



Evaluación del cumplimiento en la siembra de árboles nativos y de su beneficio ambiental por captura de CO₂: análisis en el marco de la auditoría interna de gestión contractual y supervisión de CORANTIOQUIA.

Juan Pablo Castaño Correa

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Ambiental

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Asesor Interno

Michael Ezequiel Gómez Rodríguez, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Castaño Correa, 2025)
Referencia	Castaño Correa, J. (2025). <i>Evaluación del cumplimiento en la siembra de árboles nativos y de su beneficio ambiental por captura de CO2: análisis en el marco de la auditoría interna de gestión contractual y supervisión de CORANTIOQUIA</i> . [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia, mi mayor tesoro, dedico con todo mi corazón este logro. A mi padre, cuyo legado como ingeniero me inspira cada día, su sacrificio y dedicación me permitieron acceder a una educación de calidad. A mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante me han dado la fuerza para superar cualquier obstáculo. A mi hermano, mi cómplice y amigo, quien ha compartido conmigo las alegrías y las dificultades de este camino. Gracias por celebrar cada uno de mis pequeños triunfos y por hacerme sentir querido y valorado en todo momento.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a CORANTIOQUIA por permitirme ser parte de su equipo y adquirir una experiencia profesional invaluable. A mis compañeros de la Oficina de Control Interno, Saulo Rivera, Liz Cañas, Nelly Valencia, Cesar Montoya, Diana López y Liliana Suárez, por su amistad, colaboración y enseñanzas que trascenderán este periodo de práctica. A la Universidad de Antioquia, por formarme como profesional, como persona y por darme amigos para la vida. A mis asesores, Michael y Cesar, por su paciencia y dedicación para guiarme en este proceso de aprendizaje.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
3. Marco teórico	12
3.1 Cambio climático y captura de carbono	12
3.2 Estimación del potencial de captura de carbono en la reforestación	13
3.3 Estimación del potencial de captura de carbono en la reforestación	14
3.4 Conceptos de auditoría interna	16
4. Metodología	17
4.1 Recolección de datos y evaluación del cumplimiento contractual	17
4.2 Especies de estudio	18
4.3 Estimación del potencial de captura de carbono	20
4.4 Valoración económica del carbono capturado	22
5. Análisis de resultados	24
5.1 Evaluación del cumplimiento de la obligación contractual	24
5.2 Estimación del potencial de captura de carbono	26
5.3 Valoración económica del carbono capturado	31
6. Conclusiones y recomendaciones	33
Referencias	35

Lista de tablas

Tabla 1	Breve descripción e imagen de las especies de estudio	18
Tabla 2	Ecuaciones alométricas utilizadas para cada especie	21
Tabla 3	Contratos con observación debido al incumplimiento de la obligación	24
Tabla 4	Contratos con observación sin evidencia de ticket de siembra	25
Tabla 5	Especies con mayor número de árboles sembrados	27
Tabla 6	Estimación del CO ₂ capturado para las especies de estudio, al año dos de vida	29
Tabla 7	Valoración económica del CO ₂ capturado, basado en mercados de carbono	31

Lista de figuras

Figura 1 Estimación de la biomasa y carbono almacenado con base en la edad del árbol 28

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CORANTIOQUIA Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia

ANLA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

MADS Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CO₂ Dióxido de carbono

DAFP Departamento Administrativo de la Función Pública

Resumen

El cambio climático representa un reto crítico a nivel global y la mitigación de sus efectos es fundamental para garantizar un futuro sostenible. En respuesta a esta problemática, la siembra de árboles ha sido reconocida como una estrategia efectiva para capturar carbono y fortalecer la biodiversidad. Bajo este contexto, CORANTIOQUIA está comprometida con la implementación de políticas que ayuden a mitigar dicha problemática y en particular, ha implementado la obligación de sembrar un árbol nativo por cada millón de pesos del presupuesto de cada uno de sus contratos, como parte de sus iniciativas de compensación ambiental. En este trabajo se evaluó el cumplimiento de dicha obligación, se estimó el potencial de captura de carbono de algunas especies de seleccionadas y se realizó una valoración económica del carbono capturado con base en bonos de carbono, combinando métodos cualitativos y cuantitativos; esto en el marco de una auditoría interna de gestión contractual y supervisión. Los resultados mostraron que, aunque se ha avanzado en el cumplimiento de la obligación, se han presentado deficiencias en algunos contratos y que existen oportunidades de mejora en procesos de seguimiento y control por parte de la supervisión. La estimación del potencial de captura de carbono atmosférico, realizada mediante modelos alométricos, indicó un total de carbono capturado por las especies de estudio de 383.97 tCO_{2eq}, en el año dos de vida, para una valoración económica de \$ 9,906,427, con base en el impuesto al carbono en Colombia. Se resaltan las especies *Jacaranda copaia* y *Tabebuia rosea* por su impacto en el corto plazo.

Palabras clave: siembra árboles nativos, captura de carbono, valoración económica ambiental, auditoría interna, CORANTIOQUIA.

Abstract

Climate change poses a critical global challenge, making mitigation efforts essential for ensuring a sustainable future. Tree planting has emerged as an effective strategy for carbon sequestration and biodiversity enhancement. In this context, CORANTIOQUIA has committed to addressing climate change by adopting the Regional Climate Change Plan and implementing policies that promote environmental compensation. Notably, it mandates the planting of one native tree for every million Colombian pesos in contract budgets. This study evaluated compliance with this obligation, estimated the carbon sequestration potential of selected tree species, and economically valued the captured carbon based on carbon credit markets, using both qualitative and quantitative methods within the framework of an internal audit of contract management and supervision. Results revealed progress in compliance but highlighted deficiencies in certain contracts and opportunities to improve monitoring and control processes. Carbon sequestration potential, estimated using allometric models, indicated a total capture of 383.97 tCO_{2eq} by the second year, with an economic valuation of COP 9,906,427 based on Colombia's carbon tax. Species such as *Jacaranda copaia* and *Tabebuia rosea* were identified as impactful in the short term. The findings underscore CORANTIOQUIA's initiative as a valuable contribution to climate change mitigation and emphasize the need to strengthen oversight mechanisms to ensure environmental compliance.

Keywords: native tree planting, carbon sequestration, environmental economic valuation, internal audit, CORANTIOQUIA.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes y significativos de nuestra era, impulsado principalmente por las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), en especial el dióxido de carbono (CO₂) (Lee et al., 2024). Como consecuencia de esto, se prevé que en las próximas dos o tres décadas se intensifiquen los efectos del cambio climático, tales como olas de calor, incendios forestales, sequías, tormentas e inundaciones, lo que supondrá mayores riesgos para la salud humana y la estabilidad mundial (Wang et al., 2023). Estas tendencias exigen la aplicación de estrategias de mitigación y adaptación. En el contexto colombiano, se han adoptado estrategias para hacerle frente a dicha problemática, como la Política Nacional de Cambio Climático que busca incorporar la gestión del cambio climático en las decisiones públicas y privadas para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos del cambio climático y permita aprovechar las oportunidades que este genera (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) o el impuesto nacional al carbono creado por medio de la Ley 1819 de 2016, que busca desincentivar el uso de los combustibles fósiles e incentivar mejoras tecnológicas para su uso más eficiente.

Esta obligación no solo contribuye a la reducción de emisiones de carbono, sino que también promueve la restauración de la biodiversidad, mejora la calidad del aire y del agua, y fomenta la creación de espacios verdes que benefician a las comunidades locales. Sin embargo, es crucial que esta medida se implemente de manera efectiva, asegurando la selección adecuada de especies nativas y un seguimiento constante de las áreas reforestadas. De este modo, se maximizarán los beneficios ambientales y se garantizará la sostenibilidad de los ecosistemas involucrados.

El presente proyecto tiene como objetivo, realizar un análisis integral del cumplimiento de la obligación contractual de siembra de árboles a partir de una muestra selectiva sobre los contratos de CORANTIOQUIA; además se propone realizar una aproximación del potencial de captura de carbono, delimitado a ciertas especies con mayor potencial de almacenamiento de carbono, según las características del ecosistema y el manejo forestal. Con base en lo anterior, se propone llevar a cabo una valoración económica ambiental del carbono capturado en términos de bonos de carbono.

Esto en el marco de la auditoría interna de gestión contractual y supervisión, llevada a cabo por la Oficina de Control Interno en el año 2024, en donde se analizarán los informes de los contratistas y supervisores para su evaluación. Finalmente, se formularán recomendaciones prácticas para fortalecer la implementación de esta estrategia, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar la valoración económica ambiental de los bonos de carbono de acuerdo con el cumplimiento de la obligación contractual de la siembra de árboles nativos de CORANTIOQUIA.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el cumplimiento de las obligaciones contractuales en materia ambiental relacionada con la siembra de árboles en el marco de la auditoría interna.
- Realizar una aproximación del potencial de captura de carbono de los árboles sembrados.
- Proponer recomendaciones para fortalecer su implementación.

3. Marco teórico

3.1 Cambio climático y captura de carbono

El sexto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), publicado el 27 de febrero de 2022 resalta los cambios sin precedentes a escala mundial del sistema climático (IPCC, 2022), convirtiéndose en uno de los principales retos ambientales en la actualidad. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂), son el principal factor que impulsan dichos cambios. De acuerdo con el informe, el cambio climático ha causado daños sustanciales, pérdidas cada vez más irreversibles en ecosistemas terrestres, de agua dulce, marinos costeros y de alta mar. Se ha producido un deterioro generalizado de la estructura y la función de los ecosistemas, de su resiliencia y de su capacidad de adaptación natural, así como cambios en el calendario estacional con consecuencias socioeconómicas adversas. Se han identificado, además, daños económicos asociados al cambio climático en sectores expuestos al clima, con efectos regionales en la agricultura, la silvicultura, la pesca, la energía y el turismo (IPCC, 2022). De acuerdo con lo anterior, se han propuesto e

implementado diversas estrategias para su mitigación y adaptación, entre ellas, la captura y almacenamiento de carbono (CAC), en particular de los ecosistemas forestales como sumideros de carbono (Cohen et al., 2021; Haszeldine et al., 2018; Wang et al., 2023). Es crucial reconocer que la captura de carbono por parte de la vegetación terrestre emerge como una solución basada en la naturaleza y económicamente viable para lograr la neutralización del carbono (Van Soest et al., 2021).

El sumidero de carbono forestal se refiere a la capacidad para absorber dióxido de carbono por los árboles, el suelo y la vegetación del sotobosque (Erb et al. 2013; Pan et al. 2011). Se estima que este tipo de ecosistemas absorben aproximadamente 2600 millones de toneladas de dióxido de carbono al año, lo que representa alrededor de un tercio del CO₂ liberado por la quema de combustibles fósiles (IUCN, 2017). Optimizar la gestión de los suelos y promover la preservación y restauración de los bosques y otros tipos de vegetación son esenciales para maximizar la capacidad de secuestro de carbono (Guo et al., 2024).

3.2 Estimación del potencial de captura de carbono en la reforestación

El principal reservorio terrestre de carbono se encuentra en la vegetación, tanto en sus partes aéreas como subterráneas, así como en la materia orgánica del suelo. Los árboles y plantas absorben CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y lo almacenan en su biomasa, que incluye troncos, ramas, hojas y raíces a (IPCC, 2006). El contenido de carbono varía entre las especies forestales ya que depende de las edades en las poblaciones, tasas de crecimiento, alturas y grosores máximos, así como las condiciones climáticas y topográficas del sitio donde se desarrollan (Casiano-Domínguez et al., 2018). De acuerdo con lo anterior, la biomasa aérea, al ser un indicador directo del carbono almacenado es la vegetación, es un parámetro clave en los inventarios forestales (Soriano-Luna et al., 2015). El uso de ecuaciones alométricas permite el cálculo de la biomasa de una especie forestal de una manera no destructiva y extrapolable a situaciones de crecimiento similares (Montero y Montaguiri, 2005). Una ecuación alométrica es una relación matemática que describe una línea curva que relaciona la biomasa de una planta con sus características morfométricas, como el diámetro o la altura. Estas ecuaciones son útiles porque permiten hacer predicciones precisas sobre la biomasa con un bajo requerimiento de datos (Schmidt et al. 2009).

Conforme a lo expuesto anteriormente las especies que deben plantarse en los ecosistemas y proyectos de reforestación es objeto de debate. Algunos expertos sugieren utilizar especies nativas o en necesidad de conservación (Conway et al., 2019; Gabriela et al., 2021), mientras que otros proponen elegir especies basándose en los servicios ecosistémicos que ofrecen, sin importar su estado de conservación (Potgieter et al., 2017). Por ejemplo, las especies de rápido crecimiento como el roble o el eucalipto tienen un alto potencial de captura en sus primeros años de vida, mientras que especies nativas pueden ofrecer beneficios a largo plazo, tanto en captura de carbono como en restauración de biodiversidad (Gabriela et al., 2021).

Para estimar el potencial de captura de carbono se utilizan diversas metodologías, siendo la más estandarizada la del IPCC que calcula la biomasa aérea, subterránea y el carbono del suelo (IPCC, 2006). En Colombia, en el 2011 el IDEAM presentó el “Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia” que ayuda a reducir la incertidumbre técnica y científica que rodea las estimaciones de carbono, al proponer métodos estándares para su estimación a escalas nacionales. De igual manera, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, presentó el instrumento “Valores de referencia del carbono almacenado en coberturas de la tierra y su valoración económica”, documento que ofrece un listado de factores de retención de carbono que pueden ser usados como datos de referencia para la cuantificación del carbono almacenado en un área de interés (ANLA, 2023).

3.3 Estimación del potencial de captura de carbono en la reforestación

Según Tomasini (1995), la valoración económica ambiental permite expresar los impactos y servicios ambientales en términos monetarios, lo que facilita su comparación y consideración junto con criterios económicos y financieros, como el análisis costo-beneficio. Esto contribuye a tomar decisiones más objetivas y fundamentadas, reduciendo la subjetividad. Además, la valoración proporciona un indicador confiable del rendimiento económico. El concepto de valor de los servicios ecosistémicos puede servir como una herramienta valiosa para identificar y evaluar las posibles compensaciones entre la sociedad y el resto de la naturaleza, además de mostrar cómo es posible mejorar el bienestar humano de manera sostenible. En la actualidad son usados con frecuencia métodos indirectos como los métodos de costos de viaje, costos evitados, valoración

contingente, precios hedónicos, mercados simulados, entre otros; y según Yao y Wallace (2024), la mayoría de los estudios que emplean estos métodos se han llevado a cabo en Norteamérica, Oceanía y Europa, destacando las concentraciones de estudios realizados en países como Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Finlandia; en contraparte Sudamérica y Asia presentan menos investigaciones en torno a estos métodos. Sin embargo, son métodos bastante subjetivos y que tienden a subestimar el rendimiento de la naturaleza frente a los beneficios económicos que supone algún tipo de intervención antrópica (Almeida et al, 2018). No obstante, tanto desde la economía ambiental como desde la biología, se han desarrollado métodos más directos que primero cuantifican el servicio ambiental y luego lo traducen en términos de mercado. Por ejemplo, en la valoración del secuestro de carbono, se puede medir el carbono almacenado en el suelo o en los troncos de los árboles, y posteriormente asignarle un valor económico basado en las tasas de transacción actuales en mercados como, por ejemplo, el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones de CO₂ (Zuluaga, L. y Castro, E., 2018).

Desde una perspectiva económica, el valor asociado al secuestro de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) se asemeja al costo del daño que se evitaría en caso de que dicha tonelada fuera liberada a la atmósfera (ANLA, 2023). Nordhaus (2007) calculó que para el año 2015 el costo social de no emitir una tonelada de carbono era de USD\$35, incrementándose a USD\$85 en 2050 y USD\$206 a 2100. En el marco normativo de Colombia, la Ley 1819 de 2016 en su artículo 221, modificado por el artículo 47 de la Ley 2277 de 2022, estableció el impuesto nacional al carbono, en los siguientes términos: “*ARTÍCULO 221. IMPUESTO AL CARBONO. El impuesto nacional al carbono es un gravamen que recae sobre el contenido de carbono equivalente (CO_{2eq}) de todos los combustibles fósiles, incluyendo todos los derivados del petróleo, gas fósil y sólidos que sean usados para combustión. (...)*” Así mismo, el artículo 222 de la Ley 1819 de 2016, modificado por el artículo 48 de la Ley 2277 de 2022, teniendo en cuenta las excepciones previstas en los párrafos 3, 4, 5 y 6 ibidem, estableció una tarifa específica considerando el factor de emisión de GEI para cada combustible determinado, expresado en unidad de peso (kilogramo de CO_{2eq}) por unidad energética (Terajulios), de acuerdo con el volumen o peso del combustible. Por lo que, para el año 2024, la tarifa corresponde a \$25.799,56 por cada tonelada de CO₂ emitido, según lo estipulado por la Resolución 000007 del 31 de enero de 2024 de la Dirección de Impuestos y

Aduanas Nacionales (DIAN). Es importante señalar que este valor debe ser ajustado anualmente conforme a las tasas de inflación, más un punto porcentual (ANLA, 2023).

En este contexto, existen de igual manera, mecanismos como la Iniciativa Regional de Gases de Efecto Invernadero (RGGI), el cual es un acuerdo de colaboración entre once estados del este de los Estados Unidos con el Objetivo de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de las centrales eléctricas ubicadas en sus territorios. Los estados participantes han implementado un límite regional de emisiones de CO₂ que establece un tope máximo para las emisiones permitidas de las plantas reguladas en el marco de la RGGI (RGGI, 2023). En los estados participantes, las centrales eléctricas sujetas a regulación deben adquirir permisos de emisión de CO₂ equivalente. Estos permisos son distribuidos a través de subastas trimestrales organizadas por los estados, donde pueden ser adquiridos por plantas eléctricas y otras entidades interesadas. Una vez asignados, los permisos pueden ser almacenados o negociados en un mercado secundario, facilitando la creación de un sistema dinámico de comercio de derechos de emisión (RGGI, 2023).

3.4 Conceptos de auditoría interna

El DAFP en su “Guía de Auditoría Interna basada en Riesgos para Entidades públicas – Versión 4” (2020), define los siguientes conceptos:

- Observación: también denominados “hallazgos”, y se obtienen al contrastar un criterio establecido (norma, ley, resolución, manuales internos etc) y la situación actual encontrada durante el examen a una actividad, procedimiento o proceso. Además, la redacción de los hallazgos debe tener:
- Condición: la evidencia basada en hechos que encontró el auditor interno (realidad).
- Criterios: las normas, reglamentos o expectativas utilizadas al realizar la evaluación, (lo que debe ser).
- Causa: Las razones subyacentes de la brecha entre la condición esperada y la real, que generan condiciones adversas (qué originó la diferencia encontrada).
- Consecuencias: los efectos adversos, reales o potenciales, de la brecha entre la condición existente y los criterios, (qué efectos puede ocasionar la diferencia encontrada).

4. Metodología

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto que combinó métodos cualitativos y cuantitativos para garantizar una evaluación integral. Los métodos cualitativos incluyeron el análisis de contenido documental, que abarcó la revisión y evaluación de contratos, normativas y directrices relacionadas con la cláusula de siembra de árboles de CORANTIOQUIA, así como el análisis del Plan y Guía de Auditoría para identificar criterios, requisitos y lineamientos aplicables.

Por su parte, los métodos cuantitativos se centraron en la estimación del carbono capturado utilizando modelos alométricos específicos, además de realizar proyecciones de captura de carbono considerando las especies plantadas y las condiciones ambientales de la región.

La investigación se estructuró en tres fases principales, cada una con técnicas e instrumentos diseñados específicamente para abordar las etapas del proceso en el marco de la Auditoría Interna, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Guía de Auditoría Interna para entidades públicas (DAFP, 2020) y el Plan de Auditoría.

4.1 Recolección de datos y evaluación del cumplimiento contractual

La muestra contractual utilizada para evaluar el cumplimiento de la siembra de árboles se definió de acuerdo con el alcance establecido en el Plan de Auditoría Interna. Este plan considera los contratos suscritos por la Corporación entre el 1 de enero de 2023 y el 30 de junio del 2024. Se seleccionaron específicamente los contratos liquidados, con el propósito de identificar posibles riesgos, emitir recomendaciones y proponer mejoras que contribuyan a optimizar las operaciones de la Corporación. Para evaluar el cumplimiento de la obligación de siembra, se requiere que cada contratista registre un ticket de siembra en el aplicativo 'SEMBRATÓN'. Este ticket debe incluir información detallada, como las coordenadas geográficas de la siembra, hectáreas plantadas, fecha del evento, municipio, participantes, número total de árboles sembrados y los nombres común y científico de las especies, con el fin de validar el cumplimiento de la obligación contractual.

Se gestionó con la persona encargada del aplicativo la remisión de la base de datos correspondiente al periodo 2021-2024. Esta base de datos incluye la información de los tickets de siembra mencionados, complementada con el número del contrato asociado a cada registro.

Posteriormente, se realizó un cruce de información entre los contratos y convenios seleccionados en la muestra y aquellos registrados en el aplicativo. Este análisis permitió identificar cuáles contratos cumplían o no con el registro del ticket de siembra, lo que sirvió como base para la evaluación del cumplimiento.

4.2 Especies de estudio

Con la base de datos se realizó un filtro con el fin de identificar cuáles eran las especies de árboles más sembradas por los contratos/convenios de la muestra; además se realizó una recopilación de los datos reportados en la literatura científica para identificar aquellas especies para las cuales se disponía de la mayor cantidad de información y que, además por sus características, podrían tener un mayor potencial de captura de carbono, así como otros beneficios ambientales. Con base a lo anterior se seleccionaron las siguientes especies para la estimación de captura de CO₂:

- *Quercus humboldtii* (Roble andino)
- *Cedrela odorata* (Cedro)
- *Tabebuia rosea* (Guayacan Rosado)
- *Jacaranda copaia* (Pavito)
- *Cordia alliodora* (Nogal cafetero)

Tabla 1
Breve descripción e imagen de las especies de estudio

Nombre científico	Nombre común	Imagen	Descripción
<i>Quercus humboldtii</i>	Roble andino		<p>Pertenece al grupo de las especies leñosas y destaca por los múltiples productos que proporciona, como madera, leña y carbón. Además, brinda importantes servicios ambientales y ecosistémicos, incluyendo la captura de carbono, la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y la protección de los suelos. Estas características han renovado su relevancia ecológica, reconociéndose su papel fundamental como un agente mitigador del cambio climático. (Andrés & Mario, 2010).</p>

Nota. Fuente <https://bit.ly/40nvQLc> (Cameron, 2017).

Tabebuia rosea Guayacan Rosado



Nota. Fuente <https://bit.ly/40ncV3r> (Estrella, 2018).

Se desarrolla a altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 1700 msnm. Es una especie de crecimiento moderado, con raíces profundas, melífera y que prospera en suelos húmedos con abundante luz solar. Este árbol es ideal para la conservación y recuperación de áreas degradadas con pendientes pronunciadas, ya que contribuye a controlar la erosión y mejora las condiciones del suelo. Además, su madera es altamente valorada en ebanistería para fabricar instrumentos y artículos decorativos (Universidad Autónoma de Colombia, 2008).

Jacaranda copaia Pavito



Nota. Fuente <https://colombia.inaturalist.org/photos/177047> (Monsalve, 2011).

Árbol de 20 a 35 metros de altura y alcanza diámetros de hasta 100 cm. Es común en los bosques secundarios con abundante regeneración natural. Los árboles de esta especie presentan un crecimiento rápido en sitios abiertos, por lo que pueden emplearse para recuperar ecosistemas degradados. La decocción de las hojas tiene uso medicinal (Montero et al., 2015).

Cedrela odorata Cedro



Nota. Fuente <https://bit.ly/3WkL6as> ((Ecos del Bosque, 2019).

Árbol caducifolio de 20 hasta 42 metros de altura, y de diámetro promedio de 60-90 cm a la altura del pecho. Es un árbol de tamaño mediano a grande que varía mucho de acuerdo con las condiciones ambientales. Es una de las especies más apreciadas por los pobladores de la región por su valor económico y comercial por su valor económico y comercial. Es un árbol que mejora la fertilidad del suelo y se usa en la recuperación de terrenos degradados (Montero et al., 2015).

Cordia alliodora Nogal Cafetero



Nota. Fuente <https://bit.ly/4hj0NXI> (Arce, s. f.).

Cordia alliodora es un árbol caducifolio de gran importancia ecológica y económica, especialmente en la formación del bosque seco tropical en Colombia. Esta especie es valorada por múltiples razones: su abundante capacidad de repoblación natural, la provisión de sombra para cultivos, su eficiente autopoda y su contribución al reciclaje de nutrientes en el suelo. Además, tiene un rápido crecimiento y ofrece un recurso maderable valioso. También representa un ingreso económico alternativo en periodos de baja producción o precios del café. (Montero et al., 2015).

4.3 Estimación del potencial de captura de carbono

Para la estimación del carbono capturado, se realizó una revisión de estudios científicos y de información forestal, esto con el fin de recopilar modelos alométricos específicos para las especies de estudio y para la región del departamento de Antioquia. Entre las fuentes consultadas se destacan:

- Cárdenas y Fundación Natura (2013), quienes realizaron una recopilación de información clave sobre biomasa y crecimiento de 184 especies nativas en Colombia.
- Giraldo et al. (2012), quienes aportaron bases técnicas relacionadas al desarrollo forestal, a partir del seguimiento, valoración y domesticación de especies forestales priorizadas de alto interés económico y ambiental en el departamento del Guaviare.
- Melo (2011), que analizó el carbono capturado y la acumulación de biomasa en cinco especies leñosas nativas utilizadas en programas de restauración ecológica en la sabana de Bogotá.
- Álvarez et al. (2012), cuyo trabajo estableció ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia, proporcionando una herramienta fundamental para calcular las existencias de carbono.

Se eligieron aquellos modelos o ecuaciones que contaban con un valor de R² mayor al 0,85, con el fin de que las estimaciones tuvieran la menor incertidumbre posible. Los modelos utilizados se detallan a continuación:

Tabla 2
Ecuaciones alométricas utilizadas para cada especie

Especie	Ecuación alométrica	R ²	Fuente
<i>Quercus humboldtii</i>	BT= -613,704 + 959,761*edad- 4,36255*edad ²	0,97	Melo, 2011
<i>Tabebuia rosea</i>	BT= 51,757*e ^(0,0652*edad)	0,85	Giraldo et al., 2012
<i>Cordia alliodora</i>	BT= e ^(6,9 - 78,7/edad)	0,95	Ortiz et al., 2008
<i>Cedrela odorata</i>	DAP= 43,02/(1+edad ^(-t-10,11) /1,61))	0,43	Yamada & Gholz, 2002
	Ln (BT)= -1.9084 + 2.37Ln (DAP)	0,92	Alvarez et al., 2012
<i>Jacaranda copaia</i>	BT= 151,36* e ^(0,0487*edad)	0,91	Giraldo et al., 2012

BT: Biomasa total (kg/árbol), DAP: Diámetro a la altura del pecho(cm), edad: edad del árbol (años).

En el presente estudio, el carbono almacenado se calculó asumiendo que el contenido de carbono es del 47% de la biomasa total, valor adoptado siguiendo la recomendación del IPCC (2006) para bosques tropicales (Martin & Thomas, 2011), que se encuentra dentro del rango de otras estimaciones (Lugo & Brown, 1992, Barbosa & Fearnside, 1996, Djomo et al., 2010). En este estudio, se asumió que los árboles tienen aproximadamente dos años de vida, ya que este es el tiempo transcurrido desde la siembra de las especies en los contratos de CORANTIOQUIA hasta la fecha de realización de la evaluación. Este valor fue adoptado con base en el registro de siembras realizadas en el aplicativo “SEMBRATÓN” y en la información disponible sobre las fechas de siembra. De esta manera, se considera que los árboles en estudio han alcanzado un desarrollo inicial, lo cual es relevante para calcular su biomasa y el carbono almacenado.

Por tanto, para la estimación del contenido de carbono almacenado se usó la ecuación:

$$CC = BT \times 0,47$$

Donde:

- **CC**: Carbono contenido (kg/árbol)
- **BT**: Biomasa total (kg/árbol)

El carbono total de la biomasa de los árboles está directamente relacionado con el CO₂. Según las directrices del IPCC (2006), el valor del carbono almacenado por cada árbol (Toneladas) debe multiplicarse por 3,67, que representa la diferencia de pesos atómicos del C y el CO₂, para cuantificar el secuestro de CO₂ de cada árbol. Por tanto, el almacenamiento de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) viene dado por la ecuación:

$$CO_{2eq} = CC \times 3,67$$

Donde:

- **CO_{2eq}**: Dióxido de carbono equivalente (kg/árbol)
- **CC**: Carbono contenido (kg/árbol)

Finalmente, el CO_{2eq} fue multiplicado por el número de árboles de cada especie para encontrar el CO_{2eq} total capturado.

4.4 Valoración económica del carbono capturado

Para realizar la valoración económica del carbono capturado, se realizó la multiplicación del valor total de CO₂ equivalente (CO_{2eq}), obtenido previamente, por el precio de la tonelada de carbono establecido en tres mecanismos o mercados de carbono. Estos mecanismos seleccionados fueron los siguientes:

1. El impuesto colombiano al carbono, reglamentado por la Ley 1819 de 2016, con un valor en 2023 de \$25.800 por tonelada de CO_{2eq}. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).
2. El Spanish FES-CO₂, que establece un precio promedio de 9,7 € por tonelada de CO_{2eq}. (Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino, 2011)

3. El RGGI CO₂ Offset Mechanism, una iniciativa de los estados del este de Estados Unidos, el cual establece un precio promedio de US\$5 por tonelada de CO_{2eq} (RGGI, 2023).

La valoración económica del dióxido de carbono capturado, por tanto, se calculó usando la siguiente ecuación:

$$V = CO_{2eq} \times P$$

Donde:

- **V**: Valoración económica del carbono capturado (unidad monetaria).
- **CO_{2eq}**: Dióxido de carbono capturado (tCO_{2eq}).
- **P**: Precio según mecanismo o mercado de carbono (\$/tCO_{2eq}).

Limitaciones

Dado que no se disponía de mediciones directas de los árboles sembrados, la metodología seleccionada se basó en información secundaria recopilada mediante una búsqueda exhaustiva de la literatura científica, recopilación de información forestal y el uso de modelos alométricos. Esta aproximación permitirá estimar de manera aproximada el potencial de captura de carbono, aunque no representa una medición exacta. La estimación del valor económico del carbono capturado también se basó en precios de referencia de mercados de carbono, lo que podría estar sujeto a fluctuaciones futuras. Estos datos de referencia pueden ser ajustados con cifras más precisas, conforme recolección de información en campo.

5. Análisis de resultados

5.1 Evaluación del cumplimiento de la obligación contractual

De acuerdo con la auditoría desarrollada, se identificaron deficiencias en el cumplimiento de la obligación de siembra de árboles establecida en los contratos revisados. Debido a lo anterior se consolidó en el Informe Final de la Auditoría, la Observación N°4, la cual se detalla a continuación:

OBSERVACIÓN N°4 Obligación contractual, sobre la siembra de árboles.

- Condición:

Verificada la obligación contractual relacionada con “(...) sembrar un árbol (superior a 35 cm de alto) de especies nativas (...)”, se identificaron las siguientes situaciones:

- Al realizar una revisión de 9 contratos/convenios liquidados, se evidenció que no se realizó la siembra de 240 árboles, consecuentes en su mayoría con las adiciones de recursos realizadas a los contratos. Lo anterior se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3

Contratos con observación debido al incumplimiento de la obligación

Número de contrato/convenio	Monto	Adiciones presupuestales	Total	Árboles por sembrar	Árboles sembrados según sembratón	Por sembrar
X90-CNT2301-XX	\$45.514.000	\$22.757.000	\$68.271.000	68	46	22
X90-CNT2301-XX	\$45.514.000	\$22.757.000	\$60.902.067	60	45	15
X90-CNT2301-XX	\$45.514.000	\$22.757.000	\$68.271.000	68	45	23
X90-CNT2301-XX	\$54.161.660	\$27.080.830	\$81.242.490	81	55	26
XX0-CNT2301-XX	\$38.500.000	\$11.733.333	\$50.233.333	50	38	12
X90-CNT2302-XX	\$45.514.000	\$22.757.000	\$68.271.000	68	45	23
X90-CNT2302-XX	\$45.514.000	\$22.757.000	\$68.271.000	68	60	8
X90-CNT2303-XX	\$45.514.000	\$13.004.000	\$58.518.000	58	45	13
X40-CNT2306-XX	\$733.545.821	\$365.063.014	\$1.098.608.835	1098	1000	98
Totales				1619	1379	240

Lo anterior sugiere una falta de control adecuado durante el proceso de supervisión, especialmente con las modificaciones presupuestales, las cuales debieron ser tenidas en cuenta para el número de árboles que se debían sembrar.

b) Al realizar un cruce entre 164 contratos liquidados durante la vigencia 2023-2024 y el aplicativo “SEMBRATÓN”, se detectó que tres (3) convenios/contratos no presentaron evidencia documental (ticket de siembra) en el expediente del E-Sirena ni en el aplicativo en mención, sobre el cumplimiento de esta obligación; no obstante, los contratos ejecutaron parcialmente recursos y fueron liquidados por la respectiva supervisión. A continuación, se detallan cada uno de los convenios/contratos con su observación:

Tabla 4

Contratos con observación sin evidencia de ticket de siembra

Contrato	Observación	Número de árboles a sembrar
XX0-CNT2305-XXX	En el informe final de ejecución de la supervisión con radicado 040-IT2312-21085 se deja claro que el contratista no dio cumplimiento con la siembra. Se desembolsaron \$28.125.000.	28
XX0-CNT2312-XXX	En el acta de cierre del contrato con radicado 190-ACT2408-3063 se deja constancia que el contratista no envió evidencia de la obligación contractual de siembra de cuatro (4) árboles y su respectivo mantenimiento, pese a los llamados que se realizaron en forma telefónica, mediante correos electrónicos, mensajes de WhatsApp. Se desembolsaron \$4.334.666.	4
XX0-CNT2402-XX	En el acta de cierre del contrato con radicado 140-ACT2407-2470 se deja constancia que esta obligación no se pudo cumplir, dado que, a la fecha de presentar el oficio de terminación anticipada del contrato, esta no se había realizado. A pesar de haber realizado un desembolso de \$8.160.133.	8

- Criterio

Guía para el ejercicio de las funciones de supervisión e interventoría de los contratos suscritos por las Entidades Estatales Colombia Compra Eficiente

<https://www.colombiacompra.gov.co/manuales-guias-y-pleigos-tipo/manuales-y-guias>

Manual de supervisión e interventoría Código: M-PGC-01, versión: 10, numeral 6.12 “Elaboración de informes y actas”

Instructivo del Manual de supervisión e Interventoría

Minutas contractuales convenios/contratos referenciados en la observación.

Memorando 120-MEM2402-898.

- Causa

Debilidades en el control de la supervisión para la exigencia de la obligación relacionada con la siembra, la cual puede darse desde el inicio del contrato/convenio y/o frente al desembolso de recursos u otrosí de adición; materializando un posible riesgo de Incumplimiento del contratista/conveniente frente a esta obligación.

- Efecto

Ejecución de actividades sin la debida compensación ambiental y fortalecimiento de los corredores ecológicos correspondiente a los recursos ejecutados.

- Recomendación

Se recomienda que la supervisión enfatice en la necesidad de la siembra en los primeros períodos de ejecución o conforme se van realizando los desembolsos; así mismo, revisar exhaustivamente sobre las siembras cuando se adicionan recursos.

Para un mejor seguimiento se recomienda asociar el ticket de la siembra con el número del contrato/convenio en el aplicativo “SEMBRATÓN”.

5.2 Estimación del potencial de captura de carbono

Con ocasión de la auditoría, se presentó una generación de valor durante la etapa de ejecución relacionada a la estimación de los beneficios de la obligación contractual de siembra de árboles nativos.

Se aplicaron diferentes pruebas de auditoría sobre los contratos/convenios suscritos y liquidados en el periodo comprendido entre el 01/01/2023 hasta 30/08/2024, en lo relacionado con la obligación contractual de “(...) sembrar un árbol (superior a 35 cm de alto) de especies nativas (...)” dicha información fue objeto de procesamiento realizando una estimación de la biomasa total y cálculo del potencial de captura en carbono; todo lo anterior, a través de una categorización de las especies con mayor participación de siembra según el aplicativo “SEMBRATÓN”.

Como resultado de lo anterior, una vez aplicados los modelos y ecuaciones alométricas se logró determinar los siguientes beneficios como contribución a la reducción de Gases de Efecto Invernadero en armonía con la meta del ODS 13 concerniente a “incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes” (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

La muestra consistió en un total 164 contratos/convenios liquidados durante 2023 y 2024, en los que se sembraron un total de 25.039 árboles de 118 especies distintas. Las especies más sembradas se describen a continuación:

Tabla 5

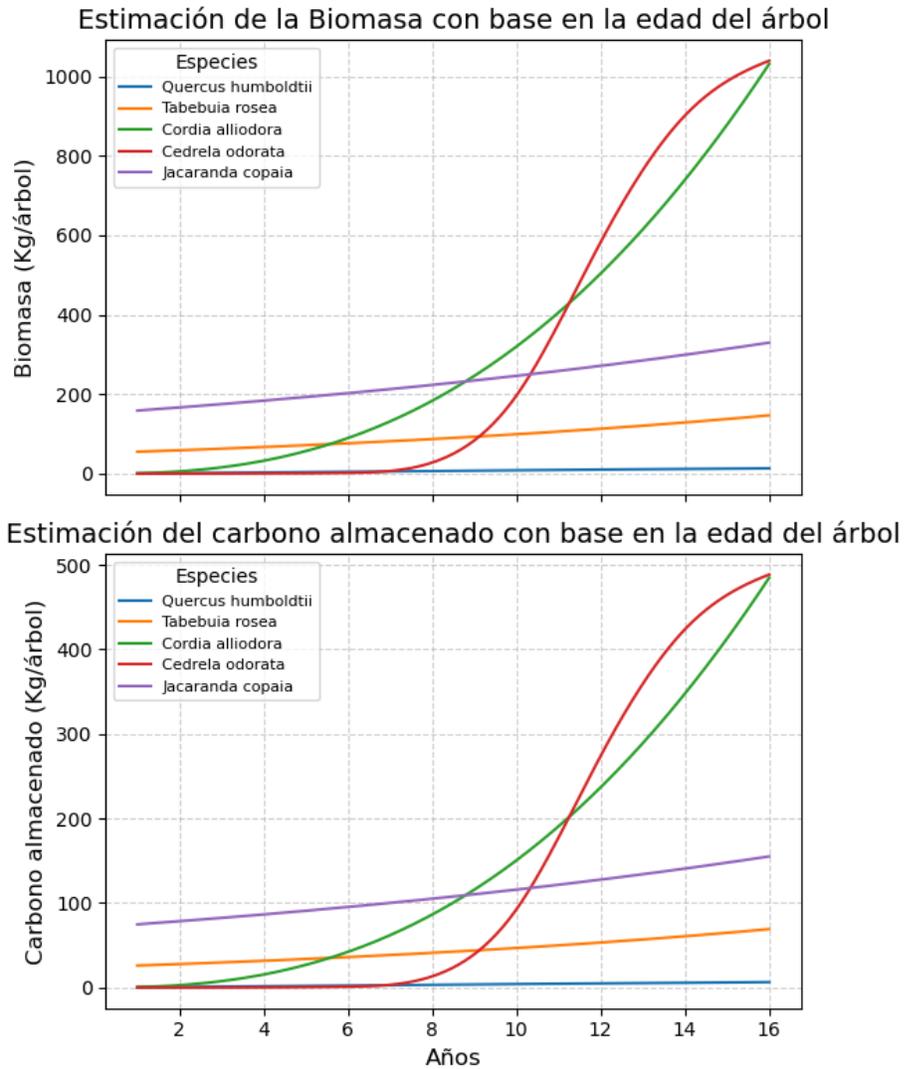
Especies con mayor número de árboles sembrados

Nombre científico	Nombre común	Sembrados	Hectáreas sembradas
<i>Quercus humboldtii</i>	Roble andino	2011	4,022
<i>Tabebuia rosea</i>	Guayacán Rosado	1756	3,512
<i>Jacaranda copaia</i>	Pavito	1408	2,816
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	1314	2,628
<i>Handroanthus Chrysanthus</i>	Guayacán Amarillo	666	1,332
<i>Cordia alliodora</i>	Nogal Cafetero	650	1,3
<i>Inga Sp</i>	Guamo	631	1,262
	Total		16,872

De acuerdo con los resultados de la **Tabla 5**, las especies con el mayor número de árboles sembrados fueron las especies *Quercus humboldtii*, *Tabebuia rosea* y *Cedrela odorata*, con un 8,03%, 7,01% y 5,62% del total de árboles sembrados, respectivamente. Esto indica cierta preferencia por estas especies por los contratistas/convenientes para la reforestación de la región. Sin embargo, aunque algunas especies dominan, la presencia de 118 especies diferentes indica un esfuerzo por promover la diversidad biológica, esto sugiere un potencial para mejorar la calidad del suelo, la regulación hídrica y la biodiversidad. Además, estas plantaciones cubren un área total de 16.87ha, lo que representa una contribución significativa a la restauración forestal.

Figura 1

Estimación de la biomasa y carbono almacenado con base en la edad del árbol



La **Figura 1** muestra un crecimiento en la biomasa de todas las especies a lo largo del tiempo, pero con diferentes ritmos y patrones. Las especies como *Cedrela odorata* y *Cordia alliodora*, presentan un crecimiento rápido y continuo, lo que las posiciona como candidatas ideales para proyectos de reforestación y en los que se requieran impactos visibles en el menor tiempo posible.

Por otro lado, la especie *Quercus humboldtii* presenta un crecimiento lento y constante, casi de manera lineal, lo que puede resultar útil en ecosistemas donde se prioriza la restauración ecológica y la sostenibilidad a largo plazo. En este sentido, estudios previos han resaltado el

potencial de captura de carbono de esta especie en proyectos de restauración. Por ejemplo, el estudio de Melo (2011) muestra cómo esta especie, junto con otras nativas, contribuye significativamente a la acumulación de biomasa y captura de carbono en programas de restauración ecológica en la Sabana de Bogotá. Además, Mendoza-Páez et al. (2024), es su estudio “*Trends in planted native tree biomass established in a tropical Andes city water basin*”, destacan que, aunque *Quercus humboldtii* es una especie de crecimiento lento, su potencial para iniciativas de secuestro de carbono a largo plazo es considerable, lo que la hace adecuada para proyectos de restauración en las cuencas hidrográficas de los Andes tropicales.

Realizando el análisis a largo plazo, las especies *Cordia alliodora* y *Cedrela odorata* alcanzan las mayores cantidades de carbono acumulado, alcanzando casi los 500 kg por cada árbol para el año 16. Estas dos especies muestran un punto de inflexión alrededor del año 8 de vida, en donde su tasa de acumulación de carbono se acelera significativamente. Lo anterior sugiere que estas especies pueden ser especialmente importantes para la captura de carbono atmosférico.

Tabla 6

Estimación del CO₂ capturado para las especies de estudio, al año dos de vida

Especie	No. de árboles	Biomasa Total (kg/árbol)	Biomasa Total (t/árbol)	Carbono almacenado (kg)	CO ₂ capturado (kgCO ₂ eq)	CO ₂ capturado (tCO ₂ eq)
<i>Quercus humboldtii</i>	2.011	1,29	0,00129	1.217,73	4.465,40	4,47
<i>Tabebuia rosea</i>	1.756	58,97	0,05897	48.665,10	178.454,91	178,45
<i>Cordia alliodora</i>	1.408	5,82	0,00582	3.851,44	14.123,22	14,12
<i>Cedrela odorata</i>	1.314	0,01	0,00001	4,39	16,09	0,02
<i>Jacaranda copaia</i>	650	166,84	0,16684	50.970,94	186.910,43	186,91
Total	7.139	232,92	0,233	104.709,58	383.970,05	383,97

De acuerdo con la **Tabla 6** las diferentes especies muestran una gran variación en su capacidad de capturar carbono, incluso teniendo un número similar de individuos. Lo anterior sugiere que la elección de especies es crucial para maximizar la captura de carbono. Consecuente con lo mencionado en la **Figura 1**, las especies *Tabebuia rosea* y *Jacaranda copaia* destacan por su alta capacidad de capturar carbono por individuo, lo que las convierte en especies prometedoras para proyectos de secuestro de carbono.

Estos resultados permiten identificar aquellas especies con mayor potencial de captura de CO₂ en un período determinado, siendo esta información valiosa para la corporación al momento de plantear la obligación contractual. Además, al conocer las tasas de crecimiento y la capacidad de almacenamiento de carbono de cada especie, es posible diseñar estrategias de restauración más eficientes. Por ejemplo, se pueden establecer mezclas de especies que permitan una acumulación de carbono rápida, sostenida a lo largo del tiempo y que además generen impactos positivos en el ecosistema.

Estas cifras evidencian el potencial que tienen los bosques naturales para remover el carbono de la atmósfera, y podrían servir como una base para promover proyectos de restauración para Gobiernos, Corporaciones Autónomas Regionales y para los tomadores de decisiones en general. Simon L. Lewis, Charlotte E. Wheeler (2019), en su artículo llamado “Restaurar los bosques naturales es la mejor manera de eliminar el carbono atmosférico”, plantean cuatro vías para cumplir con los compromisos climáticos mundiales: en primer lugar, argumentan, que cada 8,6 Mha de bosque regenerado capturan 1 Pg de C (1Pg C=1×10¹⁵ g de carbono) de aquí a 2100. Debido a lo anterior los países deberían aumentar la proporción de tierras regeneradas a bosques naturales.

En segundo lugar, es fundamental priorizar la regeneración natural en áreas de trópicos húmedos como la Amazonia, Borneo o la cuenca del Congo, las cuales albergan bosques con una biomasa significativamente mayor en comparación con regiones más áridas. La implementación de pagos internacionales destinados a restaurar y conservar nuevos bosques, financiados a través de mecanismos de captura de carbono, adaptación climática o conservación, podría impulsar acciones concretas en este sentido (Lewis et al., 2019)

En tercer lugar, es esencial maximizar el uso de las reservas de carbono existentes. Esto implica fomentar la regeneración natural en bosques degradados y áreas parcialmente arboladas, establecer plantaciones y sistemas agroforestales en regiones desprovistas de árboles y, siempre que sea posible, priorizar la agroforestería como alternativa a las plantaciones tradicionales. En cuarto lugar, es fundamental garantizar la protección del bosque natural una vez restaurado. Esto podría lograrse mediante la ampliación de áreas protegidas, el reconocimiento de derechos de

propiedad a comunidades indígenas que cuidan las tierras forestales, la modificación de normativas legales para restringir la conversión de estas áreas a usos agrícolas, o incentivando a las empresas de materias primas a comprometerse a preservar los bosques naturales restaurados (Lewis et al., 2019).

Aunque todas las ecuaciones alométricas utilizadas tienen asociado un valor de R^2 entre 0,85 y 0,97, y que son ecuaciones desarrolladas específicamente para la región y las especies de interés, es importante mencionar que estas estimaciones al basarse en estas ecuaciones y no en información primaria, tienen asociado una incertidumbre propia de errores de medición, diferentes condiciones ambientales como la calidad del suelo, humedad, temperatura, precipitación, así como la densidad de la muestra que puede conducir a estimaciones sesgadas. Debido a lo anterior es importante fortalecer este tipo de estudios con una validación de los modelos con el fin de comparar las estimaciones con los datos de biomasa y carbono capturado medidos directamente.

5.3 Valoración económica del carbono capturado

Tabla 7

Valoración económica del CO₂ capturado, basado en mercados de carbono

Espece	CO ₂ capturado (t)	Impuesto en Colombia (\$25,800/tCO _{2eq})	Spanish FES-CO ₂ (9.7 €/tCO _{2eq})	RGGI CO ₂ Offset Mechanism (US \$5/tCO _{2eq})
<i>Quercus humboldtii</i>	4,47	115.207,41	43,31	22,33
<i>Tabebuia rosea</i>	178,45	4.604.136,70	1731,01	892,27
<i>Cordia alliodora</i>	14,12	364.378,99	137,00	70,62
<i>Cedrela odorata</i>	0,02	415,15	0,16	0,08
<i>Jacaranda copaia</i>	186,91	4.822.288,98	1813,03	934,55
Total	383,97	\$ 9.906.427,22	3.724,51 €	\$1.919,85

La **Tabla 7** muestra que la aplicación del precio del Spanish FES-CO₂ genera el valor más alto entre los tres mecanismos analizados con un total de 3.724,51 € (aproximadamente COP \$16.613.549,31, con el precio del euro a \$4.429,32 a diciembre de 2024). Las especies *Jacaranda copaia* y *Tabebuia rosea* representan el 95,15% de este total, reafirmando su relevancia en términos económicos. Por otro lado, la valoración mediante el RGGI CO₂ Offset Mechanism representa un mercado menos lucrativo en comparación con los otros dos y las especies con menor

captura, como *Cedrela odorata*, tienen un aporte económico casi insignificante (0,08 USD). Esta diferencia en los valores obtenidos entre los mecanismos pone de manifiesto las disparidades en los precios de carbono a nivel internacional y la necesidad de armonización para incentivar proyectos ambientales.

Las 7.139 especies seleccionadas dieron como resultado un potencial de captura de CO₂ considerable (383,97 tCO_{2eq}). El costo ambiental asociado al beneficio ambiental representa el valor económico de los servicios ecosistémicos proporcionados por estas especies al capturar CO₂, lo que subraya la importancia de considerar no solo los beneficios ambientales, sino también económicos asociados a la conservación y restauración de ecosistemas. Dicha valoración puede servir como herramienta para justificar la obligación de la siembra, así como para inversiones en proyectos de restauración, demostrando su viabilidad financiera a largo plazo.

Adicionalmente, se debe considerar los siguientes beneficios a la sostenibilidad:

- Mejora de la biodiversidad en la región, proporcionando hábitats para especies locales.
- Mejora en la estructura y fertilidad del suelo, así como en la regulación hídrica.
- Potencial de valorización económica a través de bonos de carbono, lo cual podría ser reinvertido en la sostenibilidad del proyecto de “SEMBRATÓN”.
- Contribución a la conectividad de los corredores ecológicos.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se identificaron deficiencias en la siembra de árboles, especialmente en contratos con adiciones presupuestales, donde no se sembraron un total de 240 árboles, lo cual refleja una falta de control en la supervisión del cumplimiento de la obligación. Se destacan dos contratos, con un incumplimiento significativo, alcanzando un 36% y 9%, respectivamente. Además, tres contratos no presentaron evidencia documental sobre la siembra de los árboles, lo que pone de manifiesto debilidades y seguimiento de la supervisión. Se recomienda un énfasis en la exigencia de siembra durante los primeros períodos de ejecución y en la verificación del cumplimiento con cada desembolso de recursos, especialmente cuando se realizan adiciones presupuestales y temporales. Es fundamental asociar el ticket de siembra con el número del contrato en el aplicativo “SEMBRATÓN” para un seguimiento más efectivo.

A partir de la siembra de 7.139 árboles de las especies seleccionadas para el estudio, se calculó el potencial de captura de carbono por medio de modelos alométricos, para un total de 383,97 tCO_{2eq} capturado en el segundo año de vida. Algunas especies clave para la captura, en el corto plazo, de CO₂ fueron identificadas, como *Tabebuia rosea* (Guayacán rosado) y *Jacaranda copaia* (Pavito) con hasta 186,91 tCO_{2eq} y 178,45 tCO_{2eq} respectivamente, capturado en para el segundo año de vida. Estas especies presentan un crecimiento rápido y son aptas para proyectos con impacto en el corto plazo, lo que también se ve reflejado en la valoración económica siendo que estas dos especies representan más del 95% de los ingresos potenciales bajo cualquier mecanismo utilizado. Por otro lado, especies como *Quercus humboldtii* (Roble andino) muestran un crecimiento más lento, siendo útiles para la restauración y captura de carbono en el largo plazo. Lo anterior demuestra la gran contribución de la iniciativa de siembra de árboles de CORANTIOQUIA para la mitigación del cambio climático y la restauración de ecosistemas.

En cuanto a los mecanismos de valoración económica el mercado Spanish FES-CO₂ ofrece la mejor valoración, alcanzando una cifra que asciende a aproximadamente COP \$16.613.549,31, obtenido de las 383,97 tCO_{2eq} anteriormente mencionadas. Estos valores evidencian el potencial de los bosques naturales y de los árboles nativos para la remoción de carbono atmosférico y como la implementación de pagos internacionales destinados a restaurar y conservar nuevos bosques,

financiados a través de mecanismos de captura de carbono, adaptación climática o conservación, podría impulsar acciones concretas en este sentido. Se recomienda, por tanto, utilizar la estimación del carbono capturado en términos de bonos de carbono como una herramienta para financiar proyectos de reforestación y restauración ecológica, aprovechando los mercados internacionales.

Por último, se resalta que, aunque las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono almacenado tienen un alto grado de precisión para las especies de estudio (R^2 entre 0,85 y 0,97), hay diversos factores que generan incertidumbres en las estimaciones, como las condiciones ambientales (calidad del suelo, clima, temperatura, precipitación, etc.) y los errores en la medición, lo que puede llevar a estimaciones sesgadas. Dado lo anterior, se recomienda realizar una validación de estos modelos con datos medidos directamente con el fin de reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de las estimaciones para trabajos futuros.

Referencias

- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., De las Salas, G., Del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology And Management*, 267, 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Andrés, A. M., & Mario, C. C. L. (2010). *CONSERVACIÓN y USO SOSTENIBLE DE LOS BOSQUES DE ROBLE EN EL CORREDOR DE CONSERVACIÓN GUANTIVA - LA RUSIA - IGUAQUE, DEPARTAMENTOS DE SANTANDER y BOYACÁ, COLOMBIA*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392010000100002&lng=en&nrm=iso
- Arce, A. (s. f.). *Cordia alliodora*. <https://www.tananeos.org/post/canaletico-cordia-alliodora>.
- Arcos-LeBert, G., Aravena-Hidalgo, T., Figueroa, J. A., Jaksic, F. M., & Castro, S. A. (2021). Native trees provide more benefits than exotic trees when ecosystem services are weighted in Santiago, Chile. *Trees*, 35(5), 1663-1672. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02144-5>.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. (2023). Valores de referencia de carbono almacenado en coberturas de la Tierra y su valoración económica. <https://www.anla.gov.co/images/documentos/manuales/2024-03-14-anlaVRPCA-areas-lic-ANLA.pdf>.
- Barbosa, R. I., & Fearnside, P. M. (1996). Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of aboveground carbon. *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, 101(D20), 25847-25857. <https://doi.org/10.1029/96jd02090>.
- Cameron, R. (2017). *Quercus humboldtii in Bogotá*. <https://www.internationaloaksociety.org/content/quercus-humboldtii-bogot%C3%A1>
- Cárdenas, L. & Fundación Natura. (2023). *Biomasa y crecimiento de especies forestales nativas. Revisión de información disponible para Colombia*. <https://natura.org.co/publicaciones/cartilla-biomasa-crecimiento-especies-forestales-nativas/>
- Cohen, B., Cowie, A., Babiker, M., Leip, A., & Smith, P. (2021). Co-benefits and trade-offs of climate change mitigation actions and the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production And Consumption*, 26, 805-813. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.034>.
- CORANTIOQUIA. (2019). PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL REGIONAL 2020-2031 DE CORANTIOQUIA. <https://www.corantioquia.gov.co/wpcontent/uploads/2022/01/PGAR-2020-2031.pdf>.

- Djomo, A. N., Ibrahima, A., Saborowski, J., & Gravenhorst, G. (2010). Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology And Management*, 260(10), 1873-1885. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.034>.
- Ecos del Bosque. (2019). *Cedrela odorata*. <https://ecosdelbosque.com/plantas/cedrela-odorata>.
- Erb, K., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., & Luyssaert, S. (2017). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553(7686), 73-76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>.
- Giraldo, B., Zubieta, M., Vargas, G., & Barrera, J. (2012). Bases técnicas para el desarrollo forestal en el departamento del Guaviare, Amazonia colombiana. <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/agroforesteria%20tomo%201%20baja.pdf>.
- Gonzalez-Sanchez, E. J., Veroz-Gonzalez, O., Conway, G., Moreno-Garcia, M., Kassam, A., Mkomwa, S., Ordoñez-Fernandez, R., Triviño-Tarradas, P., & Carbonell-Bojollo, R. (2019). Meta-analysis on carbon sequestration through Conservation Agriculture in Africa. *Soil And Tillage Research*, 190, 22- 30. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.020>.
- Guo, Y., Ren, Z., Wang, C., Zhang, P., Ma, Z., Hong, S., Hong, W., & He, X. (2024). Spatiotemporal patterns of urban forest carbon sequestration capacity: Implications for urban CO₂ emission mitigation during China's rapid urbanization. *The Science Of The Total Environment*, 912, 168781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168781>.
- Heinemann, N., Haszeldine, R. S., Shu, Y., Stewart, R. J., Scott, V., & Wilkinson, M. (2017). CO₂ sequestration with limited sealing capability: A new injection and storage strategy in the Pearl River Mouth Basin (China). *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, 68, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.009>.
- IPCC, (2022). Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa, Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- IUCN. (2021). Forests and climate change. International Union for Conservation of Nature.

-
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., & Barret, K. (2024). climate change 2023 Synthesis Report Summary for Policymakers. CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers.
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. A., & Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568(7750), 25-28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
- Lugo, A. E., & Brown, S. (1992). Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology And Management*, 54(1-4), 239-255. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90016-3).
- Martin, A. R., & Thomas, S. C. (2011). A Reassessment of Carbon Content in Tropical Trees. *PLoS ONE*, 6(8), e23533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>.
- Melo, O. (2011). Carbono capturado y acumulación de biomasa en cinco especies leñosas nativas de la cordillera oriental, utilizadas en programas de restauración ecológica en la sabana de Bogotá. <https://www.revistaaccb.org/r/index.php/accb/article/view/36>.
- Mendoza-Páez, J. S., Giraldo, J. A., Mazo-Lopera, M. A., Giraldo-Salazar, J. M., & Osorio-Vélez, L. F. (2024). Trends in planted native tree biomass established in a tropical Andes city water basin. *Restoration Ecology*. <https://doi.org/10.1111/rec.14296>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). LEY 1819 DE 2016. “Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones.” <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=79140>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Política nacional de cambio climático. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-PoliticaNacional-de-Cambio-Climatico.pdf>.
- Ministerio de medio ambiente, y medio rural y marino. España. (2011). Real decreto 1494/2011, de 24 de octubre, por el que se regula el Fondo de Carbono para una economía sostenible. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/fondo-carbono/RD_1494-2011_LES_tcm30-178687.pdf
- Monsalve, D. A. (2011). *Jacaranda Copaia*. NaturalistaCO. <https://colombia.inaturalist.org/photos/177047>.
- Montero M., M. y F. Montagnini. (2005). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 45:112-119. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6584469636>.

Montero, M., Barrera, J., Giraldo, B., & Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. (2015). *Fichas Técnicas de Especies de uso Forestal y Agroforestal de la Amazonia Colombiana*. <https://sinchi.org.co/fichas-tecnicas-de-especies-de-uso-forestal-y-agroforestal-de-la-amazonia-colombiana1>.

Nunes, L. J., Meireles, C. I., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. A. (2020). Forest Contribution to Climate Change Mitigation: Management Oriented to Carbon Capture and Storage. *Climate*, 8(2), 21. <https://doi.org/10.3390/cli8020021>.

Ortiz, A., Riascos, L., & Somarriba, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5764>.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.

Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). (2023). *Offset Protocol U.S. Forest Projects*. <https://www.rggi.org/program-overview-and-design/elements>

Richardson, D. M., & Potgieter, L. J. (2024). A living inventory of planted trees in South Africa derived from iNaturalist. *South African Journal Of Botany*, 173, 365- 379. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.08.006>.

Ripka de Almeida, Adriana, da Silva, Christian Luiz, & Hernández Santoyo, Alain. (2018). Métodos de valoración económica ambiental: instrumentos para el desarrollo de políticas ambientales. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(4), 246-255. Epub 02 de septiembre de 2018. Recuperado en 06 de octubre de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000400246&lng=es&tlng=es.

Schmidt A, M Poulain, D Klein, K Krause, K Peña-Rojas, H Schmidt, A Schulte. 2009. Allometric above-belowground biomass equations for *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) natural regeneration in the Chilean Patagonia. *Annals of Forest Sciences* 66: 513.

Soriano-Luna, M. Á., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49(4): 423- 438. <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2015/may-jun/art-6.pdf>.

Tomasini, D. (1995). Bases económicas para el manejo de los recursos naturales. En Anaya, M. y Díaz, F. (Eds.), *Memorias para el IV Curso sobre Desertificación y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe*. Montecillo, México: Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas.

-
- Universidad Autónoma de Colombia. (2008). *Caracterización de la vegetación y reforestación con árboles nativos del bosque seco tropical en el área del Parque Recreativo y Zoológico Piscilago (Nilo, Cundinamarca) Como una alternativa para la conservación de especies de fauna y flora silvestre*. https://www.ecosistemassecos.org/images/bibliografia/arboles_del_bosque.pdf.
- Van Soest, H. L., Elzen, M. G. J. D., & Van Vuuren, D. P. (2021). Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22294-x>.
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Wei, K., Shan, Y., Mi, Z., Costello, M. J., Grunwald, S., Feng, Z., Wang, F., Guo, Y., Wu, X., Kumar, P., KÄStner, M., Feng, X., Kang, S., Liu, Z., Fu, Y., Zhao, W., Ouyang, C., . . . Tiedje, J. M. (2023). Climate change: Strategies for mitigation and adaptation. *The Innovation Geoscience*, 1(1), 100015. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015>.
- Yamada, M., & Gholz, H. (2002). Growth and yield of some indigenous trees in an Amazonian agroforestry system: A rural-history-based analysis. *Agroforestry Systems*, 55(1), 17-26. <https://doi.org/10.1023/a:1020264814888>.
- Yao, R. T., & Wallace, L. (2024). A systematic review of non-market ecosystem service values for biosecurity protection. *Ecosystem Services*, 67, 101628. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101628>
- Yepes, A. et al. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia. Bogotá, Colombia: IDEAM.
- Yepes-Quintero, A., Duque-Montoya, Álvaro J., Navarrete-Encinales, D., Phillips-Bernal, J., Cabrera-Montenegro, E., Corrales-Osorio, A., Álvarez-Dávila, E., Galindo-García, G., García-Dávila, M. C., Idárraga, Álvaro, & Vargas-Galvis, D. (2017). Estimación de las reservas y pérdidas de carbono por deforestación en los bosques del departamento de Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(95), 193–208. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14306>.
- Zuluaga, L. Z., & Escobar, E. S. C. (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO₂ en un ecosistema de bosque seco tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Luna Azul*, 47, 1-20. <https://doi.org/10.17151/luaz.2018.47.1>.