

**MODELO CONCEPTUAL Y DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN  
DE BOSQUES EN UNA CUENCA ANDINA DE COLOMBIA**



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Colombia

**Tatiana Paola Diaz Arcos**

**Yimi Arciniegas**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
SANTIAGO DE CALI**

**2025**

**MODELO CONCEPTUAL Y DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN  
DE BOSQUES EN UNA CUENCA ANDINA DE COLOMBIA**



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Colombia

**Tatiana Paola Diaz Arcos**

**Yimi Arciniegas**

**Javier E. Holguín-González, Ph.D.**

Director

Trabajo de Grado para optar por el título de:

**MAGÍSTER EN RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS  
FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
SANTIAGO DE CALI**

**2025**

## **NOTA DE ADVERTENCIA**

*“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la Verdad y la Justicia”*

**Artículo 23 de la Resolución No. 13 de julio de 1946.**

## **Agradecimientos**

**Agradecemos a la Fundación SAVIA por el apoyo logístico. Expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado, Ph.D. Javier E. Holguín, por su invaluable orientación a lo largo del desarrollo de la investigación. A la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), en particular a la Dra. Adriana Ramírez, por su apoyo e información suministrada. A la comunidad del corregimiento La Olga, especialmente al Sr. Carlos Domínguez, por su colaboración durante los recorridos de campo. A los profesores del programa de Maestría en Restauración Ecológica de la Pontificia Universidad Javeriana por sus enseñanzas, contribuciones y recomendaciones que enriquecieron la elaboración de este artículo.**

## **Tatiana**

**Agradezco a Dios por permitirme terminar esta nueva etapa de mi formación académica, así como a mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, por su paciencia, amor y compañía en este camino. A cada uno de ellos, mi más sincero agradecimiento.**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	7
1. METODOLOGÍA .....	9
2. RESULTADOS.....	14
3. DISCUSIÓN .....	26
4. CONCLUSIONES .....	28
5. LITERATURA CITADA.....	29
ANEXOS.....	36

## RESUMEN

La rehabilitación de ecosistemas sigue siendo un concepto que genera diferencias entre los restauradores y los que practican en la restauración ecológica. A nivel de paisaje la historia de uso del suelo en una unidad de planificación como la cuenca es fundamental para entender y proponer medidas de restauración y planificación. Los objetivos de este artículo fueron: (1) realizar un diagnóstico del paisaje y la ecología enfocado en las especies arbóreas en la cuenca alta del río Arroyohondo, (2) identificar las especies vegetales arbóreas más adecuadas para la rehabilitación ecológica en la cuenca alta del río Arroyohondo y; (3) proponer un modelo conceptual que sirva de base para la modelación ecológica que guíe la implementación de las estrategias de rehabilitación en la cuenca alta del río Arroyohondo. Se analizó el paisaje de la cuenca alta del río Arroyohondo y su multitemporalidad en el uso del suelo. Se hicieron recorridos por toda la parte alta caracterizando las coberturas y se realizaron parcelas de monitoreo de 10x10 m. Se calculó la diversidad taxonómica y funcional. Posteriormente con la comunidad y pobladores de más de 50 años en la región se reconstruyó la dinámica de uso del suelo en cada punto muestreado en el recorrido. Con estos datos se planteó un modelo de uso e historia sucesional del territorio y se generaron arreglos florísticos con los grupos funcionales determinados para cada tratamiento que se han planteado en la literatura para la rehabilitación. Se encontraron 414 especies en toda la zona, de las cuales 38 se encontraron en las parcelas de campo. Asimismo, se caracterizaron 3 rasgos funcionales que dieron como resultado 5 grupos para rehabilitación bien definidos. Con esos grupos se plantearon 5 arreglos florísticos para los tratamientos de rehabilitación de sistemas agroforestales y silvopastoriles, nucleación, sucesión asistida y plantaciones puras o mixtas. Para la región no se encontraron propuestas detalladas de este tipo, sólo existen propuestas de varios autores para bosques templados, mediterráneos y de la mata atlántica de Brasil. Consideramos que esta propuesta se puede aplicar a la región de estudio y la metodología puede aplicarse a otros paisajes de los andes para proponer estrategias de restauración del paisaje.

**PALABRAS CLAVE:** Rehabilitación, cuenca hidrográfica, diversidad funcional, estrategias de restauración.

## INTRODUCCIÓN

Las cordilleras de Los Andes en Colombia han sido ampliamente transformadas por actividades productivas, lo que ha provocado la degradación de ecosistemas clave, especialmente en la franja altitudinal de 1000 a 2500 m, donde predominan el bosque premontano y montano, junto con el orobioma andino y subandino, y ecosistemas del hidrobioma asociados a cuencas hidrográficas (Armenteras y Rodríguez, 2014). Estos bosques, fundamentales para la regulación climática y la biodiversidad, han sufrido una drástica reducción debido a la expansión agropecuaria y el cambio de uso del suelo. Como resultado, Los Andes han sido catalogados como un ecosistema en peligro crítico (Etter et al., 2020), lo que ha generado la necesidad de priorizar estrategias de restauración y rehabilitación que permitan recuperar la funcionalidad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la captura de carbono y la regulación hídrica (Minambiente, 2015).

En el marco de la estrategia nacional de restauración es importante definir la rehabilitación ecológica, ya que es la principal estrategia en áreas altamente degradadas como los Andes, esta consiste en “*Acciones que tienen como objetivo restablecer un nivel de funcionalidad del ecosistema donde no se busca la restauración ecológica, sino que el enfoque está en la provisión de bienes y servicios del ecosistema*” (Gann et al., 2019; SER 2004; Holl 2023). En ese sentido esta no contempla un ecosistema de referencia exclusivo ni una trayectoria sucesional que conduzca precisamente al ecosistema pre-disturbio. Se busca reparar rápidamente la productividad perdida por el ecosistema (Walker y del Moral, 2003). Por lo cual, plantear estrategias de rehabilitación requiere priorización de servicios ecosistémicos, los cuales serán el objeto de las estrategias que se planifican en un proyecto centrado en rehabilitación ecológica.

Los servicios ecosistémicos (SE) son de regulación, aprovisionamiento y culturales, y son vistos como la gran variedad de beneficios que la naturaleza brinda al hombre desde su funcionalidad y procesos en determinado territorio (de Groot 1987; Díaz et al., 2018). Una unidad de territorio donde se pueden cuantificar los SE es una cuenca hidrográfica, la cual es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que a su vez, puede desembocar en un río principal. La cuenca constituye una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen en un tiempo considerablemente mayor a otras unidades de análisis, además involucra una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio (MinAmbiente, 2014). Por lo cual podemos decir que los ecosistemas presentes en este territorio prestan diferentes servicios de acuerdo con su nivel de conservación y biodiversidad y de las políticas o decisiones en torno a restauración se pueden cuantificar y evaluar a nivel de cuenca, determinando su efecto sobre los servicios ecosistémicos.

Los Andes colombianos son una ecorregión importante para la sobrevivencia de grandes cantidades de personas que lo habitan y son objeto de muchas dinámicas de disturbio que han

generado múltiples niveles de degradación de los ecosistemas presentes en este bioma (Balthazar et al., 2015; Anderson et al., 2011; Armenteras et al., 2003). Dado que la rehabilitación apunta hacia servicios ecosistémicos de interés, se han desarrollado proyectos bajo este enfoque con servicios prioritarios como la captura de carbono y la regulación hídrica. Es decir, que las actividades independientemente del ecosistema de referencia apuntan a recuperar, proteger o mejorar estos SE (Gann et al., 2019; Holl, 2023; Kobayashi et al., 2001).

La biodiversidad es la que alberga la capacidad de brindar los SE en determinado territorio. Existen dos dimensiones de la diversidad que son fundamentales para comprender la estructura de una comunidad, la primera es la dimensión taxonómica que diferencia cuántas especies hay en un área y sus patrones de distribución, por otro lado, está la dimensión funcional que determina o ayuda a entender cuál es la función de cada grupo de especies que tienen similitud en sus procesos y respuestas en el ecosistema (Casanoves et al., 2011). Las dos dimensiones se pueden medir, cuantificar y relacionar con SE dando la posibilidad de guiar procesos de restauración ecológica y rehabilitación (Bocanegra et al., 2015; Cadotte et al., 2011; Adenky-Filho, 2017; Holl, 2023). Finalmente es potencial la definición de grupos funcionales para seleccionar tratamientos, enfoques, modelos y especies para restauración y rehabilitación de ecosistemas usando rasgos de diferentes fuentes (Calbi et al., 2024).

Por otro lado, la sucesión vegetal es el proceso mediante el cual se establece una cobertura vegetal en un sitio, esta depende de las condiciones del sitio, la dinámica entre las plantas, los factores ambientales y las condiciones del paisaje (Poorter et al., 2023). Este proceso es determinante para los procesos de restauración y rehabilitación en un sitio perturbado (Holl, 2023; Walker y del Moral, 2003). En Colombia grandes extensiones de áreas deforestadas se han abandonado y se han formado sucesiones secundarias con gran potencial para la recuperación de bosques (Hurtado-M et al., 2022). El papel de la vegetación en los servicios ecosistémicos es fundamental y este depende de cómo evoluciona una cobertura, ya sea de forma natural, asistida o rehabilitada.

Los objetivos de esta investigación son: (1) realizar un diagnóstico de paisaje y ecológico enfocado en las especies arbóreas en la cuenca alta del río Arroyohondo, (2) identificar las especies vegetales arbóreas más adecuadas para la rehabilitación ecológica en la cuenca alta del río Arroyohondo y (3) proponer un modelo conceptual que sirva de base para la modelación ecológica que guíe la implementación de estrategias de rehabilitación en la cuenca alta del río Arroyohondo.

# 1. METODOLOGÍA

## Área de Estudio

**Localización y clima:** El área de estudio comprende la zona alta de la cuenca del río Arroyohondo en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca. Principalmente el área que pertenece al área de reserva forestal protectora natural La Elvira (Figura 1). La zona alta de la cuenca tiene 1889 ha de superficie (CVC y Fundación DapaViva, 2023). Las temperaturas en la parte alta de la cuenca Arroyohondo oscilan entre 14.5 y 20 °C, la precipitación oscila entre 1800 y 2300 mm/año. La pendiente se caracteriza por ser de moderadamente abrupta (16-35 %) a abrupta (35-55%). Predominan dos litologías principalmente, las rocas duras de la formación volcánica compuestas por basaltos y diabasas (Kv) y los suelos lateríticos pardo rojizos producto de la alteración de estas rocas, la relación de estas litologías es casi 50/50 (CVC y Fundación DapaViva, 2023). Climáticamente, la zona se clasifica como ecuatorial húmeda, con precipitaciones constantes a lo largo del año. En términos de tipos de ecosistemas, predominan los bosques tropicales y subtropicales húmedos de hoja ancha, mientras que también se identifican áreas representativas de bosques tropicales y subtropicales secos de hoja ancha.

El caudal medio mensual multianual, para la cuenca y las áreas de drenaje del río Arroyohondo está entre 331,4 a 665,9 l/s y el caudal anual es de 490,1 l/s. El área de drenaje que reporta el mayor caudal anual es la zona baja del río Arroyohondo con una magnitud de 200,6 l/s y el más bajo en la cuenca de la quebrada La Chorrera con 79,9 l/s. Los caudales más altos para las áreas de drenaje y cuenca se presentan en el mes de mayo y los más bajos en el mes de septiembre (CVC y PROAGUA, 2019).

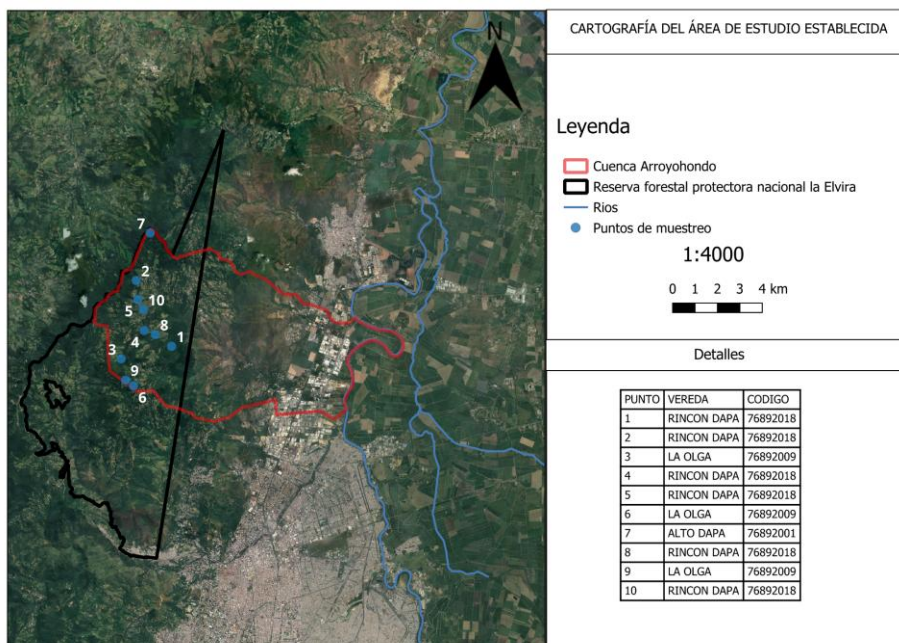


Figura 1. Área de la cuenca del río Arroyohondo y su delimitación dentro de la reserva de la Elvira con los puntos seleccionados para muestreo.

**Zonificación y muestreo inicial:** Se utilizó el producto Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series proporcionados por ESRI (2024) como base para la zonificación inicial y la selección de áreas de muestreo en el campo. Este conjunto de datos ofrece una resolución espacial de 10 metros y permite realizar un análisis multitemporal de las coberturas de la cuenca, facilitando la identificación preliminar de las áreas de interés para estudios de cobertura y cambios de uso del suelo. En la Tabla 1 se observan las diferentes coberturas proporcionadas por este producto con sus respectivas descripciones.

Tabla 1. Coberturas proporcionadas por Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover.

ID	Categoría	Descripción
1	Agua	Zonas con agua constante durante todo el año, sin vegetación dispersa ni estructuras construidas.
2	Árboles	Vegetación alta y densa con dosel cerrado, incluye bosques, manglares y plantaciones.
4	Vegetación inundada	Áreas con vegetación mezclada con agua durante gran parte del año, como manglares inundados y arrozales.
5	Cultivos	Plantaciones humanas de cereales y pastos, como maíz y trigo, que no alcanzan la altura de los árboles.
7	Área construida	Infraestructuras humanas como edificios, carreteras y ciudades.
8	Suelo desnudo	Suelo o roca con poca o ninguna vegetación, como desiertos y lechos de lagos secos.
9	Nieve/Hielo	Áreas con nieve o hielo permanente, como glaciares y campos nevados en regiones montañosas.
10	Nubes	Zonas donde no se puede identificar el suelo debido a la presencia persistente de nubes.
11	Pastizales	Áreas abiertas con pastos homogéneos o vegetación dispersa, como praderas y sabanas con arbustos.

Para el análisis de la información relacionada con la pérdida y ganancia de masa boscosa, se utilizó una combinación de datos satelitales proporcionados por la plataforma Global Forest Watch (GFW, 2024). Esta plataforma ofrece acceso a información actualizada y detallada sobre la dinámica forestal a nivel global, a través de la monitorización de los cambios en la cobertura forestal mediante imágenes satelitales y otras fuentes geoespaciales. Los datos obtenidos permitieron realizar un análisis temporal de los cambios en la masa boscosa en la región de estudio, facilitando la identificación de patrones de deforestación y reforestación a lo largo del tiempo. Además, la herramienta proporciona indicadores clave como la tasa de deforestación anual, áreas protegidas y eventos significativos de pérdida y ganancia forestal, lo cual resulta crucial para comprender las tendencias en la cobertura forestal y sus implicaciones en el contexto ambiental y de gestión de recursos.

**Trabajo de Campo:** Se seleccionaron 12 sitios de cobertura vegetal para realizar la caracterización de la vegetación remanente actual en la parte alta de la cuenca. En cada punto se definió una parcela de 10x10 m. En cada parcela se cuantificaron y midieron todos los individuos vegetales superiores a 5 cm de diámetro. Los individuos fueron identificados en campo de ser posible hasta género y familia y de cada morfoespecie se colectó una muestra botánica para su posterior identificación en el Herbario Toli. Adicionalmente, se llevaron a cabo recorridos para identificación de especies vegetales nativas e introducidas en los sistemas productivos y en áreas degradadas, determinando género y especie, también se

colectaron estas especies para su determinación exacta en herbario. Finalmente se descargaron todos los registros del Global Biodiversity Information Facility (GBIF) para el polígono de la parte alta de la cuenca, de esos registros se seleccionaron los de hábito arbóreo y se registró su categoría de amenaza.

### **Análisis de información**

**Análisis de paisaje:** Para la clasificación de coberturas en la cuenca Arroyohondo, se implementó un enfoque basado en imágenes Sentinel-2 procesadas en Google Earth Engine (GEE), empleando el esquema de clasificación Corine Land Cover (CLC). Este procedimiento incluyó la generación de un mosaico de imágenes con baja nubosidad, la selección de muestras de entrenamiento y la aplicación de un clasificador de aprendizaje automático. Concretando con los siguientes pasos:

**1. Preprocesamiento de Imágenes Sentinel-2:** Se utilizó la colección COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED de Sentinel-2, filtrando imágenes entre enero y diciembre de 2024, con un umbral de menos del 20% de nubosidad. Para garantizar la calidad de los datos, se aplicó un proceso de enmascaramiento de nubes y sombras utilizando las bandas QA60 y SCL. Esta máscara fue refinada con técnicas de dilatación y erosión para suavizar bordes y minimizar falsos positivos. Posteriormente, se seleccionaron las bandas B4 (rojo), B3 (verde) y B2 (azul) y se generó un mosaico de imágenes mediante la reducción de valores mínimos por píxel, lo que optimizó la representatividad de las coberturas terrestres.

**2. Generación de Muestras de Entrenamiento:** Para entrenar el modelo de clasificación, se emplearon muestras vectoriales de coberturas del suelo representadas en formato shapefile. Estas muestras se corresponden con seis categorías definidas en el esquema Corine Land Cover, asignándoles los siguientes valores de clase: Pastos (1), Cuerpos de agua (2), Bosques (3), Cultivos (4), Áreas urbanas (5) y Suelos desnudos (6). Los shapefiles fueron convertidos a FeatureCollection en GEE, preservando su geometría y valores de clase. Luego, se extrajeron los valores espectrales de las imágenes Sentinel-2 en las ubicaciones de las muestras, generando un conjunto de entrenamiento con resolución de 30 metros.

**3. Clasificación con Random Forest:** Para la clasificación de coberturas se implementó un modelo de Random Forest con 50 árboles de decisión, utilizando las muestras de entrenamiento previamente generadas. Se definieron las siguientes especificaciones para el modelo:

- Conjunto de entrenamiento: FeatureCollection de muestras con la propiedad "class".
- Variables de entrada: Bandas espectrales seleccionadas (B4, B3, B2).
- Parámetro de entrenamiento: Predicción de la clase de cobertura a partir de los valores espectrales.

**Diversidad Taxonómica:** Se realizó el listado de especies de la zona alta de la cuenca con su respectiva ubicación y sus singularidades como procedencia, hábito y estado de conservación según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Para lo cual se consultó el listado del catálogo de plantas y líquenes de Colombia (Bernal et

al., 2019). Finalmente se calcularon los índices de riqueza y diversidad a nivel de parcela y de toda la cuenca alta siguiendo indicaciones y fórmulas de (Melo y Vargas, 2002).

**Estructura:** Se calcularon abundancia, dominancia y biomasa en las parcelas siguiendo los métodos de Melo y Vargas (2002). La abundancia se determinó como el número total de individuos por especie dentro de cada parcela. La dominancia se calculó a partir del área basal, expresada en metros cuadrados por hectárea, utilizando el diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada árbol. Adicionalmente, la biomasa se estimó aplicando ecuaciones alométricas que relacionan el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total de los individuos, junto con la densidad de la madera, para obtener la biomasa aérea por árbol. Se utilizó la ecuación desarrollada por Chave et al. (2005), ampliamente aplicada en estudios de biomasa en bosques tropicales:

$$B = 0.0776 * (\rho * DAP^2 * H)^{0.940}$$

Donde B representa la biomasa aérea en kilogramos,  $\rho$  es la densidad de la madera ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), DAP es el diámetro a la altura del pecho en centímetros y H es la altura total en metros. Para asignar la densidad de la madera a cada especie, se realizó una correspondencia con una base de datos de densidades conocidas por Zanne et al. (2009). En los casos donde la densidad de la especie no estaba disponible, se utilizó el promedio de su género y, si este tampoco estaba registrado, se asignó el valor promedio de densidad de la familia. Cuando no se encontraron valores a nivel de familia, se usó el promedio general de todas las especies registradas en la base de datos. Finalmente se clasificaron los diferentes lugares de acuerdo con la cobertura y las especies individuales encontradas en los recorridos y se realizó el cálculo de alfa diversidad para las parcelas (Baselga, 2010).

**Diversidad Funcional:** Se clasificaron las especies por medio de una matriz en las que se determinaron los rasgos funcionales en la literatura. Posteriormente se realizó una clasificación de toda la vegetación existente en grupos funcionales. Para seleccionar grupos funcionales se usaron rasgos cualitativos asignados a las especies de acuerdo a la literatura, estos son: procedencia con tres valores (Nativo, introducido y naturalizado) con valores jerárquicos 5, 2 y 1 respectivamente, crecimiento (Rápido, medio y lento) con valores jerárquicos de 3, 2, y 1 respectivamente, se asocia con otras especies en plantación forestal (No y Sí) con valor 0 y 1. Y finalmente, se hizo la clasificación con las especies encontradas en el muestreo por medio de un dendrograma.

**Propuesta de especies para rehabilitación:** Se seleccionaron las especies más funcionales para los diferentes niveles de degradación detectadas y se propusieron arreglos florísticos con su respectivo valor de funcionalidad en torno al servicio ecosistémico de retención de suelos y regulación hídrica.

**Modelo conceptual para actividades de rehabilitación en el plan:** El modelo conceptual se diseñó con un análisis del sistema de cuenca alta y el subsistema de cobertura para a partir de este proponer actividades de restauración con su respectivo componente de vegetación o árboles a implementar con sus valores de implementación en campo. En este sentido, la rehabilitación se propone de acuerdo con los niveles de degradación que tengan los ecosistemas en el paisaje. La tala de árboles afecta a los ecosistemas forestales de diversas

maneras, degradación del sitio, reducción del suministro de agua, pérdida de suelo y emisión de gases de efecto invernadero. La tala selectiva y a ras, los incendios y las quemadas son las principales causas de la degradación de la tierra, y la deforestación se convierte en un desencadenante de otras formas de utilización de la tierra y Colombia no es la excepción (Armenteras y Rodríguez, 2014; Houghton, 2012; Li et al., 2024; Kobayashi, 1994). Si bien la deforestación afecta a los cambios en los ecosistemas, el uso posterior de la tierra puede causar impactos más graves en los ecosistemas naturales (Kobayashi et al., 2001). El modelo propuesto por (Kobayashi et al., 2001) en un paisaje donde se dan procesos de degradación y alternativas de rehabilitación fue la guía para plantear el modelo conceptual de este estudio.

### **Identificación de zonas para la implementación de estrategias de rehabilitación**

En este proceso de análisis espacial, se llevó a cabo la conversión de datos raster a formato vectorial, permitiendo la identificación y delimitación de áreas de interés a partir de clasificaciones específicas dentro de imágenes raster. Se trabajó con archivos TIFF correspondientes a la clasificación del área de estudio, extrayendo los píxeles de una categoría determinada y transformándolos en polígonos vectoriales mediante el uso de la función `shapes()` de la biblioteca `rasterio`. Para garantizar la correcta proyección de los datos y facilitar cálculos espaciales precisos, los polígonos resultantes fueron proyectados a un sistema de coordenadas en metros (EPSG:3395). Esta transformación permite realizar análisis espaciales más precisos, como la medición de áreas y la generación de buffers, evitando errores asociados al uso de sistemas geográficos basados en grados.

Como parte del análisis cuantitativo, se calculó el área de cada polígono extraído, expresada en hectáreas, agregando esta información a los datos vectoriales exportados en formato GeoJSON. Además, se obtuvo el área total ocupada por la clasificación de interés dentro del área de estudio, permitiendo una evaluación más detallada de la distribución espacial de las coberturas analizadas.

Además, para la clase nucleación, se generó un buffer de 50 metros a partir del perímetro exterior de los polígonos clasificados como bosques, permitiendo una mejor delimitación de las zonas de transición y facilitando su integración en futuros análisis espaciales. Finalmente, se aplicó un proceso de disolución de polígonos para fusionar aquellas geometrías contiguas que compartían límites, evitando fragmentaciones innecesarias y mejorando la interpretación de los datos espaciales. Este procedimiento permitió obtener una representación más precisa de las coberturas homogéneas dentro del paisaje analizado.

## 2. RESULTADOS

En cuanto a la distribución de cada tipo de cobertura de la imagen satelital (Figura 2.) Se puede observar que el tipo de cobertura con mayor número de píxeles es bosques, seguido de cerca por Pastizales y Nubes. Estos tres tipos de cobertura tienen valores significativamente más altos que el resto. Por otro lado, Agua, Área construida y Suelos tienen valores más bajos de número de píxeles, lo que indica que ocupan una menor proporción del área total de la imagen. La diferencia en el número de píxeles entre los tipos de cobertura más dominantes y los menos dominantes es bastante pronunciada, lo que sugiere una distribución heterogénea de los diferentes tipos de superficies en la imagen satelital analizada.

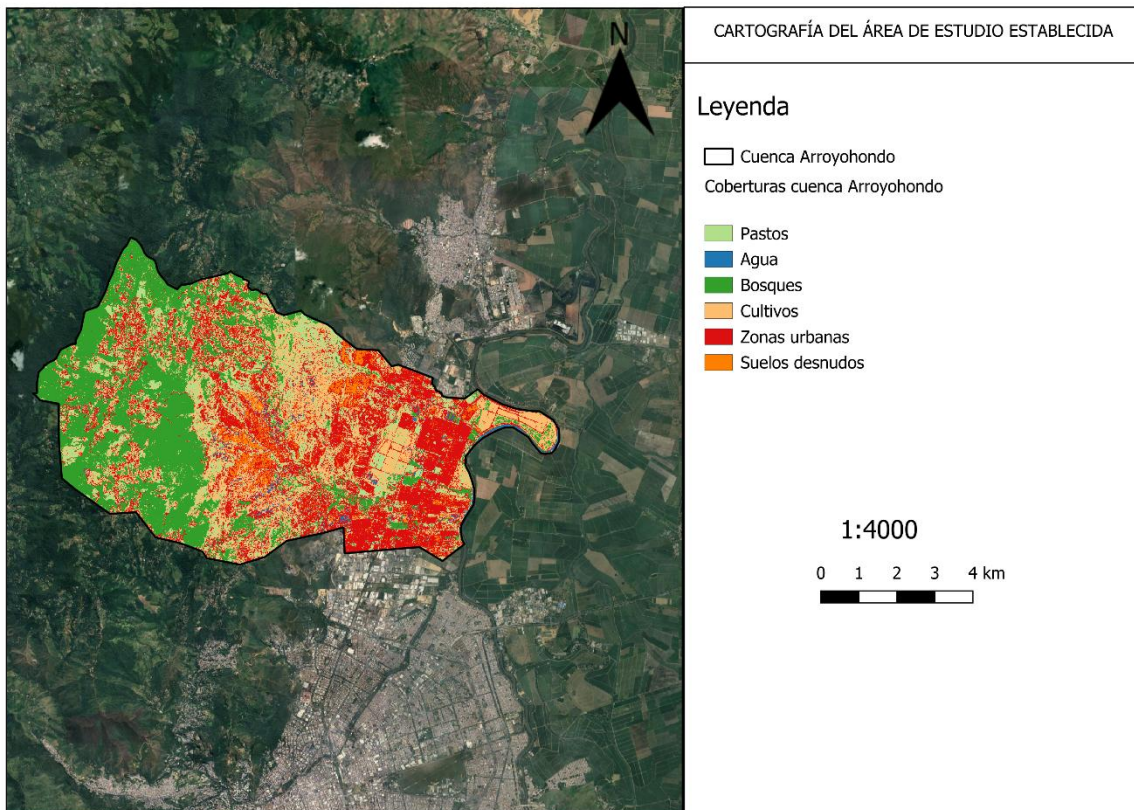


Figura 2. Tipo de coberturas del área de estudio en la cuenca Arroyohondo

Los resultados encontrados mediante la plataforma Global Forest Watch-GFW (2024) incluyen áreas desde bosques de montaña del Valle del Cauca, los cuales poseen un alto grado de transformación debido a las actividades humanas. No existen fragmentos de bosque intacto en esta región, y aquellos bosques primarios considerados por el GFW son aquellos que presentan un grado alto de conservación con una densidad del dosel mayor al 75% lo que resalta el impacto significativo de las actividades antrópicas.

En el área de estudio se destaca una zona específica de 6.52 ha localizada en un área montañosa (Figura 3). En cuanto a la dinámica de la cobertura arbórea, los análisis indican que entre 2002 y 2023 la cuenca de Arroyohondo perdió aproximadamente 79 ha de cobertura

arbórea, lo que representa una disminución del 3.8% respecto a la cobertura inicial del año 2000. Este dato refleja las presiones persistentes sobre los ecosistemas de la región. Por otro lado, se registraron incrementos en la cobertura arbórea entre 2001 y 2020, con una ganancia de 67 ha, equivalentes al 1.0% de la superficie total de la cuenca. Estas cifras evidencian dinámicas complejas en el uso del suelo, donde la pérdida y ganancia de cobertura forestal coexisten, posiblemente asociadas a procesos de reforestación o regeneración natural en áreas previamente degradadas. Este análisis subraya la necesidad de estrategias de conservación y restauración dirigidas a mitigar la pérdida de bosques y promover la recuperación ecológica en esta región, dado su valor ambiental y su importancia para el equilibrio de los ecosistemas locales.

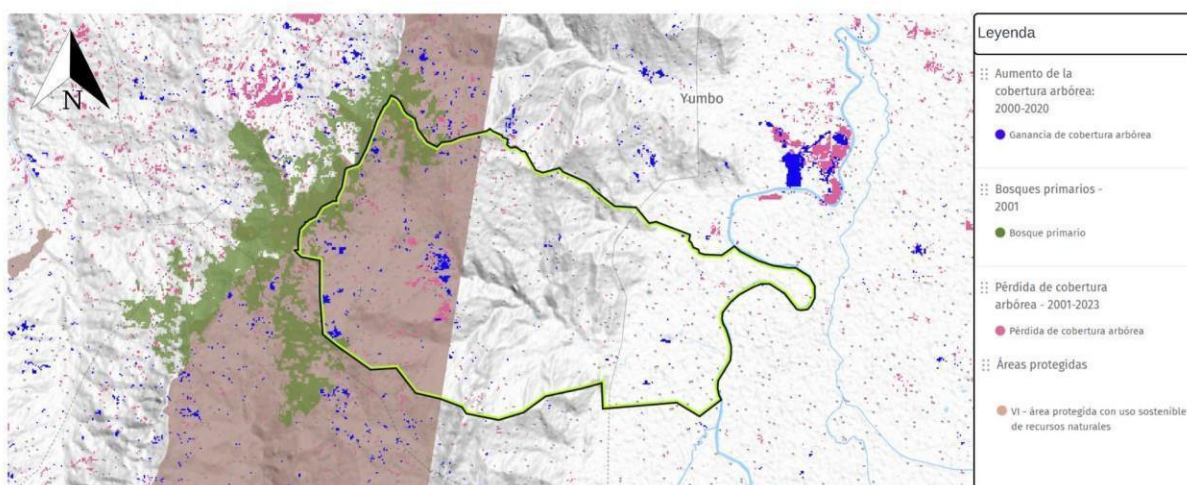


Figura 3. Mapa de pérdidas y ganancias de bosques para la cuenca de estudio según la plataforma (University of Maryland 2024).

### Diversidad taxonómica

El conjunto total de datos incluye tanto los registros obtenidos en campo como los proporcionados por el GBIF, consta de 1370 registros distribuidos en 87 familias, 225 géneros y 414 especies. Entre estas especies destacan *Otoba lehmannii*, clasificada como Vulnerable (VU) según la IUCN, y *Eschweilera bogotensis*, categorizada como En Peligro (EN) por la misma institución. La distribución espacial de estos registros dentro de la cuenca puede observarse en la Figura 4.

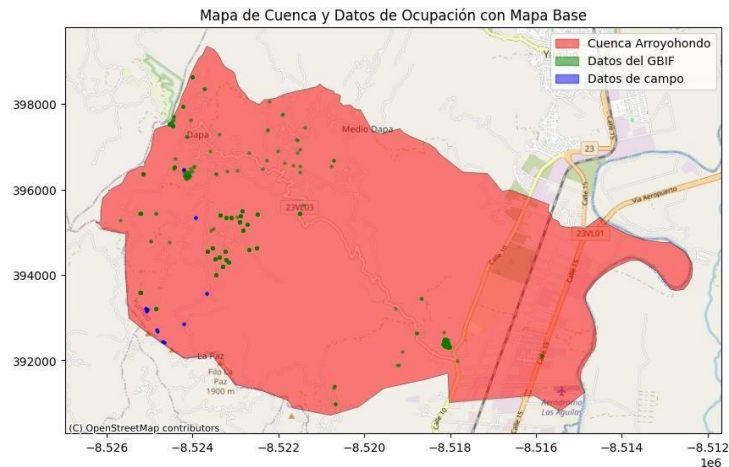


Figura 4. Registros de biodiversidad vegetal en el área de estudio.

En cuanto a la descripción de las categorías ecológicas encontradas en el conjunto de datos para la zona de estudio se puede evidenciar en la Figura 5 la distribución de la categoría ecológica. El eje horizontal muestra los diferentes estados que puede tomar los individuos de las especies reportadas, como nativo, cultivada, naturalizada y endémica. El eje vertical muestra el número de individuos para cada categoría de estado. El gráfico ilustra claramente que la categoría "Nativa" tiene, con diferencia, el mayor número de individuos, con más de 700. Las otras categorías tienen significativamente menos individuos, que van desde alrededor de 100 a 25.

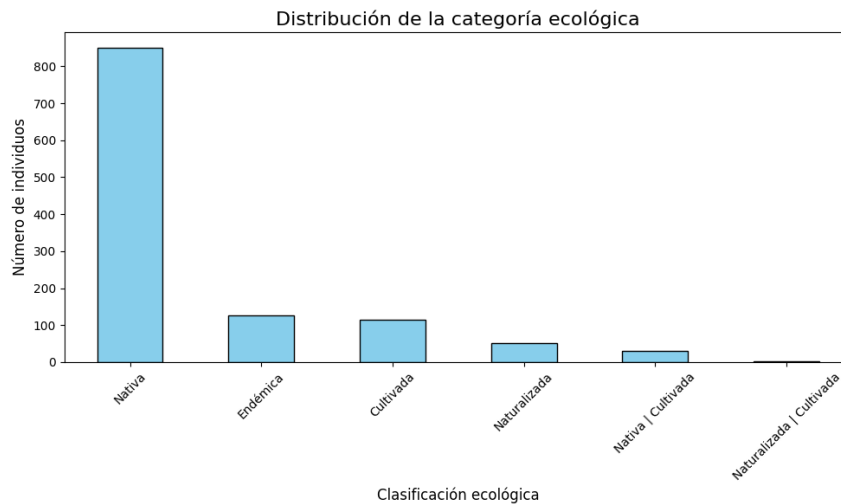


Figura 5. Distribución de la categoría ecológica para la cuenca de estudio.

### Diversidad taxonómica en el territorio

Se encontraron un total de 414 especies reportadas para el polígono de estudio y en la salida de campo se reportaron 38 especies (Tabla 2).

Tabla 2. Diversidad de especies vegetales reportadas para la cuenca alta de Arroyohondo con su abundancia, dominancia, rasgos y grupo funcional al que pertenece.

<b>Nombre Científico</b>	<b>n</b>	<b>AB(m<sup>2</sup>)</b>	<b>Procedencia</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>Asocia</b>	<b>Grupo Funcional</b>
<i>Myrcine guianensis</i>	7	0.17	5	2	1	1
<i>Toxicodendrum striata</i>	4	0.04	5	2	1	1
<i>Oreopanax sp</i>	3	0.03	5	2	1	1
<i>Saurauia ursina</i>	3	0.07	5	2	1	1
<i>Tibouchina lepidota</i>	3	0.06	5	2	1	1
<i>Clusia multiflora</i>	2	0.02	5	2	1	1
<i>Guettarda sp</i>	2	0.01	5	2	1	1
<i>Myrcia popayanensis</i>	2	0.03	5	2	1	1
<i>Alchornea grandiflora</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Ardisia sp</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Brunellia comocladifolia</i>	1	0.11	5	2	1	1
<i>Cinchona sp</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Clethra sp</i>	1	0.03	5	2	1	1
<i>Cronton sp.</i>	1	0.04	5	2	1	1
<i>Cupania americana</i>	1	0.03	5	2	1	1
<i>Dendropanax arboreus</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Ficus sp</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Hediosmun sp</i>	1	0	5	2	1	1
<i>Inga sp1</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Inga sp2</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Morus sp</i>	1	0.02	5	2	1	1
<i>Piper sp</i>	1	0	5	2	1	1
<i>Rueagea sp</i>	1	0.03	5	2	1	1
<i>Spirotheca sp</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Viburnum cornifolium</i>	1	0.01	5	2	1	1
<i>Cupressus lusitanica</i>	7	1.13	2	2	1	2
<i>Fraxinus chinensis</i>	3	0.49	2	2	1	2
<i>Eucaliptus pulverulenta</i>	3	0.01	1	1	0	3
<i>Eucaliptus grandis</i>	2	0.86	2	3	0	3
<i>Pinus patula</i>	1	0.05	1	3	0	3
<i>Ocotea sp</i>	4	0.21	5	1	1	4
<i>Euterpe preclatoria</i>	1	0.01	5	1	1	4
<i>Heliocarpus popayanensis</i>	6	0.15	5	3	1	5
<i>Miconia sp.</i>	4	0.05	5	3	1	5
<i>Cecropia telealba</i>	2	0.04	5	3	1	5
<i>Vismia baccifera</i>	2	0.03	5	3	1	5
<i>Trema micrantha</i>	1	0.07	5	3	1	5
<i>Palicourea sp</i>	1	0	5	3	1	5

n: número de individuos; AB (m<sup>2</sup>): área basal; área basal en metros cuadrados; Procedencia: si es nativa o no; Crecimiento: rápido, medio o lento; Asocia: si se asocia fácilmente con otras en sistemas productivos; Grupo Funcional: grupo funcional de esta investigación al que pertenece la especie.

En este estudio se clasifican las especies en cinco grupos funcionales según su origen y características ecológicas. Se identificaron un total de 38 especies distribuidas en los siguientes grupos:

- 1) Especies nativas de regeneración natural: Este grupo comprende 26 especies. De estas, 7 están categorizadas como nativas (*Alchornea grandiflora*, *Cupania americana*, *Dendropanax arboreus*, *Saurauia ursina*, *Tibouchina lepidota*, *Clusia multiflora* y *Brunellia comocladifolia*), y 1 es endémica (*Myrcia popayanensis*). El resto de las especies no tienen información sobre su origen o estado de amenaza. Estas especies suelen establecerse en zonas degradadas de manera espontánea, favoreciendo la regeneración natural de los ecosistemas.
- 2) Especies introducidas usadas en reforestación: Se identificaron 2 especies en este grupo, *Cupressus lusitanica* y *Fraxinus chinensis*. No se dispone de datos sobre su origen o estado de conservación, pero su uso sugiere que han sido incorporadas en procesos de restauración ambiental, probablemente por sus características de rápido crecimiento y resistencia.
- 3) Especies de rápido crecimiento, posiblemente exóticas: Este grupo está compuesto por 3 especies (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus pulverulenta* y *Pinus patula*). Se caracterizan por su rápido crecimiento y su uso frecuente en plantaciones forestales, aunque no hay información específica sobre su origen o amenaza en el área de estudio. Son especies comúnmente utilizadas en sistemas productivos, pero su impacto en la dinámica ecológica de los bosques nativos requiere mayor evaluación.
- 4) Especies del sotobosque o con características ecológicas particulares: Incluye 2 especies, *Ocotea sp* y *Euterpe precatoria*. Esta última ha sido identificada como nativa, mientras que la primera carece de información sobre su origen. Estas especies suelen estar asociadas a la vegetación secundaria o madurez del bosque, desempeñando roles clave en la regeneración y estabilización del ecosistema.
- 5) Especies pioneras o de rápido crecimiento en regeneración: Se registraron 5 especies en este grupo. *Vismia baccifera* y *Heliocarpus popayanensis* han sido clasificadas como nativas, mientras que *Cecropia telealba* es endémica. Además, se identificaron *Trema micrantha* y *Palicourea sp*, aunque no se cuenta con información sobre su origen. Estas especies son clave en la regeneración natural de los ecosistemas degradados, ya que colonizan rápidamente áreas abiertas y facilitan el establecimiento de especies de sucesión tardía.

### **Diversidad y Grupos funcionales**

La clasificación por análisis multivariado mostró que las especies se clasifican en 5 grupos funcionales (Tabla 2, Figura 6).



- La cobertura "Pasto arbolado" muestra menores valores de biomasa, incluso por debajo del "Bosque restaurado" para edades similares.

Esto indica que el tipo de cobertura forestal, y los procesos de manejo y restauración aplicados, tienen un impacto significativo en la acumulación de biomasa, más allá del simple efecto de la edad.

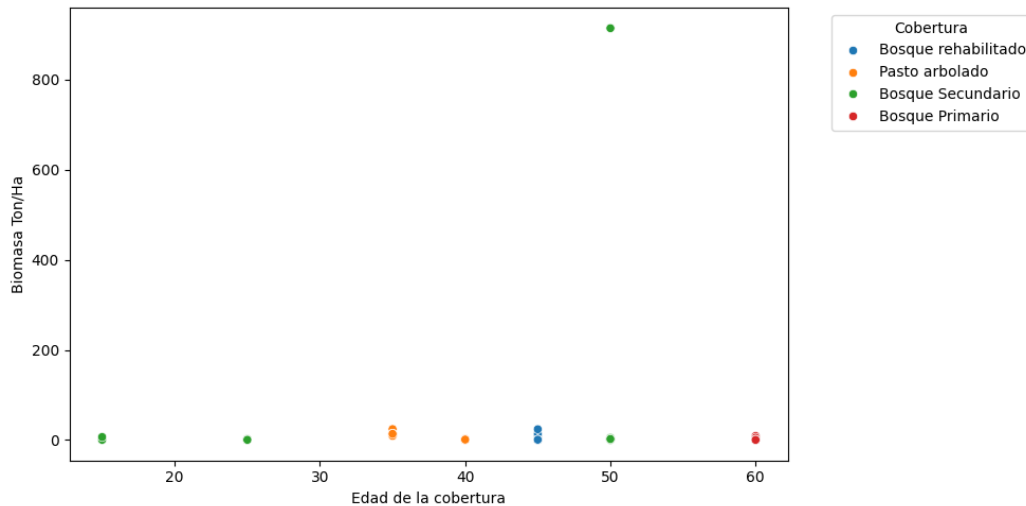


Figura 7. Relación entre tipos de cobertura y biomasa.

De acuerdo a las edades determinadas de cada cobertura analizada existe un rango amplio de biomasa en las diferentes historia de cada cobertura, se observa los valores más altos en los bosques producto de procesos de rehabilitación con especies introducidas como el Urapan, el Ciprés y Eucalipto, las cuales superan los 400 ton/ha, esto debido a la alta biomasa que acumulan estas especies después de 30 años, los bosques primarios oscilan entre 100 y 150 ton/ha, los bosques sucesionales (Hurtado-M et al., 2022) producto de restauración pasiva y abandono están entre 50 y 120 ton/ha y finalmente los pastos arbolados están entre 20 y 30 ton/ha. Estos valores de biomasa presentaron valores positivos de correlación con la edad y la riqueza de especies a excepción del bosque de Ciprés (Figura 8).

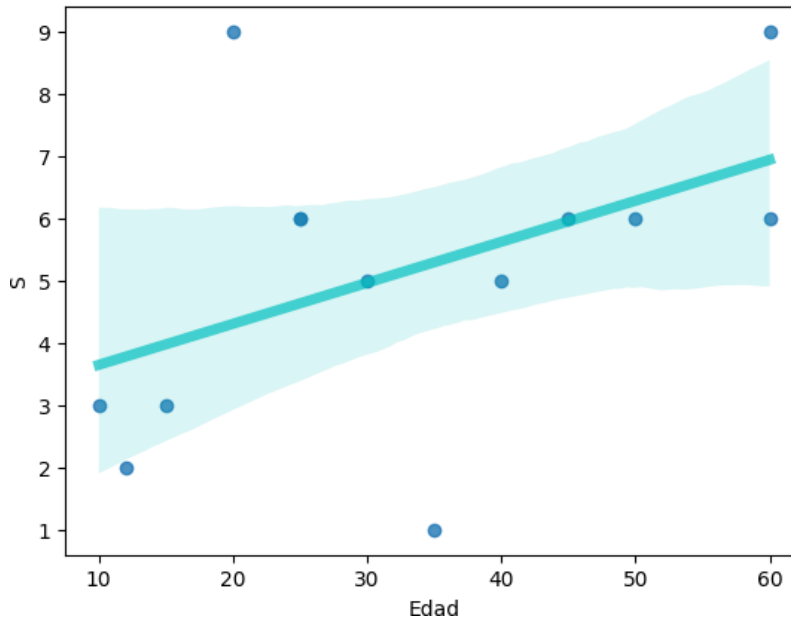


Figura 8. Relación de edad de sucesión o rehabilitación y riqueza de especies.

A partir del modelo de (Kobayashi et al., 2001) se planteó el modelo de afectación para la cuenca Arroyohondo, incluyendo los Factores de deforestación y degradación identificados en la Primera etapa Siglo XX, como lo son la Deforestación, Ganadería y Café. Posteriormente con las tendencias encontradas en el análisis multitemporal y la dinámica social de la Segunda etapa que es el Siglo XXI donde las Vías y la Urbanización en la parte de la cuenca alta conlleva a respuestas intencionales o no de rehabilitación de algunas áreas importantes.

El Siglo XX mostró tratamientos importantes y pertinentes en el contexto histórico y científico en el que se hicieron plantaciones protectoras de especies introducidas con doble propósito. Posteriormente, con la Constitución de 1991, inició una época de compra de predios por entidades municipales y oficiales, contribuyendo a la restauración pasiva mediante la creación de áreas protegidas, como en el caso de La Elvira. En la nueva etapa del Siglo XXI, la sucesión natural por abandono de áreas prioritarias ha sido un factor clave en la restauración, sumado al abandono de la ganadería intensiva debido al cambio generacional en la población.

Finalmente, el modelo de Plantaciones protectoras productoras hizo un aporte importante al mantenimiento de coberturas y sigue siendo una alternativa para la región siempre y cuando se haga bajo medidas de manejo y certificación forestal sostenible (Figura 9).

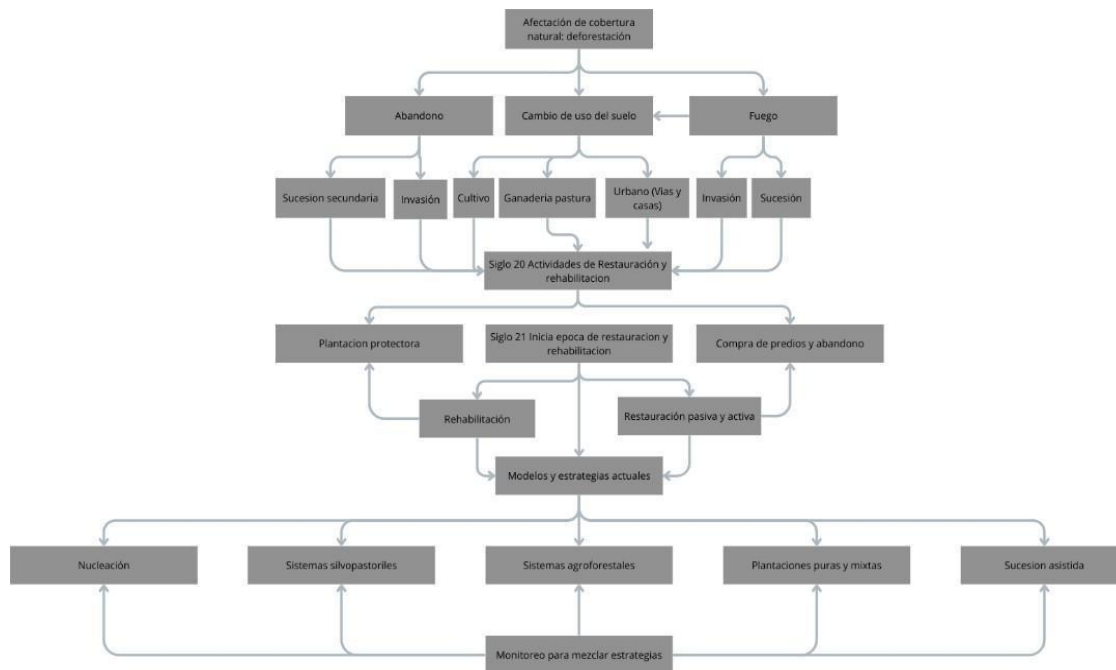


Figura 9. Modelo conceptual de degradación y rehabilitación de la cuenca alta del río Arroyohondo.

### Modelos de arreglos para restauración y rehabilitación

El modelo conceptual se basa en lo encontrado en los modelos sucesionales y los 5 grupos funcionales de plantas identificados, incluyendo la facilitación dentro de áreas con pendientes y suelos complejos y precipitaciones limitadas. El modelo en tiempo y espacio trata de combinar las propiedades de los 5 grupos encontrados generando un modelo que es una solución basada en la naturaleza a partir del escenario local. Este modelo propone los siguientes arreglos funcionales de acuerdo con la estrategia a usar.

#### Nucleación

Se recomienda el grupo funcional 1, 4 y 5, ya que son solo especies nativas en diferentes arreglos dependiendo del nivel de degradación, principalmente en áreas de fragmentos pequeños.

#### Sistemas silvopastoriles y sistemas agroforestales

Se recomienda el uso de los grupos 2 y 3 compuestos por especies introducidas que se sabe de su adaptación ambiental y cierta aceptación social cuando no están en plantación pura. La diferenciación entre los grupos 2 y 3 se basó en criterios ecológicos y funcionales, además del dendrograma, ya que el Grupo 2 está compuesto por especies introducidas adaptadas y mayormente aceptadas en restauración, las cuales se utilizan para estabilizar suelos y cubrir áreas degradadas, mientras que el Grupo 3 incluye especies de crecimiento acelerado, comúnmente usadas en plantaciones comerciales.

## Plantaciones puras y mixtas

Para el propósito de rehabilitación se recomienda el grupo 2 mezclado en diferentes proporciones con el grupo 5, estaríamos frente a una mezcla de las dos especies naturalizadas y que han mostrado buen desempeño y que sirven de facilitadoras cuando se plantan a densidades bajas como se evidencian en la zona de estudio, el grupo 5 son las típicas pioneras de los bosques premontanos. Esta combinación se puede usar en áreas altamente degradadas para que la rehabilitación sea rápida.

## Sucesión asistida

Aquí se recomienda el uso del grupo 1 y 4, que son las nativas de crecimiento medio y las nativas de crecimiento lento. La proporción dependerá del nivel de avance de la sucesión que se escoja para asistir con diferentes tratamientos, pero principalmente enriquecimiento.

## Distribución espacial de los tratamientos de rehabilitación en la cuenca

Se realizó un análisis espacial de estrategias de rehabilitación en la cuenca Arroyohondo, resaltando dos enfoques principales: la estrategia de nucleación y la estrategia de rehabilitación. Tal como se ve en la Figura 10. La imagen se divide en dos paneles, ambos sobre un fondo de imagen satelital, con información geoespacial relevante superpuesta.

En ambos paneles, los límites de la cuenca Arroyohondo se representan en color rojo, mientras que la Reserva Forestal Protectora Nacional La Elvira se delimita en color azul. Esta zonificación es crucial, ya que permite identificar la relación espacial entre las estrategias de restauración y las áreas de conservación preexistentes.

El análisis de las áreas ocupadas por cada estrategia muestra que la nucleación abarca 1909.53 hectáreas, mientras que la rehabilitación cubre 953.43 hectáreas. Esto indica que la superficie destinada a la nucleación es aproximadamente 2 veces mayor que la destinada a la rehabilitación. Además, la diferencia entre ambas estrategias es de 956.1 hectáreas, lo que evidencia una mayor asignación de área para la nucleación en comparación con la rehabilitación dentro del área de estudio.

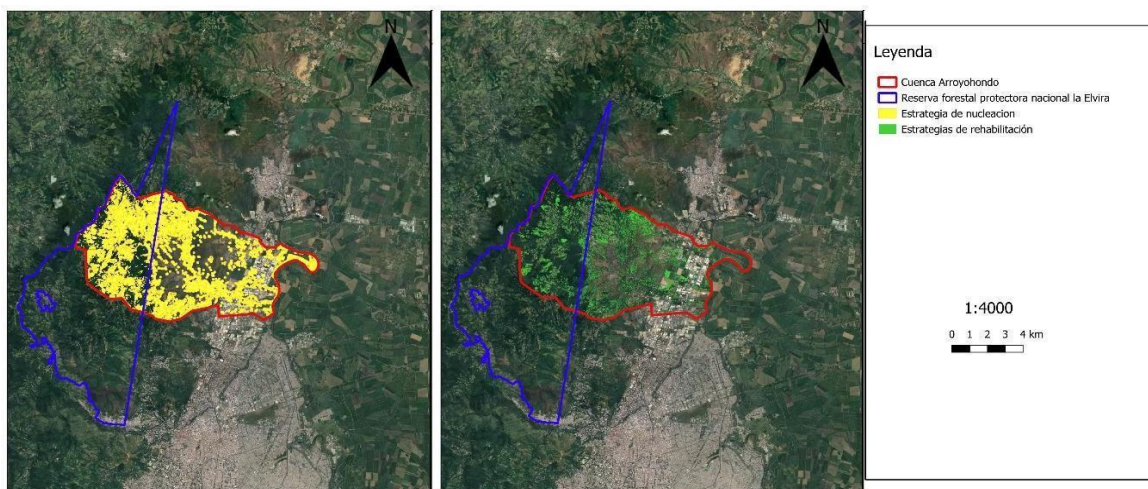


Figura 10. Estrategias de rehabilitación espacializadas propuestas para la zona de estudio.

Se observa la distribución de las áreas clasificadas bajo la estrategia de nucleación (en amarillo). Estas áreas corresponden a polígonos que fueron generados a partir de la identificación de parches de vegetación remanente en la cuenca. La alta densidad de puntos amarillos sugiere la presencia de múltiples fragmentos de bosque dispersos dentro del área de estudio. Para reforzar la conectividad de estos fragmentos, se aplicó un buffer de 50 metros alrededor de los polígonos clasificados como bosques, lo que permite definir corredores ecológicos potenciales y facilitar el proceso de sucesión ecológica.

Se representan las áreas asignadas a la estrategia de rehabilitación (en verde). Esta estrategia abarca una superficie total de 953.43 ha y se enfoca en zonas donde la cobertura boscosa ha sido degradada, pero donde aún existe potencial para la recuperación de la estructura y función ecosistémica. La distribución de estas áreas sugiere que la rehabilitación se centra en sectores cercanos a parches boscosos existentes, lo que podría facilitar la dispersión de semillas y la recuperación natural de la vegetación.

La distribución espacial de las estrategias dentro de la cuenca evidencia un patrón claro, en el que la rehabilitación se concentra estratégicamente en torno a los sectores de nucleación. Esto sugiere un enfoque integral que no solo busca recuperar áreas degradadas, sino también fortalecer la conectividad del paisaje, facilitando la regeneración natural y la movilidad de especies. La proximidad de estas estrategias a los núcleos de restauración indica que su disposición no es aleatoria, sino que responde a una planificación que prioriza la continuidad ecológica y la estabilidad de los ecosistemas en el tiempo.

Para comprender mejor la relación entre las estrategias y su disposición en el territorio, se generó un mapa que integra todas las acciones propuestas en el área de estudio. Este mapa permite visualizar cómo cada estrategia se complementa con las demás, promoviendo la restauración funcional del paisaje y asegurando que los procesos ecológicos clave sean sostenidos a largo plazo. La Figura 11 ilustra esta planificación espacial, proporcionando una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión y recuperación de la cuenca. La proximidad de estas estrategias con la Reserva Forestal Protectora Nacional La Elvira refuerza la importancia de este corredor como un área de influencia clave en la restauración ecológica. La continuidad de las intervenciones dentro y fuera de la reserva puede facilitar la expansión de la vegetación y la recuperación de funciones ecosistémicas esenciales.

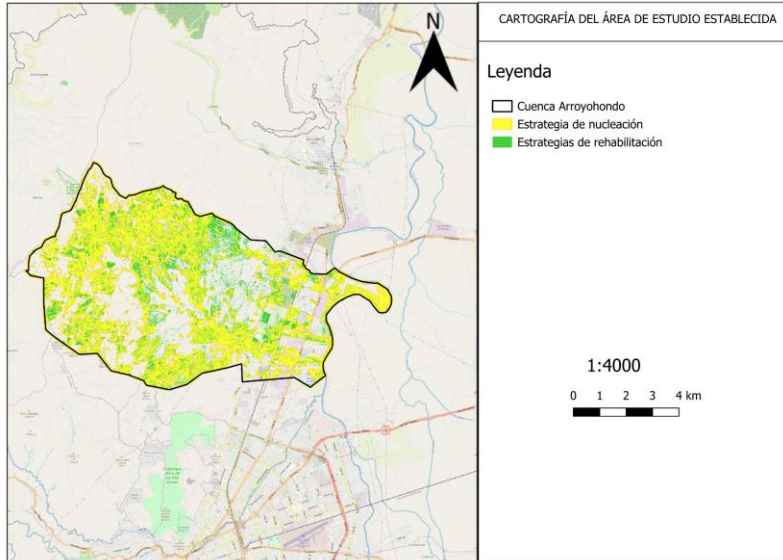


Figura 11. Comparación de estrategias de rehabilitación especializadas propuestas para la zona de estudio.

Por lo tanto, cabe resaltar que la identificación de estas áreas con base en análisis geospaciales proporciona una herramienta valiosa para la planificación de proyectos de restauración, permitiendo priorizar zonas de intervención y optimizar el uso de recursos en función de la dinámica del paisaje.

### 3. DISCUSIÓN

Los resultados muestran un paisaje bastante degradado con respecto a las coberturas originales, una dinámica alta y unas estrategias de rehabilitación usadas a través de la historia con especies introducidas principalmente. La diversidad de especies arbóreas es alta y las asociaciones vegetales se caracterizan por tener mezcladas especies nativas e introducidas.

La deforestación es el principal motor de cambio de uso del suelo en Colombia (Armenteras y Rodríguez, 2014), posteriormente los terrenos deforestados son utilizados para diferentes sistemas agropecuarios y en los andes esa fue la dinámica del siglo pasado. La cuenca estudiada en su parte alta mostró un patrón de recuperación en este siglo lo cual no es común en cuencas andinas de Colombia, en las cuales los patrones de deforestación, aunque bajos continúan o se muestran estables las coberturas y continúan los patrones de fragmentación de los bosques andinos (Armenteras et al., 2003, 2018). Esta dinámica obedece a los patrones socioeconómicos, los cuales moldean el uso del suelo, en este caso la cuenca alta del río Arroyohondo giro hacia un patrón de uso habitacional, recreacional y turismo, lo que redundo en estabilidad de las áreas de conservación, este patrón se ha observado en otras regiones del mundo como Costa Rica (Canet, 2015), Brasil (Trentin et al., 2018) y otras regiones de Colombia donde se han desarrollado los llamados bosques sucesionales (Hurtado-M et al., 2022). También el papel de las plantaciones forestales llamadas a finales del siglo pasado y principios de este siglo plantaciones protectoras-productoras, sirvieron como facilitadoras de sucesión en diversas partes del mundo (Vasquez-Velasquez, 2016; Fernández Méndez et al., 2012) y el presente estudio evidenció también esto y la evaluación del estado de esas iniciativas mostró que facilitan la formación de bosques.

La perspectiva de nuevos ecosistemas es un debate actual y surge del abandono o falta de gestión de tierras que eran usadas para cultivos (Hobbs et al., 2009). Estas modificaciones de los paisajes y la introducción de especies hacen que la biodiversidad en general sea muy variada en las zonas tropicales donde se han introducido múltiples formas de vida. Los datos observados en el presente estudio demuestran que existen una gran cantidad de especies introducidas compartiendo nicho con las nativas (Figura 5), lo que nos permite considerar nuestra área de estudio como un nuevo ecosistema.

En general, los bosques andinos son muy diversos, en este estudio en una muestra relativamente pequeña con unidades de muestreo pequeñas se encontraron 38 especies, y en recorridos más de 100 especies y en los reportes del GBIF más de 400, esto ratifica que los mosaicos andinos a pesar de su alta fragmentación (Armenteras et al., 2003, 2018) conservan una riqueza de especies alta. Los valores de riqueza y presencia de especies en este estudio son similares a reportes para la región de Los Andes (Vargas, 2005, 2007).

Se destaca en la flora de la zona de estudio las especies introducidas como plantaciones forestales en el siglo pasado, las cuales ahora hacen parte de coberturas boscosas y se observa que algunas conviven con la biodiversidad nativa como los son *Cupresus lusitánica* y *Fraxinus chinensis*. Por otro lado, están las especies del género *Pinus sp* y *Eucalyptus sp* que son usadas para sistemas productivos de madera y pulpa para cartón, las cuales se encuentran en plantación pura, en cercas vivas y también en bosques de galería.

En cuanto a funcionalidad se encontraron los tres rasgos seleccionados para las 38 especies encontradas en las parcelas, esos tres rasgos que son procedencia, grupo de crecimiento y facilidad para compartir nicho y sobrevivir con otras especies de la región, estas describieron bien las especies encontradas. Estos rasgos lograron diferenciar claramente 5 grupos funcionales que determinan la interacción de estas especies en el paisaje, diferentes grupos se han seleccionado para las especies tropicales (Calbi et al., 2024; Bocanegra et al., 2015; Fernandez-Mendez, 2007), esas agrupaciones son objetivas siempre y cuando se tenga claro la funcionalidad, la respuesta y efecto de los rasgos en la función estudiada y la lógica biológica de los datos, lo cual fue claramente declarado en esta investigación.

El primer grupo está compuesto por 25 especies nativas de crecimiento intermedio, este grupo es típico y muy abundante en otras formaciones boscosas como los bosques húmedos (Casanoves et al., 2011; Fernandez-Mendez, 2007). El segundo grupo corresponde a dos especies introducidas y que se conocen como naturalizadas en Colombia como lo son *Urapan* y *Cipres* que tienen crecimiento relativamente rápido, estas especies son ampliamente usadas en reforestación comercial y protectora en Colombia. El tercer grupo lo forman tres especies introducidas no naturalizadas de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* de crecimiento rápido sobre las cuales hay bastante polémica en su uso masivo pero muy frecuentes en los paisajes andinos en cercas vivas y otros arreglos. Un cuarto grupo con dos especies nativas, una de palma y una lauraceae típicas de sucesiones maduras en Los Andes (Vargas, 2005), no se encontraron más especies en el muestreo debido a que las áreas muestreadas son áreas recuperadas y no prístinas las cuales están en la parte alta de la cuenca y en una cuenca aledaña donde hay zonas de reserva que no son comunes en la cuenca de estudio. Para proyectos de restauración futuros este grupo funcional se puede ampliar con caracterizaciones de bosques remanentes y mejorar los procesos de rehabilitación y restauración en la región.

Finalmente, el grupo funcional 5 obedece a 6 especies conocidas como típicamente pioneras en los bosques andinos (Vargas, 2005), las cuales son muy abundantes en bordes de carretera, bosques de galería y colonizan las áreas que se dejan sin manejo en la cuenca.

En cada región que se pretende restaurar o rehabilitar se debe analizar la historia de perturbación y recuperación de las coberturas (Gann et al., 2019; Holl, 2023), esto hace que generar modelos locales de disturbios que redunden en modelos de rehabilitación son fundamentales para mejorar la praxis de la restauración ecológica. Es poca la información publicada donde se encuentren arreglos y combinaciones de especies propuestas para ecosistemas degradados como los andes (Castellanos-Castro y Bonilla, 2011), por esto la presente contribución propone mezclas de grupos funcionales para cuatro estrategias o modelos de restauración y rehabilitación como lo son los sistemas agrosilvopastoriles, la nucleación, la regeneración asistida y principalmente se hace énfasis en plantaciones puras o mixtas con el enfoque de rehabilitación, estas propuestas no muy necesarias pues incluyen un componente teórico ecológico que refuerza la propuesta (Walker y del Moral, 2003).

## 4. CONCLUSIONES

La cuenca alta del río Arroyohondo ha tenido una dinámica alta en cuanto a coberturas, degradación y rehabilitación en lo corrido del siglo XXI, lo cual la podría catalogar como un conjunto de nuevos ecosistemas, agroecosistemas y remanentes de ecosistemas boscosos originales en las partes límites de la parte más alta de la cuenca.

Combinada la diversidad arbórea nativa y las múltiples especies introducidas en los paisajes andinos se puede concluir que existe un potencial para desarrollar procesos de rehabilitación con los arreglos propuestos en la presente investigación, las cuales no son modelos de restauración sino de rehabilitación funcional que puede brindar servicios ecosistémicos y mantener bajo el nivel de degradación del suelo, buen stock de carbono retenido y buena regulación hídrica en estas zonas montañosas.

El modelo conceptual y la propuesta de arreglos para rehabilitación se basan en la experiencia comunitaria y técnica de la región andina, con el apoyo de las autoridades ambientales locales. Dado su enfoque específico, es crucial validarlo en otras cuencas y paisajes para asegurar su eficacia en diferentes contextos. En particular, debe ser evaluado en la cordillera occidental, especialmente en áreas cercanas a asentamientos humanos, que dependen de los servicios ecosistémicos de estas cuencas, que aunque modificadas, siguen siendo fundamentales para la provisión de agua y la estabilidad ecológica en la región.

## 5. LITERATURA CITADA

- Adenesky-Filho E (2017) How to select potential species for ecological restoration of rain forest – southern Brazil. *Applied Ecology and Environmental Research* 15:1671–1684
- Anderson EP, Marengo J, Villalba R, Halloy S, Young B, Cordero D, Gast F, Jaimes E, Ruiz D (2011) Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the tropical Andes. SK Herzog, R. Martínez, PM Jørgensen y H. Tiessen (comps.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente
- Armenteras D, Gast F, Villareal H (2003) Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation* 113:245–256
- Armenteras D, Gonzalez TM, Meza M, Ramirez-Delgado JP, Cabrera E, Galindo G, Yepes A (2018) *Causas de Degradación Forestal en Colombia: una primera aproximación*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM, Bogotá
- Armenteras D, Rodríguez N (2014) *DINÁMICAS Y CAUSAS DE DEFORESTACIÓN EN BOSQUES DE LATINO AMÉRICA: UNA REVISIÓN DESDE 1990*. Colombia Forestal 17:233

- Balthazar V, Vanacker V, Molina A, Lambin EF (2015) Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecological Indicators* 48:63–75
- Baselga A (2010) Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity: Partitioning beta diversity. *Global Ecology and Biogeography* 19:134–143
- Bocanegra K, Fernández F, Galvis J (2015) GRUPOS FUNCIONALES DE ÁRBOLES EN BOSQUES SECUNDARIOS DE LA REGIÓN BAJO CALIMA (BUENAVENTURA, COLOMBIA). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural* 19:17–40
- Cadotte MW, Carscadden K, Mirotchnick N (2011) Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services: Functional diversity in ecology and conservation. *Journal of Applied Ecology* 48:1079–1087
- Calbi M, Boenisch G, Boulangeat I, Bunker D, Catford JA, Changenet A, Culshaw V, Dias AS, Hauck T, Joschinski J, Kattge J, Mimet A, Pianta M, Poschlod P, Weisser WW, Roccotiello E (2024) A novel framework to generate plant functional groups for ecological modelling. *Ecological Indicators* 166:112370
- Canet G (2015) Recuperación de la cobertura forestal en Costa Rica, logro de la sociedad costarricense. *Ambientico* 17–22
- Casanoves F, Pla L, Di Rienzo JA (2011) Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. CATIE

Castellanos-Castro C, Bonilla MA (2011) GRUPOS FUNCIONALES DE PLANTAS CON POTENCIAL USO PARA LA RESTAURACIÓN EN BORDES DE AVANCE DE UN BOSQUE ALTOANDINO. 22

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>

CVC, Fundación DapaViva (2023) DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE PARA LA ADOPCIÓN DEL PLAN DE MANEJO DE LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA NACIONAL AGUACATAL (LA ELVIRA) - CERRO DAPA CARISUCIO.

CVC, PROAGUA (2019) PLAN DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO – PORH DEL RÍO ARROYOHONDO Y TRIBUTARIOS QUEBRADA EL RINCÓN Y LA SONORA.

Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson RT, Molnár Z, Hill R, Chan KMA, Baste IA, Brauman KA, Polasky S, Church A, Lonsdale M, Larigauderie A, Leadley PW, van Oudenhoven, Demissew S, Erpul G, Failler P, Guerra CA, Hewitt CL, Keune H, Lindley S, Shirayama Y (2018) Assessing nature's contributions to people. *Science* 359:270–272

- ESRI. (2024). Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series. ArcGIS Online. Retrieved November 26, 2024, from <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=cfc7609de5f478eb7666240902d4d3d>
- Etter, A., Andrade, Á., Saavedra, K., Amaya, P., Cortés, J., & Arévalo, P. (2020). Ecosistemas colombianos: Amenazas y riesgos. Una aplicación de la Lista Roja de Ecosistemas a los ecosistemas terrestres continentales. Pontificia Universidad Javeriana
- Fernández Méndez F, Camargo Martínez YK, Sarmiento MB (2012) Biodiversidad vegetal asociada a plantaciones forestales de *Pinus caribaea* Morelet y *Eucalyptus pellita* F. Muell establecidas en Villanueva, Casanare, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 65:6749–6764
- Fernandez-Mendez F (2007) Diversidad funcional de bosques muy húmedos tropicales en el noreste de Costa Rica a partir de rasgos foliares y densidad de la madera. *Magister Scientiae, CATIE, Costa Rica*
- Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Jonson J, Hallett JG, Eisenberg C, Guariguata MR, Liu J, Hua F, Echeverría C, Gonzales E, Shaw N, Decler K, Dixon KW (2019) International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27:S1–S46
- GFW (2024). Global Forest Watch:Deforestation and forest monitoring. Global Forest Watch. Retrieved November 26, 2024, from <https://www.globalforestwatch.org/>

- de Groot RS (1987) Environmental functions as a unifying concept for ecology and economics. *Environmentalist* 7:105–109
- Hobbs RJ, Higgs E, Harris JA (2009) Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology & Evolution* 24:599–605
- Holl KD (2023) INTRODUCCIÓN A LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA. 1st ed. CopIt-arXives, Mexico
- Houghton RA (2012) Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4:597–603
- Hurtado-M AB, Muñoz JC, Echeverry-Galvis MÁ, Norden N (2022) Bosques sucesionales en Colombia: una oportunidad para la recuperación de paisajes transformados. *Caldasia* 44:332–344
- Kobayashi S (1994) Effects of harvesting impacts and rehabilitation of tropical rain forest. *Journal of Plant Research* 107:99–106
- Kobayashi S, J.W. T, T. T, T. M, N.M.N.A. M, Eds. (2001) Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings, 2-4 November 1999, Bogor, Indonesia. Center for International Forestry Research (CIFOR)
- Li W, Shen Y, Wang G, Ma H, Yang Y, Li G, Huo X, Liu Z (2024) Plant species diversity and functional diversity relations in the degradation process of desert steppe in an arid area of northwest China. *Journal of Environmental Management* 365:121534

- Melo O, Vargas R (2002) Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Conde, Ibagué
- MinAmbiente (2014) Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Minambiente, Bogotá
- MinAmbiente (2015). Plan Nacional de Restauración: Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Disturbadas. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/PLAN\\_NACIONAL\\_DE\\_RESTAURACION%CC%81N\\_2.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACION%CC%81N_2.pdf)
- Poorter L, Amissah L, Bongers F, Hordijk I, Kok J, Laurance SGW, Lohbeck M, Martínez-Ramos M, Matsuo T, Meave JA, Muñoz R, Peña-Claros M, Van Der Sande MT (2023) Successional theories. *Biological Reviews* brv.12995
- SER (2004) The SER Primer on Ecological Restoration.
- Trentin BE, Estevan DA, Rossetto EFS, Gorenstein MR, Brizola GP, Bechara FC (2018) RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: PASSIVA, NUCLEAÇÃO E PLANTIO DE ALTA DIVERSIDADE. *Ciência Florestal* 28:160–174
- Vargas O (2007) Guia-metodologica-restauracion-ecologica bosque alto andino.pdf. Bogotá, D.C
- Vargas W (2005) Flora de las montañas del Quindío. Centro Editorial de la Universidad de Caldas.

Vasquez-Velasquez G (2016) INFLUENCIA DEL USO DE LA TIERRA EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE CABECERA EN LOS ANDES CENTRALES DE COLOMBIA. Ph. D., Universidad Nacional de Colombia, Medellin

Walker LR, del Moral R (2003) Applications of theory for rehabilitation. In: Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation. Vol. 1 Cambridge University Press, EEUU pp. 282–327.

Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., ... & Chave, J. (2009). Global wood density database. Dryad Digital Repository. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

## ANEXOS

Anexo 1. Listado de especies reportadas en GBIF para la zona de estudio

Se anexa el enlace del listado de especies reportadas en GBIF para la zona de estudio en un documento en Excel.

[listado GBIF area de estudio.xlsx](#)

Anexo 2. Listado de especies encontrados en las parcelas y sus rasgos funcionales

<b>Nombre Científico</b>	<b>n</b>	<b>AB</b>	<b>Procedencia</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>Asocia</b>
<i>Cupressus lusitanica</i>	7	1.13	2	2	1
<i>Myrcine guianensis</i>	7	0.17	5	2	1
<i>Heliocarpus popayanensis</i>	6	0.15	5	3	1
<i>Miconia sp.</i>	4	0.05	5	3	1
<i>Ocotea sp</i>	4	0.21	5	1	1
<i>Toxicodendrum striata</i>	4	0.04	5	2	1
<i>Eucaliptus pulverulenta</i>	3	0.01	1	1	0
<i>Fraxinus chinensis</i>	3	0.49	2	2	1
<i>Oreopanax sp</i>	3	0.03	5	2	1
<i>Saurauia ursina</i>	3	0.07	5	2	1
<i>Tibouchina lepidota</i>	3	0.06	5	2	1
<i>Cecropia telealba</i>	2	0.04	5	3	1
<i>Clusia multiflora</i>	2	0.02	5	2	1
<i>Eucaliptus grandis</i>	2	0.86	2	3	0
<i>Guettarda sp</i>	2	0.01	5	2	1
<i>Myrcia popayanensis</i>	2	0.03	5	2	1
<i>Vismia baccifera</i>	2	0.03	5	3	1
<i>Alchornea grandiflora</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Ardisia sp</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Brunellia comocladifolia</i>	1	0.11	5	2	1
<i>Cinchona sp</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Clethra sp</i>	1	0.03	5	2	1
<i>Cronton sp.</i>	1	0.04	5	2	1
<i>Cupania americana</i>	1	0.03	5	2	1
<i>Dendropanax arboreus</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Euterpe precatória</i>	1	0.01	5	1	1
<i>Ficus sp</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Hediosmun sp</i>	1	2.60E-03	5	2	1
<i>Trema micrantha</i>	1	0.07	5	3	1
<i>Inga sp1</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Inga sp2</i>	1	0.01	5	2	1

<i>Morus sp</i>	1	0.02	5	2	1
<i>Palicourea sp</i>	1	4.40E-03	5	3	1
<i>Pinus patula</i>	1	0.05	1	3	0
<i>Piper sp</i>	1	2.80E-03	5	2	1
<i>Rueagea sp</i>	1	0.03	5	2	1
<i>Spirotheca sp</i>	1	0.01	5	2	1
<i>Viburnum cornifolium</i>	1	0.01	5	2	1