.

Por un lado, la presente investigación proporciona información importante respecto a los factores del proyecto hidroeléctrico Urrá que contribuyeron y aquellos que dificultaron la recuperación y mantenimiento de la cobertura forestal en el último relicto de bosque primario de la cuenca del río Sinú. Aún más, las metodologías novedosas para el área de estudio permitieron llenar vacíos respecto a los impactos del proyecto hidroeléctrico Urrá y determinar que, hasta ahora, se había sobre y subestimado la pérdida forestal por cuenta de la formación del embalse. Todo esto guarda gran relevancia para la toma de decisiones de manejo de los recursos naturales en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú. Por otro lado, los hallazgos encontrados abren nuevos horizontes a la indagación científica, particularmente en lo que respecta a los factores puntuales que impulsaron nuevas trayectorias de pérdida forestal y expansión agropecuaria dentro y fuera del PNN

Paramillo tras dos décadas de la llegada del proyecto hidroeléctrico Urrá. Asimismo, se resalta la necesidad de seguir monitoreando el comportamiento de las trayectorias evidenciadas desde 2014, considerando que el proyecto de restauración ecológica de la Empresa URRÁ está en etapa de alistamiento.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al inmenso apoyo prestado por mi director, Camilo Andrés Correa Ayram, en cada momento del proceso. Agradezco la confianza que me entregó mi codirectora, Úrsula Jaramillo Villa, para llevar a cabo este ejercicio académico enmarcado en su tesis doctoral *Equidad y gobernanza del agua en territorios intervenidos con hidroeléctricas*, la cual hace parte del proyecto *Water security for whom? Social and material perspectives on inequality around multipurpose reservoirs in Colombia* que financia la Fundación Volkswagen. También agradezco enormemente a mi familia y a mi novio por toda la fortaleza y serenidad que me transmitieron durante estos meses de trabajo constante. Por último, reconozco que cada uno de los aciertos de esta investigación es producto de los conocimientos y habilidades que mis profesores me han impulsado a adquirir y desarrollar, así que, a todos ellos, gracias.

Literatura citada

Acosta, K. (2013). *La economía de las aguas del río Sinú*.

Almeida Affonso, A., Mandai, S. S., Pineda Portella, T., Quintanilha, J. A., & Grohmann, C. H. (2022). *Tracking Land Use and Land Cover Changes in the Volta Grande Do Xingu (Pará-Brazil) Between 2000 and 2017 Through Three Pixel-Based Classification Methods*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2022-July, 5630–5633.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9884422>

Alvarado, D. C., Vargas-Luna, A., & Giraldo-Osorio, J. D. (2023). Upstream and Downstream Changes in the Channel Width and Sinuosity Due to Dam Construction in Tropical Rivers: The Case of Colombia. *Applied Sciences*, 13. <https://doi.org/10.3390/app13127109>

Alzate, A.; Brunal, B. S., Díaz Urzola, M., Massiris, A., & Yances Torres, R. (1987). *Impactos Sociales del Proyecto Hidroeléctrico de Urrá*. Centro de Investigación Social Fundación del Caribe.

Andrade, G. I., Valderrama, E., Vanegas, H. A., & González, S. (2013). Regeneración del hábitat en áreas con presencia documentada de especies amenazadas. Una contribución a la conservación asociada a la operación del proyecto Central Hidroeléctrica Miel I, cordillera Central de Colombia, departamento de Caldas. *Biota Colombiana*, 14(2), 313–326.

Andrade Castañeda, J. C. (2013). Dinámica de la cobertura forestal de las microcuencas de los ríos tributarios de la hidroeléctrica Palo Viejo, ubicada en los municipios de San Juan Cotzal y San Miguel Uspantán del Departamento del Quiché, Guatemala. *Revista de La Universidad Del Valle de Guatemala*, 26, 41–50.

Andrade Navia, J. M., & Olaya Amaya, A. (2023). Impactos ambientales asociados a las hidroeléctricas en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(2), 217–250. <https://doi.org/10.22490/21456453.6074>

Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A., Delgado, J., & Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839–2865. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA]. (2018). *ANLA realizó seguimiento a proyecto hidroeléctrico Urrá I*. https://www.anla.gov.co/01_anla/noticias/1265-anla-realizo-seguimiento-a-proyecto-hidroelectrico-urra-i#:~:text=Fue%20as%20como%20en%20octubre,de%20construcci%C3%B3n%20del%20complejo%20multiprop%C3%B3sito

Avendaño Cañas, M., Gañan Tapasco, C. C., & Suárez Gómez, J. A. (2023). Conectividad ecológica en las áreas de influencia de los embalses Porce II y Porce III. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76.

Banco Interamericano de Desarrollo [BID], Ministerio de Minas y Energía [MinMinas], Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [MinTIC], Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], & Iniciativa Colombia Inteligente. (2016). *Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Smart-Grids-Colombia-Visi%C3%B3n-2030.aspx>

Barrera Villalba, Y. E. (2021). *Evaluación del impacto socioeconómico de la construcción y operatividad del embalse Urrá I en los pescadores de Tierra Alta, Córdoba*.

Bastian, O. (2001). Landscape ecology - towards a unified discipline? *Landscape Ecology*, 16, 757–766. <https://doi.org/10.1023/A:1014412915534>

Bauni, V., Schivo, F., Capmourteres, V., & Homberg, M. (2015). Ecosystem loss assessment following hydroelectric dam flooding: The case of Yacyretá, Argentina. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1, 50–60. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2015.06.003>

Bedoya Paniagua, M. Á. (2016). *Valoración del servicio ecosistémico de provisión de agua hacia diferentes sectores con relación a la Cuenca del Río Sinú-Parque Nacional Natural Paramillo*. <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2018/08/Informe-de-valoracion-recurso-hidrico-PNN-Paramillo-Cuenca-Sinu.pdf>

Borja, M. O., Camargo, R., Moreno, N., Turpo, E., & Villacis, S. (2020). A long-term land cover and land use mapping methodology for the andean amazon. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W12), 373–378. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-373-2020>

Bürgi, M., Hersperger, A. M., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change - current and new directions. *Landscape Ecology*, 19, 857–868.

Camargo Martensen, A. C., Saura, S., & Fortin, M. J. (2017). Spatio-temporal connectivity: assessing the amount of reachable habitat in dynamic landscapes. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(10), 1253–1264. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12799>

Chețan, M. A., Dornik, A., & Urdea, P. (2018). Analysis of recent changes in natural habitat types in the Apuseni Mountains (Romania), using multi-temporal Landsat satellite imagery (1986–2015). *Applied Geography*, 97, 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.06.007>

Cho, M. S., & Qi, J. (2021). Quantifying spatiotemporal impacts of hydro-dams on land use/land cover changes in the Lower Mekong River Basin. *Applied Geography*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102588>

Comisión Colombiana de Juristas. (2011). *“Urrá II”, una amenaza mortal para el pueblo indígena Embera Katío del alto Sinú*.

Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge [CVS]. (2004). *Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial & Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo [FONADE]. <https://cvs.gov.co/documentos-de-interes/>

Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge [CVS]. (2020). Plan de Acción Institucional 2020-2023. https://cvs.gov.co/web/wp-content/docs/PLAN_DE_ACCION_CVS_2020-2023.pdf

Corzo Arévalo, D. H. (2022). Gestión de conflictos socioeconómicos en el embalse Topocoro, Santander. *Cuaderno de Trabajo Social*, 1(19), 41–69. <https://orcid.org/0000-0001-6017-8028>.

Departamento Nacional de Estadística [DANE]. (2018). *Medida de Pobreza Multidimensional Municipal 2018*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/pobreza/2020/Anexos_medida_pobreza_mun_CNPV_2018.xlsx

Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2020). Áreas protegidas en Planes de Desarrollo Municipales y Departamentales. En *Kit de Planeación Territorial*. https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2015/07/KPT_Lineamientos-Areas-Protegidas-en-PD.pdf

de Siqueira Cardinelli, L., Marinaldo Gleriani, J., & Venâncio Martins, S. (2020). Land cover dynamics and landscape structure in the area surrounding water reservoirs, mountainous region of Rio de Janeiro. *Floresta*, 50(4), 1808–1817. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i4.65893>

Díaz Carvajal, A. D. (2022). *Variabilidad hidrológica en la cuenca del río Sinú 1981-2020*.

Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022). *Preguntas Frecuentes*. <https://urra.com.co/wp-content/uploads/2022/08/Preguntas-Frecuentes-V0822.pdf>

Etter, A. (1991). *Introducción a la Ecología del Paisaje: Un Marco de Integración para los Levantamientos Ecológicos*.

García, V. A. (2000). Impactos de la Hidroeléctrica Urrá en los peces migratorios del río Sinú. *Temas Agrarios*, 5(9), 29–39.

Godínez-Gómez, O., & Correa Ayram C. A. (2020). *Makurhini: Analyzing landscape connectivity*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3771605>

Godwyn-Paulson, P., Jonathan, M. P., Londoño Pineda, A., Vélez Rojas, O., Muthusankar, G., Gutiérrez-Mosquera, H., & Lakshumanan, C. (2023). Four-decade (1977–2017) landscape tale of

tourist reservoir hotspot Peñol-Guatapé, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(796). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11369-5>

Gómez Zárate, P., & Arroyave Arrubla, S. I. (2020). Dominación, apropiación y accesibilidad en la producción territorial del Alto Sinú desde la construcción de la hidroeléctrica Urrá, 1994-2019. *Perspectiva Geográfica*, 25(1), 35–55. <https://doi.org/10.19053/01233769.9316>

Gounaridis, D., Zaimis, G. N., & Koukoulas, S. (2014). Quantifying spatio-temporal patterns of forest fragmentation in Hymettus Mountain, Greece. *Computers, Environment and Urban Systems*, 46, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.04.003>

Hersperger, A. M., Gennaio, M.-P., Verburg, P. H., & Bürgi, M. (2010). Linking land change with driving forces and actors: four conceptual models. *Ecology and Society*, 15(4). <http://www.jstor.org/stable/26268195>

Hurtado Hidalgo, J. I. (2014). Cronología del sector eléctrico colombiano. *Revista de Santander*, 9, 56–77. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasantander/article/download/8864/8757/40607>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/MEMORIAS-MAPA-ZONIFICACION-HIDROGRAFICA.pdf>

International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2012). *Renewable Energy Technologies: Cost Analyses Series*, 1(3). www.irena.org/Publications

Jove Wilches, F., Feria Díaz, J. J., & Hernández Ávila, J. (2020). Physicochemical characterization of the waters of the Sinú river, downstream of the Urrá reservoir, north of Colombia. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(10), 2909–2914. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.2909-2914>

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)

Leguizamón Castillo, Y. R. (2015). Conflictos ambientales y movimientos sociales: el caso del movimiento embera katio en respuesta a la construcción de la represa Urrá (1994-2008).

Memoria y Sociedad, 19(39), 94–105. <https://doi.org/10.11144/javeriana.mys19-39.cams>

Ley 99 de 1993. *Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones*. 22 de diciembre de 1993. D.O. No. 41146.

Lin, Z., & Qi, J. (2017). Hydro-dam – A nature-based solution or an ecological problem: The fate of the Tonlé Sap Lake. *Environmental Research*, 158, 24–32.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.016>

Magintan, D., Lihan, T., Amirin Mohamed, K., Campos-Arceiz, A., Saaban, S., Husin, S. M., & Nor, S. M. (2017). The impact of hydroelectric development in elephant habitats in Terengganu. *Malaysian Applied Biology*, 46(4), 23–33.

Marín, A. L., Álvarez, C. F., Uribe, S. I., & Morales, M. (2008). Dinámica temporal del patrón del paisaje en el área de la hidroeléctrica Porce II (Antioquia, Colombia) de 1961 a 2001. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 23, 33–42.

Marrugo-Negrete, J., Navarro-Frómata, A., & Ruiz-Guzmán, J. (2015). Total mercury concentrations in fish from Urrá reservoir (Sinú river, Colombia). Six years of monitoring. *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), 4757–4765.

Masoudi, M., Richards, D. R., & Tan, P. Y. (2024). Assessment of the Influence of Spatial Scale and Type of Land Cover on Urban Landscape Pattern Analysis Using Landscape Metrics. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/s41651-024-00170-8>

Matoma Cardona, J. M., & Cañas Torres, J. A. (2017). *Interpretación de coberturas de la tierra y análisis multitemporal para el área de compensación ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. <http://hdl.handle.net/11349/6205>

McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer Software Program Produced by the

Authors at the University of Massachusetts, Amherst.

<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

Ministerio de Minas y Energía [MinMinas], & Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2020). *Plan Energético Nacional PEN 2020-2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible.*

<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN.aspx#:~:text=En%20el%20PEN%202020%2D2050,energ%C3%A9tico%20descentralizado%2C%20descarbonizado%20y%20digitalizado.>

Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., & Correa-Ayram, C. (2022). Rapid loss in landscape connectivity after the peace agreement in the Andes-Amazon region. *Global Ecology and Conservation*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02205>

Observatorio de Conflictos Ambientales [OCA], Instituto de Estudios Ambientales [IDEA], & Universidad Nacional de Colombia. (2017). *HIDROELÉCTRICA URRÁ I-II – EMBERA KATÍOS-ASPROCIG –CÓRDOBA Análisis de Impactos Ecosistémicos.*

https://oca.unal.edu.co/investigacion/docs/Urra/ImpEcosist_Urra_08022017.pdf

Olariu, B., Virghileanu, M., Mihai, B. A., Săvulescu, I., Toma, L., & Săvulescu, M. G. (2022). Forest Habitat Fragmentation in Mountain Protected Areas Using Historical Corona KH-9 and Sentinel-2 Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/rs14112593>

Pacheco, F., Rojas, O., Hernández, E., & Caamaño, D. (2022). Effects on Fluvial Geomorphology and Vegetation Cover following Hydroelectric Power Plant Operation: A Case Study in the Maule River (Chile). *Water*, 14(11), 1673–1691. <https://doi.org/10.3390/w14111673>

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (s.f.). *Parque Nacional Natural Paramillo.*

<https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-paramillo/>

Proyecto MapBiomias Colombia – Colección 1 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Colombia, consultada el 10 de febrero de 2024 a través del enlace:

[https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/colombia/collection_1/coverage/colombia_coverage_\[año\].tif](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/colombia/collection_1/coverage/colombia_coverage_[año].tif)

Rahman, A., Farrok, O., & Haque, M. M. (2022). Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>

Ramírez Callejas, C., Santacruz, S., Bocanegra, R. A., & Sandoval, M. C. (2010). Incidencia del embalse de Salvajina sobre el régimen de caudales del río Cauca en su valle alto. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 9, 89–99.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434011>

Rangel-Blanco, L., Mendoza-Rivas, L., Esqueda-Walle, R., & Flores-Hernández, A. (2017). La Situación Socioeconómica en la Cuenca. En G. Arcos-Espinosa, D. González-Turrubiates, & E. Martínez-Cano (Eds.), *El Recurso Hídrico en Tamaulipas: La Cuenca del Río Guayalejo Tamesí* (pp. 67–101).

https://www.researchgate.net/publication/341178185_La_Situacion_Socioeconomica_en_la_Cuenca

Roa, C., Orjuela Rodríguez, J. K., & Cerquera Pacheco, A. F. (2019). Central hidroeléctrica de Chivor y su impacto socioeconómico en el Valle de Tenza. *Territorio y Desarrollo*, 3(1), 20–26.

Rodríguez González, M. J. (2017). La Vida se Quedó en el Río Sinú. El Estado, los Embera-Katio de Tierralta y la Represa Urrá I. *Democracias*, 5, 145–172.

Rojas-Morales, J. A., Marín-Martínez, M., & Zuluaga-Isaza, J. C. (2018). Aspectos taxonómicos y ecogeográficos de algunas serpientes (Reptilia: Colubridae) del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Miel I, Caldas, Colombia. *Biota Colombiana*, 19(2), 73–91.

<https://doi.org/10.21068/c2018.v19n02a07>

Salomão, C., Alsleben, J., Rufin, P., & Hostert, P. (2024). Mapping hydropower expansion and cash crop dynamics in Colombia using Landsat time series. *Geocarto International*, 39(1).

<https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2322064>

Souza, C. M., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A. A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L. G., Souza-Filho, P. W. M., de Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. v., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-

Martin, E., ... Azevedo, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/RS12172735>

Strielkowski, W., Civin, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: A review. *Energies*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/en14248240>

Suárez Castaño, R., Rodríguez, C. A., Ramírez Huertas, M. L., Pabon, W. A., Guerrero, O. J., Zambrano Fajardo, S. L., Bernal Forero, C. A., Fajardo Triana, D. F., Almonacid, I., Escudero Vasquez, C. Y., & Villalba Cifuentes, A. (2020). *Reporte de Alertas Subzonas Hidrográficas Río Sinú y Alto San Jorge SZH-RSASJ*. <https://www.anla.gov.co/documentos/biblioteca/27-01-2021-anla-rash-rio-sinu-alto-san-jorge.pdf>

Torres, M. A., Caballero, H., & Awad, G. (2014). Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidroituango. *Energética*, 44, 75–83. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147040027008>

Turner, M. G. (2005). Landscape Ecology: What Is the State of the Science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 319 – 344. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614>

Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (1998). *Plan de Expansión Referencia Generación Transmisión 1998-2010*. http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/1998/Plan-expansion-1998-2010.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], Pontificia Universidad Javeriana [PUJ], Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación [COLCIENCIAS], Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], & Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2015). *Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

Usher, B. (2019). *Renewable Energy: A Primer for the Twenty-First Century*. Columbia University Press.

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=sso&db=nlebk&AN=1946704&lang=es&site=eds-live&scope=site&custid=s6670599>

Valencia-Rodríguez, D., Herrera-Pérez, J., Restrepo-Santamaría, D., Galeano, A., Winton, R. S., & Jiménez-Segura, L. (2022). Fish community turnover in a dammed Andean River over time. *Neotropical Ichthyology*, 20(1). <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2021-0091>

Velástegui Montoya, A. D., Meiguins de Lima, A. M., & Adami, M. (2019). Análisis de la Cobertura de la Tierra en Torno de una Hidroeléctrica en la Amazonía Brasileña. *Anuário Do Instituto de Geociências*, 42(1), 74–86. https://doi.org/10.11137/2019_1_74_86

With, K. A., & Crist, T. O. (1995). Critical Thresholds in Species' Responses to Landscape Structure. *Ecology*, 76(8), 2446–2459.

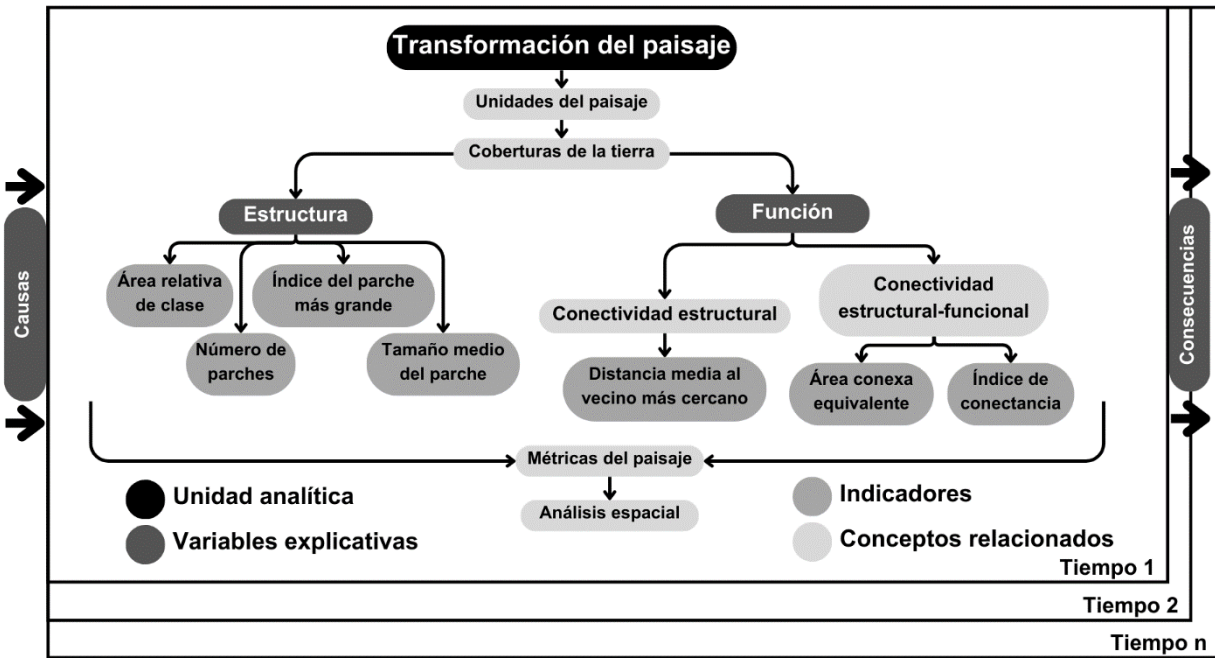
Wu, J. (2013). Landscape Ecology. In *Ecological Systems* (pp. 5772–5785). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5755-8_11

Xie, Z., Liu, J., Huang, J., Chen, Z., & Lu, X. (2022). Linking Land Cover Change with Landscape Pattern Dynamics Induced by Damming in a Small Watershed. *Remote Sensing*, 14, 3580–3597. <https://doi.org/10.3390/rs14153580>

Zarco-González, Z., Monroy-Vilchis, O., Antonio-Némiga, X., & Endara-Agramont, A. R. (2022). Land use change around hydroelectric dams using Landsat multi-temporal data: a challenge for a sustainable environment in Mexico. *Geocarto International*, 37(21), 6375–6390. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1933212>

Zonneveld, I. S. (1989). The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology*, 3(2), 67–86. <https://doi.org/10.1007/BF00131171>

Anexo 1. Diagrama conceptual y explicativo de la relación entre la unidad analítica, sus variables e indicadores, y otros conceptos del enfoque

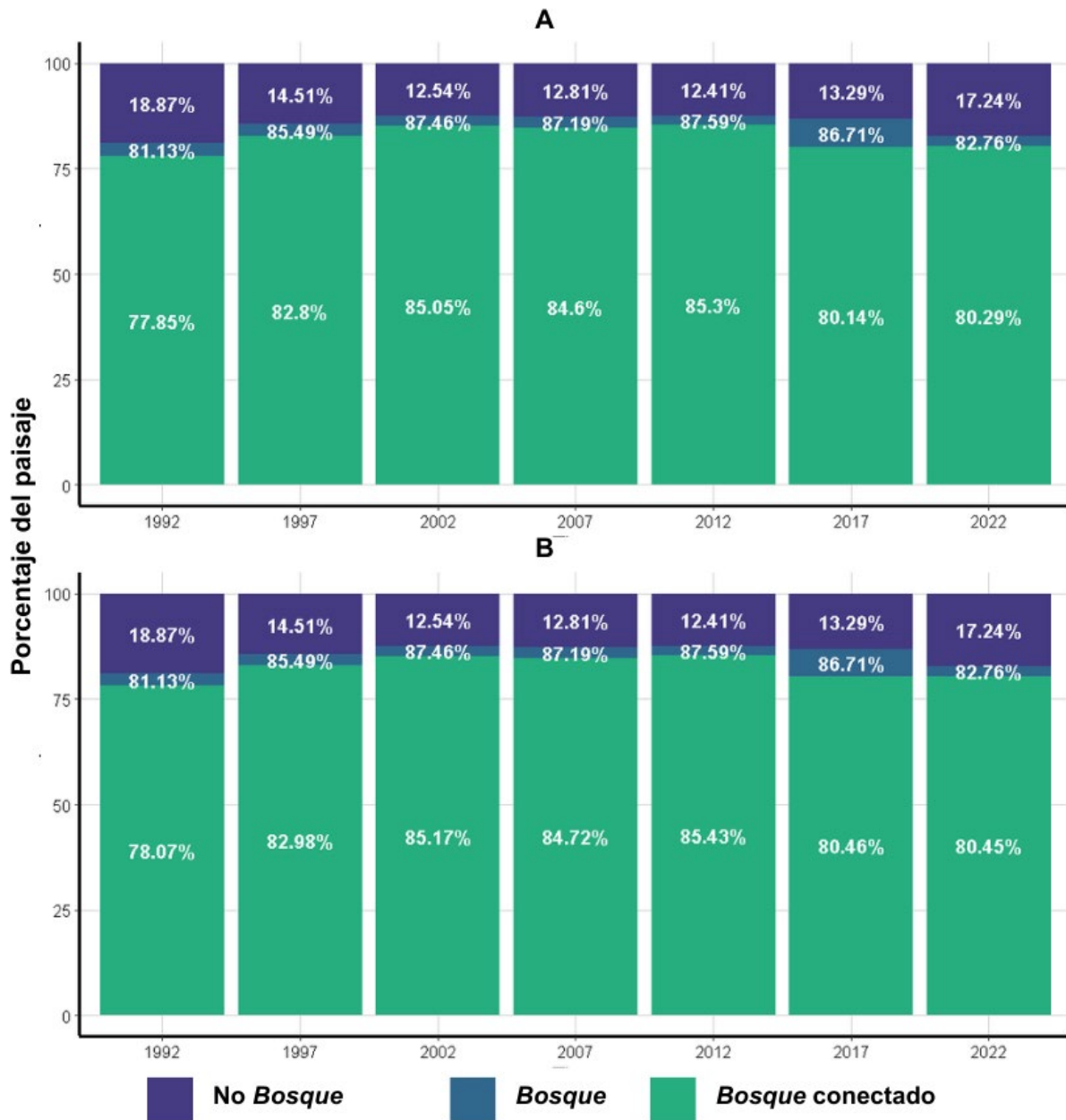


Anexo 2. Descripción de las clases según la metodología del Proyecto MapBiomias Colombia

(<https://colombia.mapbiomas.org/>)

Denominación MapBiomias Colombia	Descripción	Comentarios
Bosque	Área natural con crecimiento de árboles y arbustos que forman un dosel casi continuo a alturas mayores a 5m. Incluye desde bosques y arbustales densos, hasta bosques riparios y secundarios.	Se mantuvo como <i>Bosque</i> .
Formación natural no forestal inundable	Área natural con crecimiento de arbustos y hierbas asociado a ciénagas con periodos de inundación.	Dada su proporción en el paisaje menor al 1% en todo el periodo de estudio, se reclasificaron como <i>Formación natural no forestal</i> .
Otra formación natural no forestal	Área natural con crecimiento de arbustos y hierbas asociado a zonas que no están sujetas a periodos de inundación.	
Playas, dunas y bancos de arena	Área natural asociada a bancos móviles y meandros abandonados.	Dada la intermitencia de su presencia en el paisaje en una proporción menor al 1%, se excluyó del análisis.
Río, lago u océano	Área con presencia natural o artificial, permanente o estacional de aguas superficiales.	Se reclasificó como <i>Río o lago</i> .
Mosaico de agricultura y/o pasto	Área de cultivos transitorios o permanentes y pastos para aprovechamiento ganadero.	Se mantuvo como <i>Mosaico de agricultura y/o pasto</i> .
Palma aceitera	Área agrícola transitoria o permanente formada por plantaciones simétricas de palma de aceite.	Dada su aparición reciente (2022) en el paisaje en una proporción menor al 1%, se excluyó del análisis.
Otra área sin vegetación	Área intervenida con poca o nula cobertura vegetal. Incluye desde infraestructura y minería hasta zonas quemadas y de barbecho.	Dada su proporción en el paisaje menor al 1% en todo el periodo de estudio, se reclasificaron como <i>Área antropizada</i> .
Infraestructura urbana	Área de asentamiento urbano construido o de explotación hidroeléctrica.	
Minería	Área de extracción y explotación a cielo abierto o fluvial que provoca exposición del suelo.	

Anexo 3. Trayectoria temporal de la métrica de área conexas equivalente (ECA) de la clase *Bosque* con umbrales de distancia de A) 2500m y B) 10000m



Anexo 4. Comparación de los cambios quinquenales del *Bosque* conectado (dECA) y el *Bosque* (dA) con umbrales de distancia de 2500 y 10000m.

Umbral de distancia	Año	dA (%)	dECA (%)	Comparación
2500m	1992	-	-	-
	1997	5.376	6.359	dECA>dA>0
	2002	2.298	2.718	dECA>dA>0
	2007	-0.309	-0.528	dECA<dA<0
	2012	0.456	0.824	dECA>dA>0
	2017	-1	-6.043	dECA<dA<0
	2022	-4.559	0.180	dECA>0>dA
10000m	1992	-	-	-
	1997	5.376	6.293	dECA>dA>0
	2002	2.298	2.629	dECA>dA>0
	2007	-0.309	-0.527	dECA<dA<0
	2012	0.456	0.836	dECA>dA>0
	2017	-1	-5.814	dECA<dA<0
	2022	-4.559	-0.012	dA<dECA<0

Anexo 5. Otros procesos reportados en la literatura, asociados al proyecto hidroeléctrico Urrá y causantes de las transformaciones en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú

Tipo	Causa	Ejemplo	Autor
Socio-económico	Facilitación del acceso a áreas poco alcanzables por procesos de colonización	"Las vías de comunicación construidas para la central de Urrá [...], como también la [...] dispersión de colonos desplazados por el llenado de los embalses, son [...] suficiente para prever la irrupción de tala y colonización en los bosques del Alto Sinú."	Alzate et al. (1987)
Tecnológico	Inundación de terrenos de vocación agropecuaria por el llenado del embalse en noviembre de 1999	"donde estaría ubicado el embalse [...] dominaban los pastos, rastrojos, cultivos y áreas quemadas"	Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022)
	Creación de lagos artificiales en los sitios de extracción de material	"donde se extrajo el material para la construcción de la presa [...] se conformó un conjunto de 19 lagos artificiales"	Acosta (2013)
	Fin del proyecto de aumento de la capacidad del embalse	"Solo hasta el año 2009 se culmina el aumento de la capacidad del embalse."	Acosta (2013)
Cultural	Expropiación de tierras en la zona del embalse desde 1993	"los procesos de desplazamiento, que se han presentado en Tierralta, durante los años que se dio y se estableció la hidroeléctrica Urrá I [...] (1993-2001)."	Rodríguez González (2017)
		"La represa [...] inundó 7.400 ha de tierras que eran apropiadas por los campesinos, razón por la cual la Empresa Urrá llevo a cabo un proceso de reasentamiento de 590 familias y de compra de tierras."	Gómez Zárate & Arroyabe Arrubla (2020)
		"La ejecución del proyecto [URRÁ I, trajo como efecto inmediato la movilización de [...] la población que habitaba las áreas de obras civiles y el embalse"	Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022)

Anexo 6. Otros procesos reportados en la literatura, asociados al proyecto hidroeléctrico Urrá y consecuencia de las transformaciones en el paisaje de la cuenca alta del río Sinú

Tipo	Consecuencia	Ejemplo	Autor
Natural	Alteración de los regímenes naturales de inundación en los márgenes del río Sinú	"Con la puesta en operación de URRÁ I, y dado que uno de sus beneficios es el control de las inundaciones, los niveles del río en condiciones de un invierno normal no llegan a ser tan altos como los naturales históricos para esa misma época, lo que ha disminuido la inundación natural en algunas áreas [de la desembocadura]".	Empresa URRÁ S.A. E.S.P. (2022)
	Modificación de los parámetros de calidad del recurso hídrico a partir de 1999	"Al quedar atrapado en el embalse el 90 % de los sedimentos generados en la cuenca que transportaba el río Sinú a la altura de la angostura de URRÁ, se ha presentado una reducción en la cantidad de material de arrastre"	CVS (2004)
		"Con la construcción de la represa de Urrá, el mayor impacto es el aumento de enfermedades transmitidas por vectores principalmente la malaria, porque con el estancamiento de las aguas [...] se aumentaron los criaderos del vector, favoreciendo la transmisión de la enfermedad."	Leguizamón Castillo (2015)
		"el deterioro del agua del río debido a la descomposición de la vegetación inundada, que disminuye la concentración de oxígeno y favorece la emisión de dióxido de carbono y gas metano"	OCA et al. (2017)
		"al poco tiempo de iniciarse el llenado la biomasa tropical [...] comenzó a descomponerse reduciendo los niveles de oxígeno en el fondo de la represa, por lo que el río debajo del dique empezó a recibir agua estéril, nula en oxígeno y rica en sulfuro; lo cual se vio agravado por el caudal mínimo que soltaba la [...] hidroeléctrica, [...] afectando la vitalidad del río Sinú."	