



**Evaluación Del Potencial De Captura De Carbono Azul Del Bosque Manglar De La
Playa De Puerto Colombia Como Estrategia De Mitigación Del Cambio Climático**

Darwin David Rojano Blanco

Corporación Universitaria Reformada

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental.

Barranquilla-Atlántico

2026

**Evaluación De La Capacidad De Captura De Carbono Azul Del Bosque Manglar De
La Playa De Puerto Colombia Como Estrategia De Mitigación Del Cambio Climático**

Darwin David Rojano Blanco

**Investigación presentada como requisito para optar por el título de Ingeniero
Ambiental.**

Tutora:

Martha Alicia Mendoza Hernández

Cotutora:

Sofia Brisseth De Jesús Sulbaran Siado

Corporación Universitaria Reformada

Departamento de Ingeniería

Barranquilla – Atlántico

2026

Contenido

Resumen	11
Abstract.....	12
1. Introducción.....	13
2. Planteamiento del problema	16
3. Justificación	19
4. Objetivos.....	21
4.1. Objetivo General	21
4.2. Objetivos Específicos	21
5. Marco referencial.....	22
5.1. Estado Del Arte	23
5.2. Marco Legal	28
5.3. Marco teórico	31
5.3.1. Manglares	31
5.3.2. Dióxido de Carbono CO ₂	33
5.3.3. Carbono Azul (Blue Carbon).....	34
5.3.4. Almacenamiento de carbono en manglares	34
5.3.5. Biomasa aérea en manglares.....	35
5.3.6. Biomasa subterránea en manglares.....	36
5.3.7. Cambio Climático.....	36

6.	Metodología.....	38
6.1.	Enfoque y tipo de investigación	39
6.2.	Área de Estudio	39
6.3.	Población y Muestra.....	41
6.4.	Variables de Estudio.....	44
6.5.	Fases Metodológicas	45
6.5.1.	Fase 1. Delimitación y Caracterización Del Área	45
6.5.2.	Fase 2. Diseño y establecimiento de parcelas e Inventario Forestal	46
6.5.3.	Fase 3. Estimación de biomasa aérea	47
6.5.4.	Fase 4. Estimación del carbono almacenado	48
6.5.5.	Fase 5. Estimación del CO ₂ equivalente.....	48
6.5.6.	Fase 6. Análisis del aporte a la mitigación del cambio climático.....	48
6.6.	Procesamiento y Análisis de Datos	49
6.7.	Instrumentos y Equipos Utilizados	49
6.8.	Formatos de recolección en campo	50
7.	Resultados y Discusiones	51
7.1.	Cuantificación De La Biomasa Aérea Y Subterránea A Través De Modelos Alométricos	51
7.2.	Determinación del potencial total de captura de carbono azul del bosque manglar.....	60

7.3.	Análisis Del Aporte Del Bosque Manglar A La Mitigación Del Cambio Climático	
	64	
7.4.	Propuesta De Recomendaciones Para El Manejo Y Conservación Del Ecosistema	66
8.	Conclusiones.....	68
9.	Recomendaciones	70
10.	Bibliografía.....	72

Listado de Tablas

Tabla 1. Servicios ecosistémicos de los manglares	31
Tabla 2. Puntos centrales de monitoreo en la playa de Puerto Colombia.....	40
Tabla 3. Coordenadas de las parcelas de monitoreo en la playa de Puerto Colombia.	41
Tabla 4. Variables del Estudio.....	44
Tabla 5. Instrumentos y equipos utilizados.	49
Tabla 6. Inventario de la parcela MGPC01.	52
Tabla 7. Inventario de la parcela MGPC02.	52
Tabla 8. Inventario de la parcela MGPC03.	53
Tabla 9. Inventario de la parcela MGPC04.	54
Tabla 10. Calculo de Biomasa aérea y subterránea por parcela.	56
Tabla 11. Biomasa aérea y subterránea por especie	58
Tabla 12 Captura de carbono por parcela.	60
Tabla 13. Captura de carbono por especies	62
Tabla 14 Aportes del bosque manglar de Puerto Colombia a la mitigación del cambio climático	65

Listado de Gráficos

Gráfica 1. Biomasa aérea y subterránea por parcela 57

Gráfica 2 Biomasa aérea y subterránea por especie 58

Gráfica 3 Captura de carbono por parcela.....61

Gráfica 4 Captura de carbono por especie.....63

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1. Regulación de los Sistemas ecosistémicos por medio del manglar.	32
Ilustración 2. Captura de Carbono del Manglar.	35
Ilustración 3. Ubicación del área de estudio.	40
Ilustración 4. Diseño de parcelas.	42
Ilustración 5. Delimitación e instalaciones de parcelas.	43
Ilustración 6. Fases metodológicas aplicadas.	45
Ilustración 7. Delimitación y caracterización del área.	46
Ilustración 8. Diseño y establecimiento de parcelas e Inventario Forestal	47

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser mi guía, fortaleza y fuente de sabiduría a lo largo de este proceso académico, permitiéndome culminar esta satisfactoriamente esta importante etapa de mi vida.

A mis docentes, especialmente a mi querida profe Martha Mendoza quien con su conocimiento, dedicación y compromiso ha contribuido de manera significativa a mi formación profesional como una impronta que recordare siempre de manera muy especial.

A mis compañeros quienes se convirtieron en personas muy especiales en todo este proceso académico de altos y bajos en especial mi compañero de fórmula Esteban Cárcamo con quien he compartido momentos gratos de recordar.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente, siendo un pilar fundamental para alcanzar este logro que hoy permite convertirme en ingeniero.

DARWIN DAVID ROJANO BLANCO

Dedicatoria

Dios me ha concedido risas, lágrimas y oportunidades que me han hecho sentir profundamente privilegiado en esta vida; tanto así que, si volviera a nacer, no cambiaría mi historia por la de nadie. Por ello, dedico en primer lugar este trabajo a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la dicha de alcanzar este sueño.

A mi madre, quien, aunque ya no se encuentra físicamente, vive eternamente en mi memoria y en mi corazón. Sé que estaría profundamente orgullosa de este logro y de poder acompañarme en este momento tan significativo de mi vida.

A mi padre, a mis hermanos y a mis tías, con quienes Dios me premió y a quienes he visto como mis segundas madres; a toda mi familia, que, con su amor, apoyo y confianza en cada paso de este camino, ha sido la inspiración que hoy me ha permitido alcanzar este logro.

DARWIN DAVID ROJANO BLANCO

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia como estrategia de mitigación del cambio climático. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo utilizando técnicas de inventario forestal no destructivo y aplicación de modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea y subterránea. Para la recolección de información se establecieron parcelas de 10 m × 10 m distribuidas dentro del ecosistema manglar, donde se registraron variables dasométricas como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de los individuos y características ecológicas del sitio.

Los resultados evidenciaron diferencias en la capacidad de almacenamiento de carbono entre las parcelas evaluadas, destacándose la parcela MGPC02 por presentar los mayores valores de biomasa y carbono almacenado. La especie *Rizophora mangle* fue la de mayor representatividad y aporte ecológico dentro del ecosistema, registrando los valores más altos de biomasa y dióxido de carbono equivalente (CO₂e). De manera general, el bosque manglar evaluado demostró una importante capacidad para almacenar carbono azul y contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero, confirmando su relevancia ecológica en los procesos de mitigación del cambio climático y conservación ambiental en zonas costeras.

Palabras clave: carbono azul, manglar, biomasa, cambio climático, mitigación ambiental.

Abstract

This research aimed to evaluate the blue carbon sequestration potential of the mangrove forest on Puerto Colombia beach as a climate change mitigation strategy. The study was conducted using a quantitative approach with non-destructive forest inventory techniques and allometric models to estimate aboveground and belowground biomass. Data collection involved establishing 10 m × 10 m plots distributed within the mangrove ecosystem, where dendrometric variables such as diameter at breast height (DBH), individual height, and ecological characteristics of the site were recorded.

The results showed differences in carbon storage capacity among the evaluated plots, with plot MGPC02 standing out for having the highest biomass and stored carbon values. The species *Rhizophora mangle* was the most representative and ecologically significant within the ecosystem, registering the highest values for biomass and carbon dioxide equivalent (CO₂e). Overall, the evaluated mangrove forest demonstrated a significant capacity to store blue carbon and contribute to the reduction of greenhouse gases, confirming its ecological relevance in the processes of climate change mitigation and environmental conservation in coastal areas.

Keywords: blue carbon, mangrove, biomass, climate change, environmental mitigation.

1. Introducción

El cambio climático constituye uno de los desafíos ambientales, sociales y económicos más serios del siglo XXI, incluyendo su impacto en los ecosistemas, la biodiversidad y las poblaciones humanas.

El aumento continuo de las emisiones de gases de efecto invernadero en general y de CO₂, en particular, ha intensificado algunos eventos existentes como el aumento de la temperatura global, el aumento del nivel del mar y el cambio dinámico en los ciclos hidrológicos y ecológicos (ONU, 2022).

Los ecosistemas costeros han desarrollado una importancia estratégica en las políticas globales de mitigación del clima, especialmente aquellos que son capaces de atrapar cantidades significativas de carbono atmosférico en su biomasa y sedimentos (ecosistemas de carbono azul) (IPCC, 2023).

De estos ecosistemas, los manglares tienen la capacidad distintiva de capturar y almacenar carbono que supera a muchos ecosistemas terrestres. El manglar es muy importante para el ecosistema en la regulación del clima, la protección costera, la preservación de la biodiversidad y el apoyo a las actividades socioeconómicas locales. Pero, por críticos que sean los bosques, sufren un proceso vicioso de rápida deterioración debido a la expansión urbana, la contaminación, la alteración hidrológica y prácticas antropogénicas no solicitadas que deterioran y reducen la función ecológica de ellos y el potencial de secuestro de carbono (Daniel A. Friess, 2019).

Los manglares son ecosistemas prioritarios en toda Colombia para la adaptación y mitigación del cambio climático, especialmente en las regiones costeras del Caribe y el Pacífico, por ejemplo, el país ha avanzado en la identificación del carbono azul como un instrumento de monitoreo, reconocimiento y uso del carbono para la gestión ambiental y climática, y fomentando

más estudios para cuantificar las reservas de carbono en los ecosistemas marino-costeros (Narváez D, 2022). No obstante, persisten brechas técnicas y científicas en algunas partes de la costa caribeña colombiana, específicamente en ecosistemas intervenidos o poco estudiados, como los manglares que se encuentran en la playa de Puerto Colombia, Atlántico (INVEMAR, 2025).

La playa de Puerto Colombia es de importancia ambiental primaria ya que contiene bosques de manglares retenidos que tienen efectos ecológicos vitales en la vida costera y la absorción de carbono atmosférico, Sin embargo, históricamente han enfrentado desafíos derivados de las tensiones provocadas por la expansión urbana, el turismo, la mala gestión de residuos y el cambio ambiental característico de los ecosistemas costeros.

Esto plantea la cuestión de la capacidad de los manglares actuales para servir como un sumidero de carbono azul y de la acción bajo el desafío del cambio climático tanto a nivel local como regional. Por lo tanto, es necesario explorar la oportunidad de investigación para evaluar el potencial de captura de carbono azul de los bosques de manglares de la playa de Puerto Colombia utilizando métodos científicos estandarizados y modelos alométricos internacionalmente aceptados.

En relación con este tema, el objetivo de esta investigación es lograr el objetivo general de evaluar la capacidad de captura de carbono azul del bosque de manglares en la playa de Puerto Colombia para técnicas de mitigación del cambio climático. Los objetivos de esta investigación son cuantificar tanto la biomasa aérea como la subterránea con modelos alométricos; determinar el potencial total de captura de carbono azul del bosque de manglares bajo estudio; analizar la contribución que tiene el bosque de manglares a la mitigación del cambio climático y proporcionar recomendaciones para la gestión sostenible y conservación de este ecosistema bajo estas condiciones.

Los datos recopilados facilitarán el análisis para la determinación si ya existen cantidades significativas o pequeñas de reservas de carbono guardadas en el ecosistema que puedan ayudar en la eliminación de carbono para mitigar el cambio climático.

La tesis se encuentra estructurada por un primer capítulo representa la declaración del problema, el problema de investigación, la declaración de la pregunta de investigación, la pregunta de investigación, los objetivos, las metas y la justificación. El segundo capítulo elabora la base conceptual y el estado del arte, marco legal. La tercera sección está dedicada al marco metodológico (enfoque, diseño, técnicas, instrumentos para la recolección y análisis de datos). El cuarto capítulo describe los hallazgos y su discusión desde un punto de vista científico. En el quinto capítulo, se discuten y presentan las conclusiones y recomendaciones de este estudio, para la gestión y protección del ecosistema de manglares analizado, así como las implicaciones para la gestión y conservación.

2. Planteamiento del problema

La captura de carbono en ecosistemas costeros, particularmente en manglares, se presenta como una estrategia potencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que a su vez también contribuyen al cambio climático.

Sin embargo, la cantidad de carbono almacenado y su capacidad de ofrecer beneficios reales a nivel global aún son subestimadas debido a la falta de inventarios precisos y datos consistentes, lo que limita su incorporación en las políticas internacionales de reducción de emisiones. Aunque las áreas de manglares representan solo un 0.2% de las emisiones globales de CO₂, contribuyen con aproximadamente el 18% de las emisiones provenientes de los océanos tropicales costeros (Alongi D. M., 2020).

Frente a este escenario, los ecosistemas de carbono azul, particularmente los manglares, han adquirido una importancia estratégica debido a su elevada capacidad de captura y almacenamiento de carbono atmosférico tanto en su biomasa aérea y subterránea como en los sedimentos (INVEMAR, 2025).

Diversas investigaciones han demostrado que los manglares presentan tasas de secuestro de carbono considerablemente superiores a las de muchos ecosistemas terrestres, convirtiéndose en sumideros naturales fundamentales para la mitigación del cambio climático (Macreadie, 2019).

Asimismo, estos ecosistemas brindan servicios ecosistémicos esenciales relacionados con la protección costera, conservación de biodiversidad, regulación hidrológica y sostenimiento de actividades pesqueras y socioeconómicas en zonas litorales.

La acelerada pérdida de estos ecosistemas, por actividades humanas como la deforestación y el desarrollo costero, está reduciendo su capacidad de secuestrar carbono, además de liberar el carbono previamente almacenado, lo cual incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero. La ausencia de estrategias coordinadas, políticas eficaces y recursos destinados a mantener y ampliar su función sumideros naturales limita el potencial de estos ecosistemas como herramientas eficaces en la lucha contra el cambio climático a nivel global, regional y nacional.

Por ello, se hace urgente profundizar en el conocimiento, protección y recuperación de los manglares para reforzar su papel en la mitigación de los impactos del cambio climático, los ecosistemas de carbono azul tienen una capacidad de secuestro de carbono que puede ser entre 10 y 100 veces superior a la de los bosques terrestres por unidad de área, almacenando aproximadamente la mitad del carbono en los sistemas marinos, a pesar de representar solo una pequeña fracción de los ecosistemas terrestres (Costa & Macreadie., 2022).

Esta estadística resalta la importancia y eficiencia de los ecosistemas costeros en la captura de carbono, además de enfatizar la oportunidad y necesidad de su conservación para la mitigación del cambio climático.

En Colombia hay 16 especies de manglar identificadas de las cuales 11 se encuentran en el Pacífico y 5 en el Caribe (UNAL, 2023), a pesar de que en departamentos como Córdoba se conservan sectores con buenas condiciones de desarrollo estructural y alta diversidad de especies, el estado general de los manglares en Colombia muestra una tendencia preocupante, dado que la expansión de impactos antropogénicos y la sobreexplotación han reducido notablemente la extensión de estos ecosistemas, ya que en la región Caribe suman aproximadamente 88,000 hectáreas distribuidas desde el golfo de Urabá hasta la alta Guajira (García & castillo., 2018).

Esta situación evidencia la necesidad de evaluar el estado de conservación de estos manglares, promover su manejo sostenible y además evaluar qué tanto es su potencial de captura ante el escenario del cambio y climático. Para ello se plantea el siguiente interrogante:

¿Cómo contribuye el potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia a la mitigación del cambio climático en ecosistemas costeros del Caribe colombiano?

3. Justificación

La creciente preocupación mundial frente a los efectos del cambio climático ha impulsado la búsqueda de estrategias naturales capaces de contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas. En este contexto, los ecosistemas de manglar han adquirido una relevancia significativa debido a su alta capacidad de captura y almacenamiento de carbono azul, convirtiéndose en una de las soluciones basadas en la naturaleza más importantes para la mitigación climática.

No obstante, a pesar de los beneficios ambientales que ofrecen estos ecosistemas, la protección, manejo y gestión sostenible de los manglares aún se encuentra en etapas iniciales en muchas regiones del mundo, especialmente en zonas costeras sometidas a presión antrópica (Beers L, 2020).

La presente investigación surge ante la necesidad de generar información científica confiable sobre el potencial de captura de carbono azul del bosque manglar ubicado en la playa de Puerto Colombia, Atlántico, considerando que actualmente existen limitaciones en cuanto a estudios locales relacionados con biomasa aérea, biomasa subterránea y almacenamiento de carbono en ecosistemas costeros del Caribe colombiano. Esta ausencia de información técnica dificulta el fortalecimiento de estrategias de conservación, restauración y planificación ambiental basadas en evidencia científica, así como la incorporación de estos ecosistemas dentro de políticas climáticas y programas de mitigación ambiental a nivel regional y nacional.

En este sentido, la investigación no solo pretende constituirse como un diagnóstico ambiental del ecosistema manglar objeto de estudio, sino también como un aporte teórico, metodológico y científico que permita comprender la capacidad de captura y almacenamiento de carbono de estos ecosistemas costeros. Asimismo, busca resaltar el papel ecológico que

desempeñan los manglares como sumideros naturales de carbono y como ecosistemas estratégicos frente al escenario actual de cambio climático.

Este estudio reconoce la importancia ecológica de los manglares debido a los múltiples servicios ecosistémicos que proporcionan, entre ellos la regulación climática, la protección frente a procesos erosivos y eventos costeros extremos, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento del equilibrio ecológico en zonas litorales. La resiliencia natural de estos ecosistemas y su capacidad de adaptación frente a variaciones ambientales convierten a los manglares en elementos fundamentales dentro de las estrategias internacionales orientadas a soluciones basadas en la naturaleza para enfrentar el cambio climático.

De igual manera, la investigación adquiere relevancia por la conservación y manejo adecuado de estos ecosistemas no solo favorece la captura de carbono, sino que también contribuye al fortalecimiento de la calidad de los servicios ecosistémicos, beneficiando de manera directa las dinámicas ambientales, culturales y económicas de los territorios donde se encuentran presentes.

Por otra parte, los resultados obtenidos a partir de la cuantificación del potencial de captura de carbono azul permitirán establecer lineamientos técnicos y ambientales orientados al diseño de estrategias de conservación, manejo y restauración del ecosistema manglar de la playa de Puerto Colombia. La información generada podrá servir como soporte para la toma de decisiones por parte de entidades ambientales, investigadores y actores territoriales interesados en fortalecer acciones de mitigación y adaptación frente al cambio climático en ecosistemas costeros, con el fin de que se pueda dar un manejo adecuado y la conservación de los manglares incrementan su capacidad de captura y almacenamiento de carbono, además de proporcionar beneficios adicionales relacionados con la protección costera, la reducción de riesgos ambientales y la conservación de la biodiversidad (Macreadie, 2019).

4. Objetivos

4.1.Objetivo General

- Evaluar la capacidad de captura de carbono azul de la playa de puerto Colombia como estrategia de mitigación del cambio climático.

4.2.Objetivos Específicos

- Cuantificar la biomasa aérea y subterránea a través de modelos alométricos.
- Determinar el potencial total de captura de carbono azul del bosque manglar objeto de estudio.
- Analizar el aporte del bosque manglar a la mitigación del cambio climático.
- Proponer recomendaciones para el manejo y conservación del ecosistema.

5. Marco referencial

El presente marco referencial constituye la base conceptual, científica y normativa que orienta el desarrollo de la investigación, permitiendo comprender la relevancia de los ecosistemas de manglar dentro de las estrategias actuales de mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono azul. Este capítulo integra diferentes perspectivas teóricas e investigativas que facilitan el análisis del papel ecológico que desempeñan los manglares como sumideros naturales de carbono y como ecosistemas estratégicos para la sostenibilidad ambiental de las zonas costeras.

En primer lugar, se presenta el estado del arte, donde se recopilan antecedentes investigativos nacionales e internacionales relacionados con la captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas de manglar, evidenciando avances científicos, metodologías empleadas y principales hallazgos asociados al carbono azul y su aporte frente al cambio climático. Posteriormente, el marco teórico desarrolla conceptos fundamentales como cambio climático, carbono azul, biomasa, servicios ecosistémicos y ecosistemas de manglar, proporcionando las bases científicas necesarias para interpretar la dinámica ecológica y ambiental del área de estudio.

Finalmente, se expone el marco legal y normativo que sustenta la protección, conservación y manejo de los ecosistemas costeros tanto en el contexto internacional como colombiano, incluyendo políticas, convenios y lineamientos relacionados con mitigación climática, conservación de manglares y gestión ambiental sostenible. De esta manera, el marco referencial permite consolidar una visión integral de la investigación, articulando el conocimiento científico, ecológico y jurídico que respalda la evaluación del potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia.

5.1.Estado Del Arte

Los ecosistemas de carbono azul, especialmente los bosques de manglar, las marismas y las praderas de pastos marinos, cumplen un papel fundamental en la regulación climática debido a su capacidad para capturar y almacenar grandes cantidades de carbono atmosférico en la biomasa vegetal y en los sedimentos. Estos ecosistemas son considerados actualmente soluciones basadas en la naturaleza con alto potencial para la mitigación y adaptación frente al cambio climático, además de proporcionar importantes servicios ecosistémicos relacionados con la protección costera, la biodiversidad y la regulación hidrológica (Macreadie, 2019).

En las últimas décadas, la investigación científica sobre carbono azul ha tenido un crecimiento significativo a nivel mundial, principalmente debido al interés por comprender el aporte de los ecosistemas costeros en la reducción de gases de efecto invernadero. Los estudios recientes han permitido evidenciar que los manglares poseen una elevada eficiencia en el secuestro y almacenamiento de carbono, incluso superior a muchos ecosistemas forestales terrestres, razón por la cual su conservación y restauración representan estrategias prioritarias dentro de las políticas internacionales de acción climática (Howard J, 2023).

En el contexto internacional los autores Arenales, Barrientos y González (2024) desarrollaron en Guatemala la investigación titulada Acumulación multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala. El estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento del carbono orgánico acumulado y liberado en el ecosistema de manglar durante un período de siete años. La metodología integró parcelas permanentes de medición forestal, análisis multitemporal mediante imágenes satelitales Planet y herramientas SIG como QGIS, además de ecuaciones alométricas y análisis de carbono orgánico en suelo (Arenales I, 2024).

Los resultados evidenciaron variaciones en la cobertura de manglar entre 2017 y 2023, así como una importante capacidad de almacenamiento de carbono tanto en biomasa aérea como en sedimentos. Los autores concluyeron que la integración entre teledetección y monitoreo de campo permite estimaciones confiables de carbono azul y facilita el seguimiento ecológico de estos ecosistemas (Arenales I, 2024).

De igual manera, Hernández Narváez, Torres Duque y Sierra Correa (2022), en el estudio Adaptación basada en ecosistemas y carbono azul en la gestión del cambio climático del Gran Caribe, realizaron una revisión regional sobre gobernanza, normatividad y aplicación de soluciones basadas en ecosistemas en países del Caribe. La investigación evidenció que, aunque Colombia y México presentan avances en marcos normativos y estrategias relacionadas con carbono azul, todavía existen limitaciones asociadas al financiamiento, coordinación institucional y participación comunitaria. Los autores resaltan la necesidad de fortalecer políticas integradas y mecanismos de gestión ambiental para potenciar la conservación de manglares y otros ecosistemas costeros como herramientas de mitigación climática (Hernández Narváez, 2023).

En Asia, Guo et al. (2024), en el estudio Factors influencing mangrove carbon storage and its response to environmental stress, analizaron sedimentos de manglar en Guangxi, China, mediante biomarcadores lignínicos e isótopos estables. Los resultados indicaron que los manglares con menores rangos de marea y menor intervención antrópica almacenan mayores cantidades de carbono orgánico en el suelo. Los autores concluyeron que las actividades humanas representan uno de los factores principales de degradación y pérdida de capacidad de almacenamiento de carbono en ecosistemas de manglar (Guo C, 2024).

En México, Gutiérrez et al. (2022), en el estudio Flujos e inventario de carbono azul en manglares asociados a una laguna costera antropizada, analizaron sedimentos de manglar en Estero de Urías mediante extracción de núcleos y análisis geoquímicos. Los resultados mostraron inventarios de carbono orgánico entre 385 y 440 Mg ha⁻¹, confirmando que los manglares constituyen importantes sumideros de carbono, aunque altamente influenciados por actividades humanas y modificaciones hidrológicas (Gutierrez G, 2022).

En Costa Rica, Bolaños et al. (2025), desarrollaron el estudio Cobertura, estructura vegetal y almacenamiento de carbono del manglar de Morales, Puntarenas, Costa Rica, donde evaluaron la cobertura y capacidad de almacenamiento de carbono mediante muestreos por parcelas, análisis de laboratorio e imágenes satelitales. Los resultados evidenciaron una reducción aproximada de 24 hectáreas de manglar entre 1944 y 2020, así como una capacidad de almacenamiento cercana a 48 Mg C/ha en biomasa y 11 Mg C/ha en suelo. Los investigadores recomendaron implementar acciones de restauración ecológica para recuperar áreas degradadas y fortalecer la captura de carbono y los servicios ecosistémicos (Bolaños R, 2025).

Por otra parte, Benavides, Alvarado-Barrientos y López (2024), en la investigación Revisión cienciométrica (1990-2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO₂ y CH₄ de manglares, analizaron 1,215 publicaciones científicas relacionadas con el carbono azul. Los resultados evidenciaron un crecimiento exponencial de investigaciones desde el año 2009, impulsado principalmente por el interés científico en el concepto de carbono azul. Sin embargo, los autores señalan que Latinoamérica aún presenta baja participación en la producción científica respecto a Asia y Oceanía, lo que evidencia la necesidad de fortalecer investigaciones regionales sobre carbono azul y ecosistemas costeros (Guo C, 2024).

En Colombia, Carmona et al. (2024) desarrollaron la investigación Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia, evaluando 46 municipios costeros con presencia de manglar en las regiones Caribe y Pacífica. La metodología integró análisis estadísticos multivariados, indicadores socioambientales y modelos de vulnerabilidad climática basados en los lineamientos del IPCC. Los resultados mostraron que los manglares del Caribe colombiano presentan mayores niveles de vulnerabilidad y riesgo frente a variables como aumento del nivel del mar, erosión costera, alteraciones hidrológicas y presión antrópica (Carmona J, 2024). La investigación concluye que es necesario fortalecer estrategias de restauración, monitoreo y conservación para reducir el riesgo climático y garantizar la permanencia de estos ecosistemas (Carmona J, 2024).

En relación con la capacidad de secuestro de carbono de los manglares, Choudhary, Choudhary B (2024), en el estudio Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration, analizaron ecosistemas de manglar en diferentes regiones tropicales y subtropicales mediante mediciones de biomasa, análisis isotópicos y modelos de secuestro de carbono. Los autores reportaron que los manglares pueden almacenar hasta 1023 Mg de carbono por hectárea, representando aproximadamente entre cuatro y cinco veces más carbono que otros ecosistemas forestales. Asimismo, concluyeron que los manglares aportan cerca del 30 % del carbono enterrado en ecosistemas costeros, destacando su importancia estratégica dentro de las acciones globales de mitigación climática (Choudhary B, 2024).

Por otra parte, Howard et al. (2023), en la investigación Blue carbon pathways for climate mitigation: Known, emerging and unlikely, realizaron una revisión científica global sobre el potencial del carbono azul como solución climática natural. A través de un análisis documental, los autores destacaron la necesidad de ampliar las acciones de protección y restauración de ecosistemas costeros, así como fortalecer los mecanismos financieros y

políticos para garantizar la incorporación del carbono azul en las estrategias internacionales de mitigación del cambio climático (Howard J, 2023).

A nivel nacional, Bernal et al. (2024), en el estudio Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros, combinaron herramientas de teledetección Sentinel-2, aprendizaje automático y análisis espacial mediante Google Earth Engine para estimar el carbono almacenado en manglares colombianos. Los resultados indicaron que la extensión total de manglares en Colombia para el año 2020 fue de aproximadamente 2,756 km², con un almacenamiento estimado de 353,610 toneladas de CO₂. Los autores concluyeron que los manglares representan uno de los principales sumideros de carbono del país y resaltaron la importancia del monitoreo mediante tecnologías geoespaciales para fortalecer estrategias de conservación y reducción de emisiones (Bernal J, 2024).

Asimismo, Moreno Muñoz (2022), en su trabajo Evaluación de almacenamiento de carbono azul en el ecosistema de manglar del Pacífico nariñense, integró trabajo de campo, análisis de laboratorio, teledetección y modelos estadísticos para evaluar las reservas de carbono azul. Los resultados demostraron que los manglares del Pacífico nariñense poseen una considerable capacidad de almacenamiento de carbono tanto en biomasa como en suelo, confirmando el aporte significativo de estos ecosistemas a la mitigación del cambio climático (Moreno Muñoz, 2023).

El estudio Análisis físico-ecosistémico del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia y su contribución al cambio climático. La investigación implementó metodologías basadas en protocolos del INVEMAR para la caracterización física y ecológica del ecosistema. Los resultados evidenciaron procesos de degradación asociados al turismo, erosión costera y alteraciones hidrodinámicas, además de identificar áreas vulnerables frente

a impactos climáticos y antrópicos. Los autores concluyeron que es necesario fortalecer acciones de monitoreo, restauración y conservación para garantizar la sostenibilidad ecológica del bosque manglar de Puerto Colombia. Este antecedente representa una base importante para la presente investigación, debido a que permite profundizar específicamente en la evaluación del potencial de captura de carbono azul del ecosistema estudiado (INVEMAR, 2025).

5.2.Marco Legal

Este trabajo investigativo se sustenta en el marco normativo ambiental colombiano, el cual reconoce la importancia estratégica de los ecosistemas de manglar en la mitigación del cambio climático. Normas como la Ley 1931 de 2018, que establece los lineamientos para la gestión integral del cambio climático en el país (Republica de Colombia , 2018), y la Ley 2243 de 2022, que garantiza la protección y el manejo sostenible de los manglares (Republica de Colombia , 2022), respaldan la necesidad de estudios científicos que cuantifiquen su capacidad de captura de carbono azul y fortalezcan las políticas de conservación.

En ese orden de ideas y siguiendo los lineamientos de estos instrumentos jurídicos, el marco teórico del proyecto se apoya en investigaciones recientes que demuestran que los ecosistemas de manglar son sumideros naturales altamente eficientes, capaces de almacenar grandes cantidades de carbono en su biomasa aérea, subterránea y en sus sedimentos.

Bajo este enfoque, los objetivos de la investigación: cuantificar la biomasa, determinar el potencial total de captura de carbono y analizar su contribución a la mitigación del cambio climático dan respuesta y van en función del compromiso del Estado colombiano con la protección de sus ecosistemas costeros, articulando la ciencia ambiental con el

cumplimiento de la normatividad vigente y las metas nacionales de reducción de emisiones (Minambiente, 2022).

Colombia es un estado que alberga cerca del 10 % de la biodiversidad mundial y es el segundo país con mayor biodiversidad por kilómetro cuadrado (UNIR , 2023), por lo que se hace necesario establecer una política nacional que garantice la protección del medio ambiente a través de una legislación ambiental.

Dentro del marco de las políticas ambientales a nivel nacional en Colombia se inicia con el decreto ley 2811 al cual se le conoce como el código nacional de los recursos naturales, este establece el marco general para la protección y el uso de los recursos naturales renovables en Colombia, sentando bases legales para la conservación de ambientes marinos y costeros y exigiendo permisos para actividades que puedan afectarlos (Republica de colombia , 1974).

En el año 1991 con la nueva constitución la normativa legal ambiental en el país toma una mayor relevancia, se redimensiona la protección ambiental dándole la categoría de derecho colectivo (UNIR , 2023) en ese orden de ideas tras la Conferencia de la ONU de Río de Janeiro en 1992 sobre medio ambiente y desarrollo, tras la que nació la Ley 99 de 1993 en la que se crea el Ministerio del Medio Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA); asigna competencias sobre conservación, ordenamiento ambiental del territorio y protección de áreas de especial importancia ecológica por ende se convierte fundamento legal moderno que sustenta la protección y manejo de manglares (Republica de Colombia , 1993).

Mas tarde en el año 1995 por la necesidad de regular y proteger los ecosistemas de manglar en Colombia, enfrentando el deterioro ambiental causado por la tala y las construcciones ilegales se crea la resolución 1602 que dicta medidas concretas para la conservación y manejo sostenible de manglares en Colombia (medidas de protección, usos

compatibles, vigilancia y acciones para la sostenibilidad) convirtiéndose en uno de los primeros instrumentos sectoriales específicos sobre manglares (Ministerio de Medio Ambiente , 1995).

Mas tarde en el año 2018 dada la necesidad de establecer un marco legal para la adaptación y mitigación del cambio climático, en línea con la Política Nacional de Cambio Climático de 2017 y los compromisos internacionales adquiridos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) nace la ley 1931 de 2018 que establece directrices obligatorias para incorporar la gestión del cambio climático en la planificación y decisiones públicas y privadas (mitigación y adaptación), y que formaliza líneas de acción para reducir vulnerabilidad y emisiones; es el marco normativo nacional vigente para el clima (Republica de Colombia , 2018).

Tres años más tarde dado los compromisos adquiridos por Colombia en los diferentes tratados internacionales como el acuerdo de parís se crea la ley 2169 de 2021 llamada también ley de acción climática que promueve y habilita instrumentos e incentivos para la transición hacia un desarrollo bajo en emisiones (políticas, medidas fiscales y regulatorias) y que facilita la implementación de acciones de mitigación sectoriales, con implicaciones para la conservación de sumideros naturales (Republica de Colombia, 2021).

En pro de seguir garantizando la protección de los ecosistemas de manglar, fomentar su conservación y manejo sostenible se da la expedición de un marco legal un poco más robusto como lo es la ley 2243 de 2022 esta específica para garantizar la protección de los ecosistemas de manglar, planificar su manejo y aprovechamiento, impulsar conservación, restauración y su valoración como bienes ambientales estratégicos, incluye instrumentos de planeación y control, consolidándose como una normativa nacional dedicada exclusivamente a los manglares (Republica de Colombia , 2022).

5.3.Marco teórico

5.3.1. Manglares

Los manglares son ecosistemas costeros intermareales tropicales y subtropicales compuestos por árboles y arbustos tolerantes a la sal, que crecen en sedimentos inundados periódicamente por mareas. Sus características morfo-fisiológicas incluyen raíces aéreas, se adaptan fácilmente al estrés salino y suelos anóxicos, lo que les permite colonizar zonas entre lo terrestre y lo marino (Muñoz, 2022).

A nivel global la extensión de manglar se estima en 81484.96 km², de estos el 85.76% se reúnen en 20 países, de los cuales Indonesia cuenta con el mayor porcentaje de bosques de manglar (28.83%). En seguida se encuentra Brasil con el 9.25% y el resto de los países cuentan con una variación entre el 1.12 y 5.95% de esa área. Colombia tiene el 2.01% de la cobertura total de manglares en el mundo, con una extensión aproximada de 289122.25 ha, distribuidas en la costa Caribe con un área de 79719.41 ha y a lo largo de la costa Pacífica con un área de 209402.84 ha (Rodríguez-Rodríguez et al., 2016). En el Pacífico, las mayores extensiones de manglares confluyen en el departamento de Nariño con aproximadamente 125000 ha. (Muñoz, 2022).

Tabla 1. Servicios ecosistémicos de los manglares

Tipo de servicio	Descripción
Aprovisionamiento	Alimentos, pesca, materias primas (fibra, madera, combustible, taninos), recursos medicinales, materiales genéticos, mantenimiento de medios de vida de comunidades costeras.
Regulación	Regulación del clima, control biológico, control de la erosión costera, moderación de eventos extremos, protección frente a

Tipo de servicio	Descripción
	tormentas, inundaciones; secuestro y almacenamiento de carbono, biofiltración, regulación del agua, protección contra intrusión salina, polinización.
Cultural	Valores culturales, espirituales y artísticos, recreación, estética, turismo, educación e investigación.
Soporte	Biodiversidad, anidamiento y hábitat para peces y otras especies marinas y terrestres, formación de suelo, ciclo de nutrientes.

Fuente: (Muñoz, 2022)

De acuerdo a su ubicación los manglares también reciben una clasificación, se les denomina ribereños a aquellos que crecen en las orillas de los ríos y en las zonas donde hay cierta influencia de las mareas y del agua salada, de borde cuando surgen en las costas, en bahías o lagunas arrecifales o rodeando islas. Este tipo de manglares son aquellos que soportan el continuo golpe de las olas al frente y finalmente cuenca a los que se desarrollan detrás de los ribereños y de los de borde. Estos se localizan donde hay suelos estables. En este tipo de hábitats la renovación del agua es lenta, hay poco oxígeno y alta salinidad (Villanueva & Blanco, 2024).

Ilustración 1. Regulación de los Sistemas ecosistémicos por medio del manglar.



Fuente: (Cisneros-de la Cruz, 2021)

5.3.2. Dióxido de Carbono CO₂

Es un gas fundamental en la atmósfera que contribuye a retener el calor terrestre. Forma parte del conjunto de gases de efecto invernadero y sus principales fuentes de emisión provienen de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, así como de los incendios forestales, diversas actividades industriales y fenómenos naturales como las erupciones volcánicas (Villanueva & Blanco, 2024).

El incremento del calentamiento global asociado a la acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se ha convertido en una de las principales preocupaciones ambientales a nivel mundial durante las últimas décadas. Ante esta problemática, se han desarrollado diferentes tecnologías orientadas a la captura y manejo de CO₂; sin embargo, el aprovechamiento del carbono capturado proveniente de emisiones industriales y centrales termoeléctricas ha adquirido mayor relevancia debido a las preocupaciones existentes frente a la seguridad del almacenamiento geológico y oceánico del carbono (Chih Hung H, 2024).

En este contexto, diversas investigaciones han abordado técnicas relacionadas con la utilización del CO₂ generado en los gases de combustión, explorando alternativas tanto existentes como emergentes para su aprovechamiento. Estas estrategias pueden agruparse principalmente en dos enfoques: el uso directo del CO₂ y su transformación en productos químicos o energéticos. Dentro de las aplicaciones directas se destacan su utilización en bebidas carbonatadas, procesos de soldadura, fabricación de espumas y propelentes, así como el empleo de CO₂ supercrítico como solvente industrial (Chih Hung H, 2024).

De igual manera, ha aumentado el interés científico por métodos biológicos de captura basados en la fotosíntesis, especialmente mediante microalgas, debido a su capacidad para fijar carbono de forma natural y contribuir a la reducción de emisiones atmosféricas.

5.3.3. Carbono Azul (Blue Carbon)

El carbono azul es el carbono orgánico capturado y almacenado por los ecosistemas costeros y marinos vegetados, particularmente manglares, marismas y pastos marinos. Este carbono se acumula en la biomasa viva (raíces, troncos, hojas) y en los sedimentos anóxicos bajo dichos ecosistemas, donde puede permanecer almacenado por largos periodos (décadas a milenios), reduciendo la concentración de CO₂ atmosférico (Benavides J, 2024).

A través de la fotosíntesis la vegetación produce biomasa. Parte de esta biomasa se deposita en sedimentos, donde la descomposición es muy lenta debido a condiciones anaeróbicas. Acumulación de hojarasca, raíces muertas, materia orgánica enterrada en sedimentos profundos (Alongi D. M., 2020).

Las reservas globales de carbono orgánico en manglares se estiman entre 5.23 y 8.63 Pg C org (pentagramos de carbono orgánico), con la mayor proporción almacenada en horizontes de suelo profundo. La tasa promedio de enterramiento de carbono en suelos de manglar es igual a 184 g C_{org} m⁻² año⁻¹. En otros estudios, restauraciones de manglares muestran que plantaciones gestionadas adecuadamente pueden alcanzar tasas de secuestro de carbono en ecosistema de $\sim 3.32 \pm 0.62$ kg C m⁻² año⁻¹, dependiendo de especies, estructura, y manejo. (Alongi D. M., 2022).

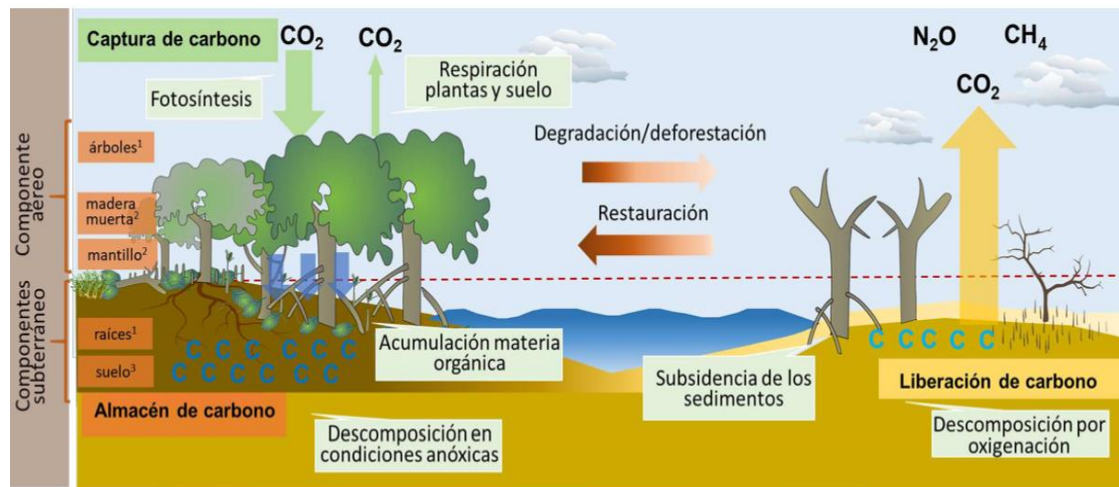
5.3.4. Almacenamiento de carbono en manglares

El almacenamiento de carbono en manglares se refiere a la acumulación y retención de carbono orgánico en los distintos compartimentos del ecosistema manglar, biomasa aérea (troncos, ramas, hojas), biomasa subterránea (raíces) y suelos/sedimentos durante largos periodos de tiempo. Este carbono proviene de la fijación de CO₂ atmosférico mediante fotosíntesis, de la materia orgánica que cae al suelo (hojarasca, raíces muertas, detrito), y de la deposición de

sedimentos orgánicos o minerales que pueden atrapar carbono disuelto o particulado (Alongi D. M., 2020).

El carbono almacenado en los suelos de manglar, especialmente en sedimentos anóxicos, puede mantenerse durante siglos o incluso milenios si el ecosistema permanece relativamente estable, sin degradación, deforestación, drenaje o grandes perturbaciones (Alongi D. M., 2020).

Ilustración 2. Captura de Carbono del Manglar.



Fuente: (Cisneros-de la Cruz, 2021)

5.3.5. Biomasa aérea en manglares

La biomasa aérea en manglares corresponde a la masa total de materia orgánica contenida en los componentes del ecosistema que se desarrollan por encima del nivel del suelo, principalmente los troncos, ramas, hojas, flores y frutos de los árboles y arbustos de manglar. Se mide generalmente en términos de peso seco (Mg/ha) y constituye una de las reservas más visibles de carbono en estos ecosistemas, siendo un indicador clave para evaluar productividad primaria, almacenamiento de carbono y potencial de mitigación del cambio climático (Muñoz, 2022).

5.3.6. Biomasa subterránea en manglares

La biomasa subterránea (o biomasa por debajo del suelo) en los manglares incluye todas las partes vivas del vegetal que están bajo el nivel del suelo: raíces principales, raíces finas, rizomas, bases de tallos enterradas y cualquier otro sistema radicular. Representa una fracción importante del carbono fitoorgánico almacenado, y su rol es esencial en la estabilidad, la nutrición, la estructura del suelo y el secuestro de carbono (Muñoz, 2022)

5.3.7. Cambio Climático

El cambio climático se entiende como la alteración significativa y persistente de los patrones del clima global y regional, atribuida tanto a variaciones naturales como, principalmente, a las actividades humanas que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estas alteraciones han generado un aumento sostenido de la temperatura promedio del planeta, cambios en los regímenes de precipitación, incremento en la frecuencia de eventos extremos (huracanes, sequías, inundaciones) y aumento del nivel del mar (IPCC, 2023).

Los manglares actúan como sumideros naturales de carbono altamente eficientes, mitigando el aumento de CO₂ atmosférico. Al mismo tiempo, son ecosistemas vulnerables a sus efectos, especialmente al ascenso del nivel del mar, la salinización y la presión antrópica. Por ello, entender el cambio climático implica no solo reconocer sus impactos ecológicos y sociales, sino también identificar el papel estratégico de los manglares en las estrategias globales y nacionales de mitigación y adaptación (Alongi D. M., 2020).

En este sentido, las bases teóricas y legales ratifican la pertinencia científica y ambiental de esta investigación, al demostrar que la evaluación del potencial de captura de carbono azul del manglar de la playa de Puerto Colombia no solo representa un aporte al conocimiento técnico, sino también una herramienta para la toma de decisiones públicas y la gestión sostenible del

territorio. Las disposiciones de la Ley 2243 de 2022 y la Ley 1931 de 2018 legitiman la necesidad de generar información precisa sobre el almacenamiento de carbono en los manglares, en concordancia con los compromisos internacionales de Colombia frente al Acuerdo de París y la acción climática. De esta manera, los resultados esperados del estudio contribuirán a fortalecer las estrategias de conservación y restauración de ecosistemas costeros, convirtiendo la investigación en un puente entre la ciencia aplicada y la implementación normativa que respalda el desarrollo sostenible y la resiliencia climática del Caribe colombiano.

6. Metodología

La presente investigación se desarrolló con el propósito de evaluar el potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia como estrategia de mitigación del cambio climático, considerando la importancia ecológica de estos ecosistemas costeros como reservorios naturales de carbono. Los manglares desempeñan un papel fundamental en la regulación climática global debido a su capacidad para almacenar grandes cantidades de carbono en la biomasa vegetal y en los sedimentos, convirtiéndose en ecosistemas estratégicos para la reducción de gases de efecto invernadero y la adaptación frente al cambio climático.

En este contexto, la metodología planteada se estructuró a partir de lineamientos técnicos para la estimación de carbono azul en ecosistemas de manglar, tomando como referencia principal la Guía metodológica para la estimación de carbono azul en manglares de Colombia elaborada por INVEMAR, así como el Manual para la medición, monitoreo y reporte del carbono y gases de efecto invernadero en manglares en restauración. Estas metodologías permiten desarrollar procesos de cuantificación mediante técnicas de inventario forestal no destructivo, aplicación de modelos alométricos y estimación del carbono almacenado en los diferentes componentes del ecosistema.

El desarrollo metodológico se diseñó bajo un enfoque cuantitativo, permitiendo obtener información biofísica del bosque manglar a partir de mediciones en campo, análisis de biomasa y estimación del carbono equivalente almacenado. Asimismo, la metodología fue adaptada a las condiciones reales del área de estudio y a las limitaciones logísticas y presupuestales del proyecto, priorizando procedimientos técnicamente viables y científicamente sustentados.

El capítulo se organiza en diferentes apartados que describen el enfoque y tipo de investigación, el área de estudio, la población y muestra, las fases metodológicas, las variables de estudio, las técnicas e instrumentos de recolección de información, el procesamiento y análisis de los datos, así como las consideraciones técnicas empleadas para la estimación del potencial de carbono azul del ecosistema manglar evaluado.

6.1.Enfoque y tipo de investigación

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo y a la vez descriptivo donde permitirá caracterizar la estructura del bosque manglar y estimar sus reservas de carbono azul y a su vez generar información útil para la mitigación del cambio climático y la formulación de recomendaciones de manejo y conservación.

El estudio tendrá una orientación biofísica y ecosistémica, mediante inventario forestal, aplicación de modelos alométricos y estimación de carbono orgánico almacenado en los componentes del manglar. En manglares, los principales depósitos de carbono considerados por metodologías estandarizadas incluyen biomasa aérea, biomasa subterránea, necromasa y carbono orgánico del suelo.

6.2.Área de Estudio

El área de estudio corresponde al ecosistema de manglar ubicado en la playa de Puerto Colombia, en el departamento del Atlántico, Colombia. Este ecosistema costero se encuentra influenciado por dinámicas marino-costeras, variaciones de marea y procesos de intercambio hídrico que favorecen el establecimiento y permanencia de especies típicas de manglar adaptadas a condiciones salinas y suelos inundables. No obstante, la presente investigación continua el área estudio donde se evaluó un “*Análisis Físico-Ecosistémico Del Bosque Manglar De La Playa De Puerto Colombia Y Su Contribución Al Cambio*

Climático”, estudio realizado por (Blanco D & Cárcamo E, 2024), con el fin de seguir evaluando como este ecosistema puede funcionar como soluciones basadas en la naturaleza para la mitigación para los GEI y adaptación al cambio climático.

Tabla 2. Puntos centrales de monitoreo en la playa de Puerto Colombia.

Coordenadas de Ubicación	
Latitud	Longitud
10°59'27.727" N	74°57'27.896"W
10°59'28.385"N	74°57'27.715"W

Fuente: (Autores,2026)

Ilustración 3. Ubicación del área de estudio.



Fuente: (Blanco D & Cárcamo E, 2024)

La zona presenta características ecológicas de importancia estratégica debido a su función como barrera natural frente a procesos de erosión costera, regulación hídrica, conservación de biodiversidad y almacenamiento de carbono azul.

Para el desarrollo de la investigación, el área fue delimitada mediante reconocimiento preliminar en campo, observación directa y apoyo de herramientas cartográficas digitales como Google Earth y QGIS, permitiendo identificar la cobertura vegetal y definir los puntos de muestreo. Posteriormente, las parcelas fueron georreferenciadas utilizando sistema GPS para garantizar la ubicación espacial de cada unidad de muestreo.

No obstante, para el análisis de las parcelas del monitoreo se consideraron las siguientes coordenadas y la denominación que se consideró para el análisis de estas.

Tabla 3. Coordenadas de las parcelas de monitoreo en la playa de Puerto Colombia.

Código parcela	Coordenada X	Coordenada Y
MGPC01	10.99068° N	74.95799° O
MGPC02	10.99076° N	74.95793° O
MGPC03	10.99086° N	74.95782° O
MGPC04	10.99078° N	74.95793° O

Fuente: (Autores,2026)

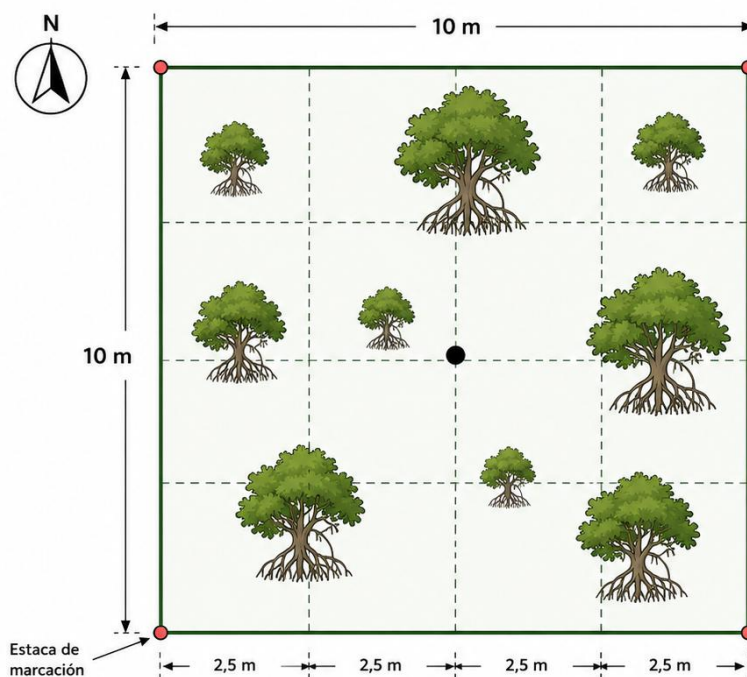
6.3.Población y Muestra

La población objeto de estudio estuvo conformada por todos los individuos arbóreos presentes en el bosque manglar (mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle Zaragoza (*Conocarpus erectus*)), de la playa de Puerto Colombia, así como por los componentes biofísicos asociados al almacenamiento de carbono azul dentro del ecosistema.

La muestra correspondió a las parcelas establecidas dentro del área delimitada del manglar, seleccionadas mediante un muestreo sistemático teniendo en cuenta criterios de representatividad, accesibilidad y estado de conservación del ecosistema como se presenta en la tabla 3.

Para el levantamiento de información se establecieron parcelas temporales de 10 m × 10 m (100 m²), distribuidas en diferentes sectores del bosque manglar.

Ilustración 4. Diseño de parcelas.



Fuente: (Autor,2026)

En cada parcela se realizó el inventario forestal y la caracterización básica del suelo, permitiendo obtener información relacionada con biomasa aérea, biomasa subterránea estimada y variables ambientales complementarias.

El diseño metodológico se fundamentó en técnicas de muestreo no destructivo recomendadas en metodologías de carbono azul para ecosistemas de manglar, adaptadas a las condiciones logísticas y presupuestales de la investigación.

Ilustración 5. Delimitación e instalaciones de parcelas.



Fuente: (Autor,2026)

Se propone un muestreo no destructivo, sistemático-estratificado, tratado de que las muestras sean representativas en la heterogeneidad del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia. Bajo el diseño metodológico propuesto por INVEMAR para la “*Guía metodológica para la estimación de carbono azul en manglares de Colombia*” recomienda que el diseño estadístico parta de la delimitación cartográfica, el reconocimiento previo del sitio y la ubicación planificada de parcelas de campo. Este tamaño no busca certificación de carbono, sino una estimación académica razonable del potencial de almacenamiento/captura.

6.4. Variables de Estudio

El proceso de recolección, organización y análisis de la información, se definieron las variables de estudio relacionadas con la estimación del potencial de captura de carbono azul en el ecosistema de manglar evaluado. Estas variables permitieron identificar y cuantificar los componentes biofísicos asociados al almacenamiento de carbono, considerando aspectos estructurales de la vegetación, características ecológicas del sitio y parámetros complementarios del suelo.

La selección de las variables se realizó tomando como referencia metodologías aplicadas en estudios de carbono azul en ecosistemas de manglar, particularmente aquellas relacionadas con inventarios forestales, estimación de biomasa mediante modelos alométricos y análisis de las condiciones ambientales del ecosistema. En la siguiente tabla se presentan las variables consideradas en el desarrollo de la investigación, así como su descripción y clasificación dentro del estudio.

Tabla 4. Variables del Estudio.

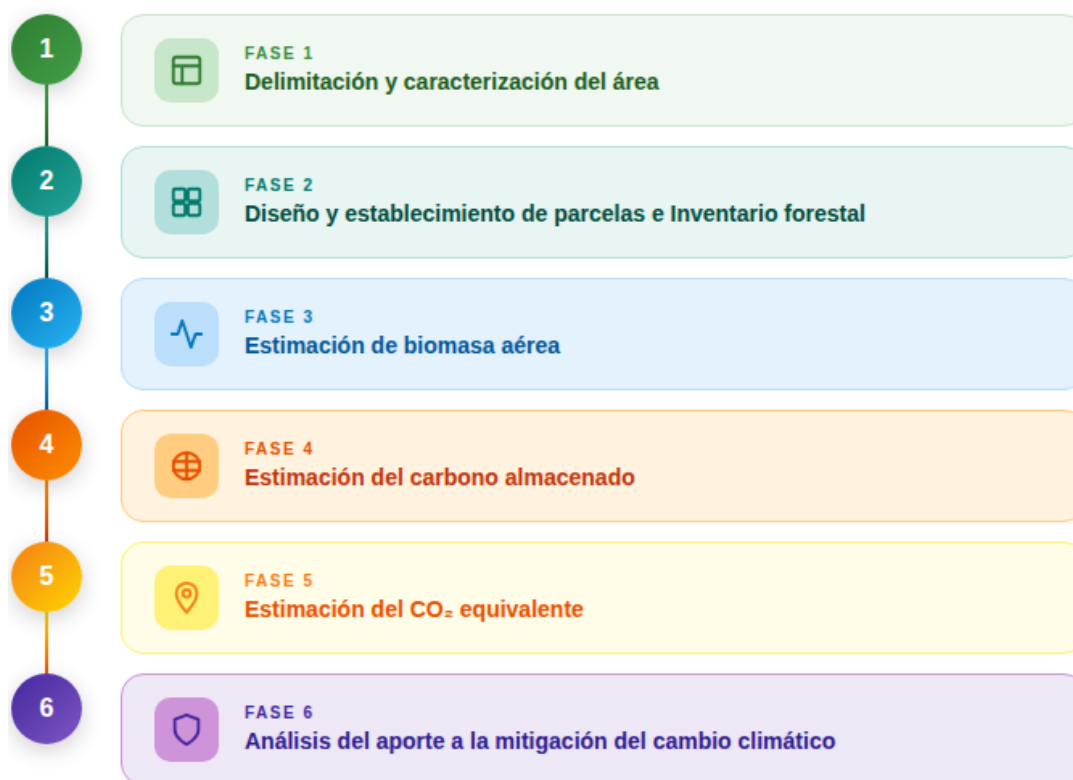
Tipo de variable	Variable	Descripción
Variable dependiente	Potencial de captura de carbono azul	Capacidad del ecosistema manglar para almacenar carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático.
	Biomasa aérea	Cantidad de materia orgánica presente en la parte aérea de los árboles del manglar.
Variables independientes	DAP	Diámetro a la altura del pecho de los individuos arbóreos.
	Altura total	Altura de los árboles presentes en las parcelas.
	Densidad arbórea	Número de individuos presentes por parcela.
	Carbono almacenado	Cantidad de carbono estimada a partir de la biomasa calculada.
Variables de control	Coordenadas	Ubicación geográfica de las parcelas.
	Condición del sitio	Estado de conservación, presencia de residuos y perturbaciones observadas.
	Características del suelo	Presencia de nutrientes y condiciones fisicoquímicas básicas del sedimento.

Fuente: (Autor,2026)

6.5.Fases Metodológicas

El desarrollo metodológico se estructuró en diferentes fases que permitieron orientar las actividades de planeación, reconocimiento del área de estudio, recolección de información en campo, procesamiento de datos y análisis de resultados relacionados con el potencial de carbono azul del ecosistema manglar.

Ilustración 6. Fases metodológicas aplicadas.



Fuente: (Autor,2026)

6.5.1. Fase 1. Delimitación y Caracterización Del Área

Se realizó una visita preliminar al ecosistema manglar con el propósito de identificar las condiciones generales del área, accesibilidad, distribución de la cobertura vegetal y posibles zonas de muestreo. Posteriormente, mediante herramientas cartográficas digitales y

georreferenciación GPS se delimitó el área efectiva de estudio y se ubicaron las parcelas de muestreo.

Ilustración 7. Delimitación y caracterización del área.



Fuente: (Autor,2026)

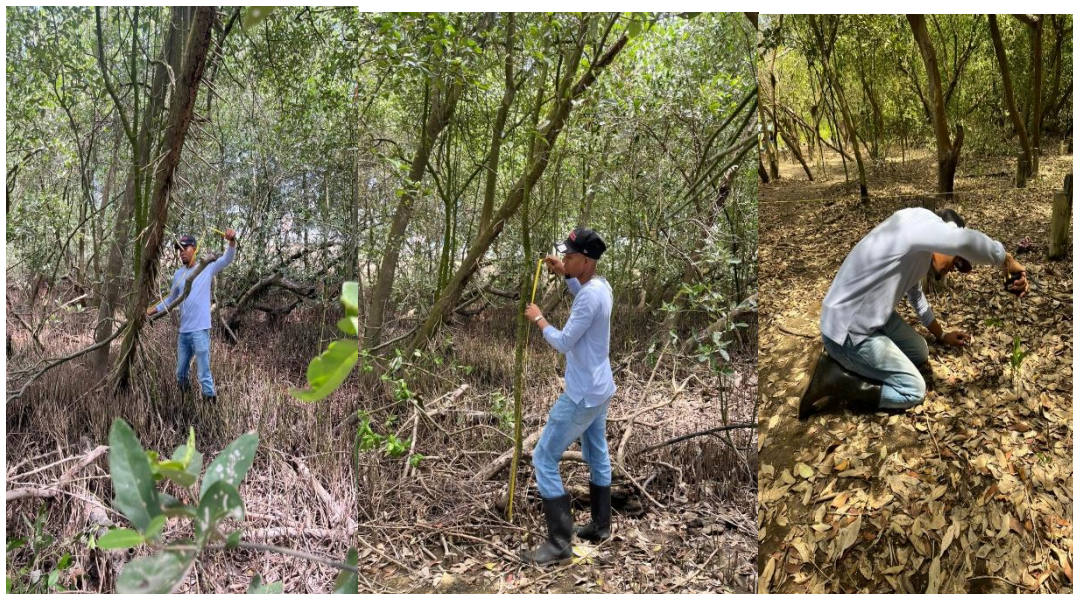
6.5.2. Fase 2. Diseño y establecimiento de parcelas e Inventario Forestal

Se establecieron parcelas temporales de 10 m × 10 m dentro del bosque manglar. En cada parcela se efectuó un inventario forestal no destructivo registrando:

- Especie.
- Diámetro a la altura del pecho (DAP).
- Altura total.
- Condición del individuo.
- Observaciones ecológicas.

Las mediciones fueron realizadas utilizando cinta métrica, cinta diamétrica y herramientas de medición de altura.

Ilustración 8. Diseño y establecimiento de parcelas e Inventario Forestal



Fuente: (Autor,2026)

La guía de INVEMAR y los manuales de carbono para manglares recomiendan el inventario detallado de biomasa aérea mediante medición de DAP y otras variables estructurales, cuidando la forma correcta de medir según la arquitectura del tallo.

6.5.3. Fase 3. Estimación de biomasa aérea

La biomasa aérea fue estimada mediante ecuaciones alométricas aplicadas a manglares, utilizando variables dasométricas (medidas cuantitativas tomadas de árboles y masas forestales) obtenidas en campo como DAP y altura. La biomasa total obtenida fue convertida a carbono almacenado utilizando factores de conversión biomasa-carbono, y posteriormente expresada en CO₂ equivalente para estimar el aporte potencial del ecosistema a la mitigación del cambio climático.

6.5.4. Fase 4. Estimación del carbono almacenado

En esta fase se realizó el análisis e interpretación de los resultados obtenidos sobre biomasa y carbono almacenado en el ecosistema manglar. Se evaluó el comportamiento de las variables forestales y ambientales para determinar el aporte potencial del manglar de Puerto Colombia como sumidero de carbono y su importancia en la mitigación del cambio climático. Una vez obtenida la biomasa, el carbono se calculará mediante factores de conversión biomasa-carbono reportados por la literatura y compilados en manuales metodológicos para manglares. El manual señala expresamente que existen factores de conversión para obtener el porcentaje de carbono orgánico de los distintos componentes de la biomasa.

Fórmula general

$$\text{Carbono (Mg C)} = \text{Biomasa seca (Mg)} \times \text{factor de carbono}$$

6.5.5. Fase 5. Estimación del CO₂ equivalente

Para la presente fase nos ayudara realmente como esta captura de carbono ayuda a la captación de GEI en especial Dióxido de Carbono, es así, que para expresar el aporte a la mitigación, el carbono almacenado se convertirá a CO₂ equivalente mediante la relación estequiométrica:

$$\text{CO}_{2e} = \text{MgC} \times 3.67$$

Esto permitirá expresar el resultado en toneladas de CO₂ equivalente retenidas por hectárea y para el área total del manglar.

6.5.6. Fase 6. Análisis del aporte a la mitigación del cambio climático

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos y del análisis ecológico del ecosistema, se formularon recomendaciones orientadas al manejo, conservación y fortalecimiento ambiental

del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia. Estas recomendaciones estuvieron enfocadas en la protección del ecosistema, la reducción de impactos antrópicos, el monitoreo ambiental y la promoción de estrategias de conservación que contribuyan a mantener la capacidad de almacenamiento de carbono azul del manglar.

6.6. Procesamiento y Análisis de Datos

La información recolectada durante las jornadas de campo fue organizada, sistematizada y procesada mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, permitiendo consolidar los datos obtenidos en cada una de las parcelas evaluadas. Posteriormente, se realizaron cálculos relacionados con la estructura del bosque manglar, incluyendo densidad arbórea, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura promedio, biomasa aérea y biomasa subterránea estimada.

A partir de estos resultados se determinó el carbono almacenado y su equivalencia en dióxido de carbono (CO₂e), utilizando factores de conversión reportados en literatura especializada para ecosistemas de manglar. El análisis de los datos se desarrolló mediante estadística descriptiva, empleando promedios, porcentajes, valores máximos y mínimos, así como tablas y representaciones gráficas que facilitaron la interpretación del potencial de captura de carbono azul del ecosistema estudiado.

6.7. Instrumentos y Equipos Utilizados

Para el desarrollo de las actividades de campo, laboratorio y procesamiento de información se emplearon los siguientes instrumentos y equipos:

Tabla 5. Instrumentos y equipos utilizados.

Instrumento/Equipo	Uso principal
GPS	Georreferenciación de parcelas
Cinta métrica	Delimitación de parcelas
Cinta diamétrica	Medición del DAP
Estacas y cinta de señalización	Marcación de parcelas

Instrumento/Equipo	Uso principal
Soil Test Kit	Evaluación rápida de nutrientes y pH
Reactivos químicos	Detección de pH, potasio, fósforo y nitrógeno amoniacal
Tabla de campo	Registro de información
Cámara fotográfica o celular	Registro fotográfico
Multiparámetro	Determinación de parámetros físicos del suelo
Medidor Ph Humedad Temperatura	Medidor en campo de pH, humedad, temperatura y luz del suelo.
Luminosidad 4 En 1 Planta	

Fuente: (Autor,2026)

6.8.Formatos de recolección en campo

Para la recolección de información en campo se diseñaron y utilizaron diferentes formatos técnicos que permitieron registrar de manera organizada las variables forestales, ambientales y edáficas evaluadas durante la investigación. Entre ellos se empleó un formato de registro general de parcelas para la identificación y georreferenciación de los puntos de muestreo; un formato de inventario forestal para consignar información relacionada con especie, DAP, altura y estado de los individuos arbóreos; un formato de caracterización del suelo para registrar resultados obtenidos mediante el Soil Test Kit y las condiciones físicas del sedimento; así como un formato de registro ecológico del sitio para documentar aspectos como inundación, presencia de residuos y perturbaciones observadas. Finalmente, se utilizó una matriz de procesamiento de biomasa y carbono destinada a organizar los cálculos de biomasa, carbono almacenado y CO₂ equivalente obtenidos a partir de la información recolectada en campo.

7. Resultados y Discusiones

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación relacionada con la evaluación del potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia. Los resultados se derivan del análisis de las variables forestales, ambientales y edáficas registradas en las parcelas de muestreo, permitiendo estimar la biomasa aérea y subterránea, el carbono almacenado y su equivalencia en dióxido de carbono (CO₂e).

Asimismo, se presenta la interpretación de los hallazgos en función de la capacidad del ecosistema manglar para contribuir a la mitigación del cambio climático, complementando el análisis con comparaciones frente a estudios previos y consideraciones ecológicas asociadas al estado de conservación del área evaluada.

7.1.Cuantificación De La Biomasa Aérea Y Subterránea A Través De Modelos

Alométricos

Con base a la recolección de información en campo se realizó la cuantificación de la biomasa aérea y subterránea del bosque manglar mediante la aplicación de modelos alométricos, principalmente el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de los individuos arbóreos evaluados. Este procedimiento permitió estimar de manera indirecta la cantidad de materia orgánica presente en el ecosistema, constituyendo una base fundamental para el cálculo del carbono almacenado y la evaluación del potencial de carbono azul del manglar de la playa de Puerto Colombia.

Para ello se analizaron durante las 4 parcelas 72 especies de mangles entre las cuales se tenía *Rizophora mangle* y, en menor proporción, *Conocarpus erectus*, a continuación, en la siguiente tabla se relaciona los datos obtenidos en campo.

Tabla 6. Inventario de la parcela MGPC01.

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m) aprox	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC 01	1	Rizophora mangle	258	5,4	vivo	Algunas ramas secas
MGPC 01	2	Rizophora mangle	120	8,2	vivo	Decaído
MGPC 01	3	Conacarpus erectus	70	9	vivo	
MGPC 01	4	Rizophora mangle	305	5,05	vivo	
MGPC 01	5	Rizophora mangle	302	6	vivo	
MGPC 01	6	Rizophora mangle	100	5,7	vivo	
MGPC 01	7	Rizophora mangle	100	6	vivo	
MGPC 01	8	Conacarpus erectus	77	5	vivo	
MGPC 01	9	Conacarpus erectus	100	6	vivo	
MGPC 01	10	Rizophora mangle	6,5	6,5	vivo	

Fuente: (Autor,2026)

Tabla 7. Inventario de la parcela MGPC02.

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC02	1	Rizophora mangle	60	6	vivo	
MGPC02	2	Rizophora mangle	220	4,5	vivo	
MGPC02	3	Rizophora mangle	200	5	vivo	
MGPC02	4	Conacarpus erectus	190	6	vivo	
MGPC02	5	Rizophora mangle	210	7	vivo	
MGPC02	6	Rizophora mangle	240	6,5	vivo	
MGPC02	7	Rizophora mangle	290	6	vivo	
MGPC02	8	Rizophora mangle	50	6	vivo	
MGPC02	9	Conacarpus erectus	120	4	vivo	
MGPC02	10	Rizophora mangle	250	4	vivo	
MGPC02	11	Rizophora mangle	100	6	vivo	Desmejorado

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC02	12	Rizophora mangle	180	7	vivo	
MGPC02	13	Rizophora mangle	200	3,5	vivo	
MGPC02	14	Rizophora mangle	250	4	vivo	
MGPC02	15	Conacarpus erectus	210	7	vivo	Desmejorado
MGPC02	16	Rizophora mangle	280	5	vivo	
MGPC02	17	Rizophora mangle	230	7	Muerto	Seco
MGPC02	18	Rizophora mangle	210	7	vivo	
MGPC02	19	Conacarpus erectus	50	6	Muerto	Seco
MGPC02	20	Rizophora mangle	350	7	vivo	
MGPC02	21	Rizophora mangle	90	2,8	vivo	Algunas ramas secas
MGPC02	22	Rizophora mangle	280	9	vivo	Desmejorado
MGPC02	23	Rizophora mangle	250	6	vivo	Algunas ramas secas
MGPC02	24	Rizophora mangle	250	10	vivo	Algunas ramas secas

Fuente: (Autor,2026)

Tabla 8. Inventario de la parcela MGPC03.

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC03	1	Rizophora mangle	160	9	vivo	Demacrado
MGPC03	2	Rizophora mangle	40	0,6	Muerto	
MGPC03	3	Rizophora mangle	160	10	vivo	
MGPC03	4	Rizophora mangle	150	6	vivo	
MGPC03	5	Rizophora mangle	150	6	Muerto	Algunas ramas secas
MGPC03	6	Rizophora mangle	270	7	Muerto	
MGPC03	7	Rizophora mangle	100	8	Muerto	
MGPC03	8	Rizophora mangle	220	3	vivo	
MGPC03	9	Rizophora mangle	210	3,5	vivo	
MGPC03	10	Rizophora mangle	28	0,8	vivo	Arbusto
MGPC03	11	Rizophora mangle	220	4	vivo	

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC03	12	Rizophora mangle	60	6	vivo	
MGPC03	13	Rizophora mangle	75	0,29	vivo	
MGPC03	14	Rizophora mangle	11	0,19	vivo	
MGPC03	15	Rizophora mangle	25	0,35	vivo	
MGPC03	16	Rizophora mangle	20	0,28	vivo	
MGPC03	17	Rizophora mangle	16	0,27	vivo	
MGPC03	18	Rizophora mangle	10	0,2	vivo	
MGPC03	19	Rizophora mangle	16	0,27	vivo	
MGPC03	20	Rizophora mangle	20	0,25	vivo	
MGPC03	21	Rizophora mangle	15	0,25	vivo	
MGPC03	22	Rizophora mangle	10	0,25	vivo	
MGPC03	23	Rizophora mangle	16	0,18	vivo	
MGPC03	24	Rizophora mangle	12	0,16	vivo	
MGPC03	25	Rizophora mangle	15	0,25	vivo	
MGPC03	26	Rizophora mangle	10	0,22	vivo	

Fuente: (Autor,2026)

Tabla 9. Inventario de la parcela MGPC04.

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC04	1	Rizophora mangle	100	3	vivo	
MGPC04	2	Rizophora mangle	50	5	vivo	
MGPC04	3	Rizophora mangle	168	5	vivo	
MGPC04	4	Rizophora mangle	45	3	vivo	
MGPC04	5	Rizophora mangle	60	1,8	vivo	
MGPC04	6	Rizophora mangle	70	1,6	vivo	
MGPC04	7	Rizophora mangle	190	5	vivo	Decaido
MGPC04	8	Rizophora mangle	60	1,5	Muerto	
MGPC04	9	Rizophora mangle	80	4	Muerto	

Parcela	Árbol N°	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	estado (vivo / muerto)	Observaciones
MGPC04	10	Rizophora mangle	100	7	vivo	
MGPC04	11	Rizophora mangle	20	1,2	vivo	Algunas ramas secas
MGPC04	12	Rizophora mangle	10	0,3	vivo	

Fuente: (Autor,2026)

El diámetro promedio a la altura del pecho era de 12,76 cm, mientras que la altura media era de 4,32 m. Esto indica una estructura vegetal heterogénea, con individuos pequeños, medianos y algunos árboles de mayor porte que aportan gran parte de la biomasa total.

La biomasa aérea de cada árbol se estimó mediante un modelo alométrico general para manglares, el cual relaciona la biomasa con el diámetro y la densidad básica de la madera. La ecuación aplicada fue:

$$BA = 0.251 * \rho * D^{2.46}$$

Donde:

BA: Biomasa aérea seca total en kilogramos (kg)

0.251: Parámetro constante.

ρ : la densidad básica de la madera en g/cm³

$D^{2.46}$: Diámetro a la altura del pecho en centímetros (cm).

2.46: Exponente alométrico

Para la asignación de la densidad de la madera se utilizarán valores diferenciados según la especie registrada. En este caso, se demostró una densidad aproximada de 0,92 g/cm³ para *Rizophora mangle* y 0,80 g/cm³ para *Conocarpus erectus*.

En relación con la biomasa subterránea se estimó de forma indirecta a partir de la biomasa aérea, aplicando una relación proporcional comparativa empleada en estudios de manglar. Se utilizó la expresión:

$$\text{Biomasa Subterránea (BS)} = \text{Biomasa Aérea (BA)} \times \text{Factor (R)}$$

Cabe aclarar que según la literatura de (Miniambiente, 2019), El factor (0.52) suele estar relacionado con:

Fracción de Carbono: El 52% (0.52) o 50% (0.50) de la biomasa seca se considera carbono orgánico.

Ratio Raíz-Vástago (R): En algunos ecosistemas muy específicos, el factor de expansión de raíces R puede estar cerca de 0.52.

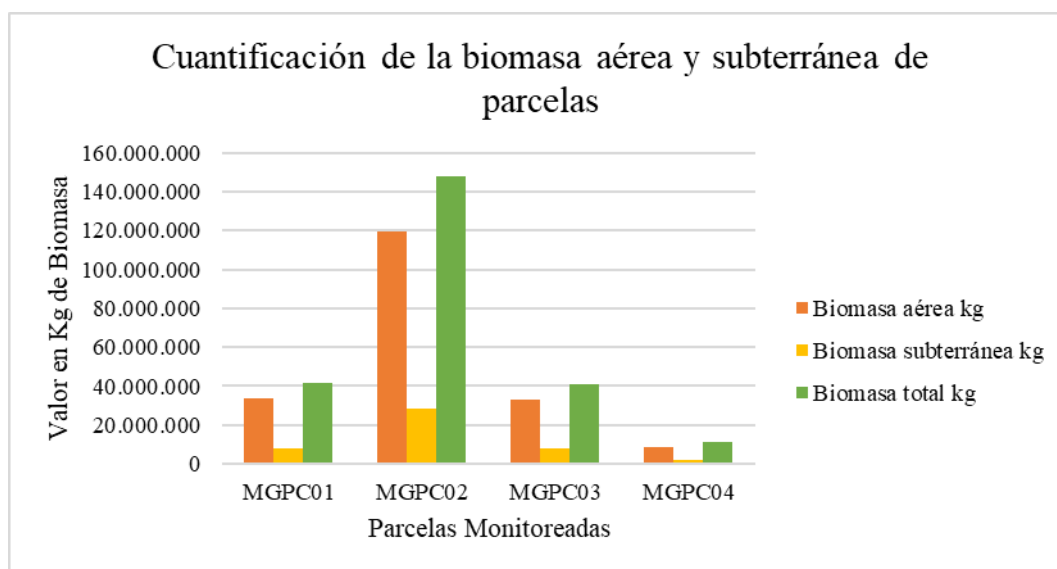
Aplicando las ecuaciones anteriores se calculó la Biomasa aérea y subterránea donde los resultados se presentan a continuación:

Tabla 10. Calculo de Biomasa aérea y subterránea por parcela.

Parcela	n árboles	DAP promedio cm	Altura promedio m	Biomasa aérea kg	Biomasa subterránea kg	Biomasa total kg
MGPC01	10	143.850	62.850	33.664.062	8.079.375	41.743.437
MGPC02	24	198.333	59.292	119.323.819	28.637.716	147.961.535
MGPC03	26	78.423	25.888	32.919.437	7.900.665	40.820.102
MGPC04	12	79.417	32.000	8.932.980	2.143.915	11.076.895

Fuente: (Autor,2026)

Gráfica 1. Biomasa aérea y subterránea por parcela



Fuente: (Autor,2026)

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en la biomasa aérea y subterránea entre las parcelas evaluadas dentro del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia, lo cual refleja variaciones en la estructura, densidad y desarrollo de los individuos arbóreos presentes en cada sector del ecosistema.

La parcela MGPC02 presentó los valores más altos de biomasa aérea (119.323.819 kg), biomasa subterránea (28.637.716 kg) y biomasa total (147.961.535 kg), asociándose además con el mayor número de árboles registrados (24 individuos) y el DAP promedio más elevado (198.333 cm). Estos resultados indican que esta parcela posee individuos con mayor desarrollo estructural y capacidad de acumulación de materia orgánica, lo que incrementa significativamente su potencial de almacenamiento de carbono azul.

Por su parte, las parcelas MGPC01 y MGPC03 mostraron valores relativamente similares de biomasa total, con 41.743.437 kg y 40.820.102 kg respectivamente, aunque con diferencias marcadas en las características estructurales de los árboles.

Mientras MGPC01 presentó un menor número de individuos pero diámetros y alturas promedio considerablemente altos, la parcela MGPC03 registró una mayor densidad arbórea, pero con individuos de menores dimensiones. Esto evidencia que el almacenamiento de biomasa no depende únicamente de la cantidad de árboles presentes, sino también del tamaño y grado de madurez de los individuos que conforman el manglar.

Para la parcela MGPC04 reportó los valores más bajos de biomasa aérea, biomasa subterránea y biomasa total, lo cual puede relacionarse con un menor desarrollo estructural de la vegetación, evidenciado en sus menores promedios de DAP y altura.

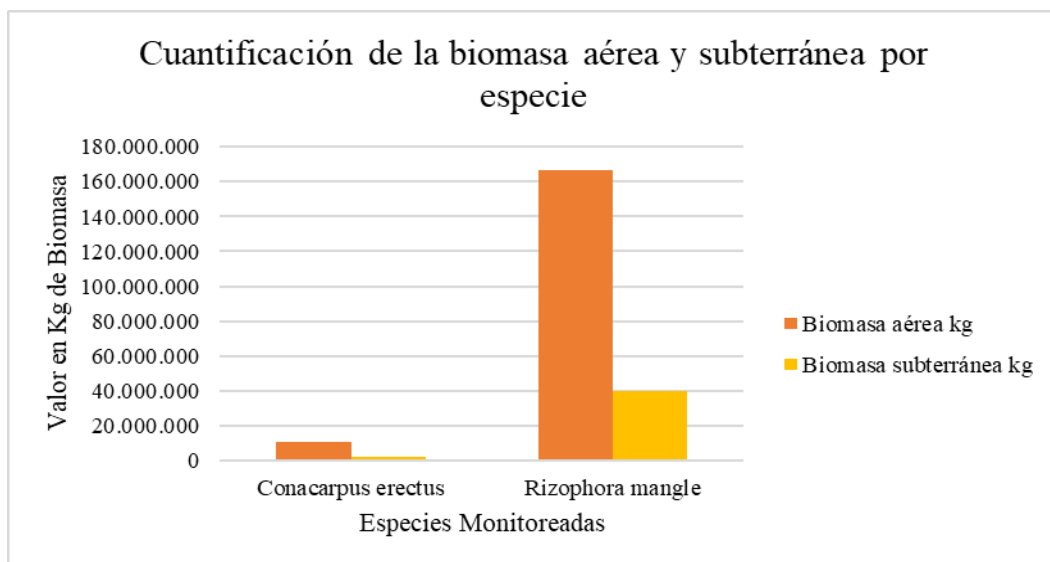
No obstante, también se calculó por especie detectada durante el monitoreo la biomasa que este puede proporcionar dando como resultado lo siguiente:

Tabla 11. Biomasa aérea y subterránea por especie

Especie	Biomasa aérea kg	Biomasa subterránea kg
<i>Conacarpus erectus</i>	10.540.810	2.529.794
<i>Rizophora mangle</i>	166.830.423	40.039.302

Fuente: (Autor,2026)

Gráfica 2 Biomasa aérea y subterránea por especie



Fuente: (Autor,2026)

Los resultados obtenidos por especie evidencian diferencias importantes en la contribución de cada una al almacenamiento de biomasa dentro del ecosistema manglar evaluado. La especie *Rizophora mangle* presentó la mayor representación estructural y ecológica dentro del área de estudio, registrando un total de 58 individuos, así como los valores más altos de biomasa aérea (166.830.423 kg) y biomasa subterránea (40.039.302 kg).

Estos resultados demuestran que esta especie constituye el principal componente vegetal asociado al potencial de captura y almacenamiento de carbono azul en el manglar de la playa de Puerto Colombia.

Aunque *Conocarpus erectus* presentó una altura promedio superior (61.667 m) en comparación con *Rizophora mangle* (40.303 m), su aporte total de biomasa fue considerablemente menor debido al reducido número de individuos registrados dentro de las parcelas evaluadas. En este sentido, *Conocarpus erectus* alcanzó una biomasa aérea de 10.540.810 kg y una biomasa subterránea de 2.529.794 kg, reflejando una menor participación en el almacenamiento total de carbono del ecosistema.

De acuerdo a lo anterior se infiere que *Rizophora mangle* posee una mayor relevancia ecológica en los procesos de almacenamiento de carbono azul debido a su abundancia y capacidad de acumulación de biomasa, condición que coincide con diversos estudios desarrollados en ecosistemas de manglar tropicales, donde esta especie es reconocida por su alta eficiencia en la captura y retención de carbono tanto en biomasa aérea como en sistemas radiculares.

7.2.Determinación del potencial total de captura de carbono azul del bosque manglar.

Para la determinación del potencial de carbono se procedió a partir de los valores de biomasa aérea y subterránea estimados en las parcelas evaluadas, este análisis permitió establecer la capacidad del ecosistema para almacenar carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático, considerando la importancia ecológica de los manglares como sumideros naturales de carbono en ecosistemas costeros. Es así como se aplicaron las siguientes ecuaciones para el calculo respectivo:

$$\text{Carbono (Mg C)} = \text{Biomasa seca (Mg)} \times \text{factor de carbono}$$

Sin embargo, para poder analizar el impacto de captura de los gases de efecto invernadero es necesario convertir el CO₂ equivalente ya que es la unidad de medida universal que estandariza el impacto de los distintos gases de efecto invernadero (GEI) sobre el calentamiento global, convirtiéndolos a la cantidad equivalente de dióxido de carbono CO_{2-eq} el cual se asocia al impacto que tendría en 100 años. Para ello se utiliza:

$$\text{CO}_{2\text{eq}} = \text{MgC} \times 3.67$$

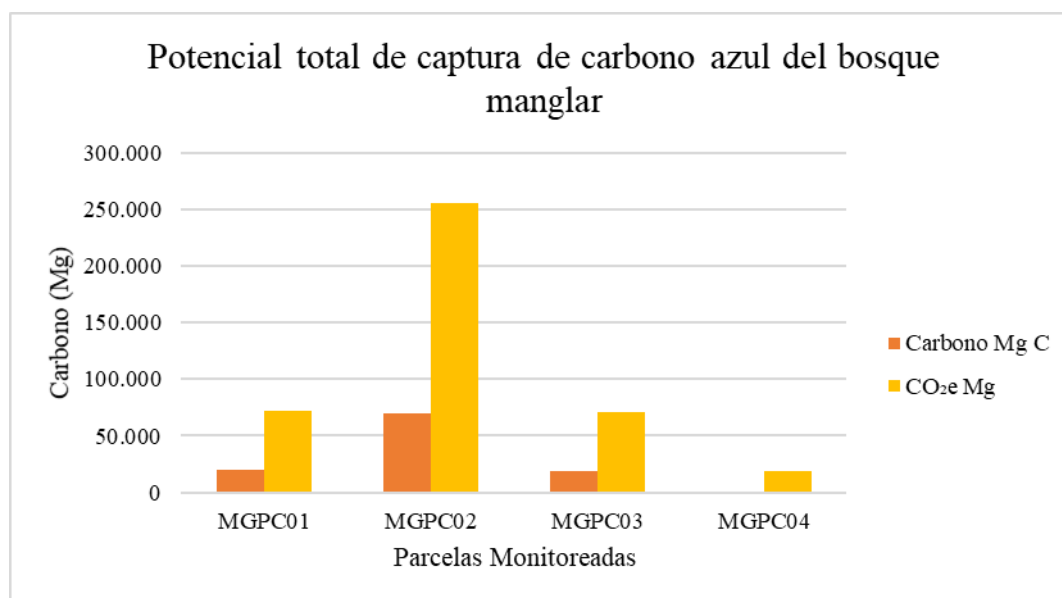
Es así, como a partir de las fórmulas anteriores los resultados obtenidos reflejan el aporte potencial del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia en los procesos de regulación climática y conservación ambiental para lo cual se presentan a continuación:

Tabla 12 Captura de carbono por parcela.

Parcela	Carbono Mg C	CO _{2e} Mg
MGPC01	19.619	72.003
MGPC02	69.542	255.219
MGPC03	19.185	70.411
MGPC04	0,5206	19.107

Fuente: (Autor,2026)

Gráfica 3 Captura de carbono por parcela.



Fuente: (Autor,2026)

Los resultados obtenidos para el carbono almacenado y su equivalencia en dióxido de carbono (CO₂eq) evidencian diferencias importantes entre las parcelas evaluadas del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia, reflejando:

- Para la parcela MGPC02 presentó el mayor potencial de almacenamiento, registrando 69.542 Mg de carbono y una equivalencia de 255.219 Mg de CO₂e, lo cual indica una alta capacidad de retención de carbono atmosférico. Este comportamiento se relaciona directamente con los altos valores de biomasa aérea y subterránea previamente obtenidos en esta parcela, asociados a una mayor densidad y desarrollo estructural de los individuos arbóreos presentes.
- Las parcelas MGPC01 y MGPC03 mostraron valores similares de carbono almacenado, con 19.619 Mg C y 19.185 Mg C respectivamente, así como equivalencias de 72.003 Mg y 70.411 Mg de CO₂e. Estos resultados evidencian que, aunque ambas parcelas presentan diferencias en número de individuos y estructura forestal, mantienen capacidades relativamente cercanas en términos de

almacenamiento de carbono, lo que demuestra la importancia ecológica de los sectores evaluados dentro del manglar.

- Con lo que respecta a la parcela MGPC04 registró el menor valor de carbono almacenado, con 0,5206 Mg C y 19.107 Mg de CO₂e, indicando una menor capacidad de acumulación de carbono en comparación con las demás parcelas. Esta condición puede estar asociada a factores como menor densidad arbórea, individuos con menor desarrollo estructural o posibles condiciones ambientales y de intervención que limitan la productividad del ecosistema en dicho sector.

De manera general, los resultados permiten establecer que las parcelas con mayor biomasa vegetal presentan una mayor capacidad de almacenamiento de carbono y captura potencial de CO₂ atmosférico, confirmando el papel fundamental del bosque manglar como sumidero natural de carbono azul.

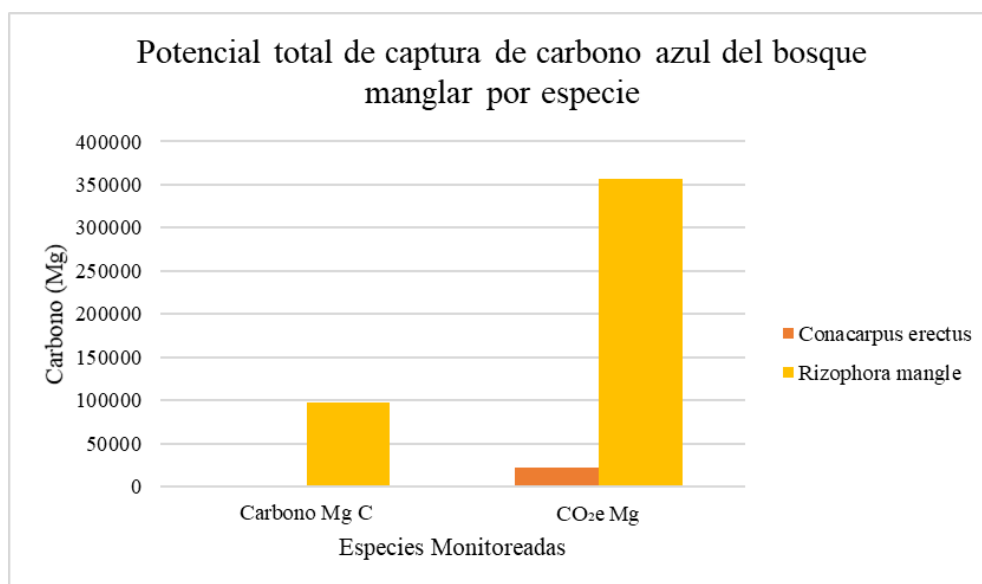
No obstante, también se realizó el análisis de cual es la especie que mayor almacenamiento de carbono para lo cual se obtuvo:

Tabla 13. Captura de carbono por especies

Especie	Carbono Mg C	CO₂e Mg
Conacarpus erectus	0,6143	22.545
Rizophora mangle	97.229	356.830

Fuente: (Autor,2026)

Gráfica 4 Captura de carbono por especie.



Fuente: (Autor,2026)

Los resultados obtenidos por especie evidencian una marcada diferencia en la capacidad de almacenamiento de carbono azul dentro del ecosistema manglar evaluado. La especie * *Rizophora mangle* presentó los valores más altos de carbono almacenado y dióxido de carbono equivalente, registrando 97.229 Mg de carbono y 356.830 Mg de CO₂e, consolidándose como la principal especie contribuyente al potencial de mitigación del cambio climático en el bosque manglar de la playa de Puerto Colombia. Estos resultados se relacionan directamente con la alta abundancia de individuos y los elevados valores de biomasa registrados para esta especie durante el inventario forestal.

Por otra parte, *Conocarpus erectus* presentó valores considerablemente menores, con 0,6143 Mg de carbono almacenado y 22.545 Mg de CO₂e, lo cual refleja una menor participación dentro de los procesos de acumulación de biomasa y almacenamiento de carbono del ecosistema. Esta diferencia puede atribuirse principalmente al reducido número de individuos encontrados en las parcelas evaluadas y a su menor representación dentro de la estructura general del manglar.

7.3. Análisis Del Aporte Del Bosque Manglar A La Mitigación Del Cambio Climático

Los resultados obtenidos durante la investigación permiten evidenciar que el bosque manglar de la playa de Puerto Colombia desempeña un papel fundamental en los procesos de mitigación del cambio climático, debido a su capacidad de almacenar carbono azul tanto en la biomasa aérea como en la biomasa subterránea. A partir de las estimaciones realizadas en las parcelas evaluadas, se determinó que el ecosistema presenta una importante capacidad de retención de carbono atmosférico, reflejada en los valores de carbono almacenado y dióxido de carbono equivalente (CO₂e) registrados durante el estudio.

La alta acumulación de biomasa observada principalmente en la especie *Rizophora mangle* evidencia la eficiencia ecológica del manglar como sumidero natural de carbono, permitiendo reducir la concentración de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera. Asimismo, los resultados muestran que las parcelas con individuos de mayor diámetro y desarrollo estructural poseen una mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono, confirmando la relación directa entre la conservación del ecosistema y su aporte a la regulación climática.

De manera general, el bosque manglar evaluado no solo contribuye al almacenamiento de carbono azul, sino que además cumple funciones ambientales complementarias como protección costera, regulación hídrica, conservación de biodiversidad y estabilización de sedimentos, convirtiéndose en un ecosistema estratégico frente a los efectos del cambio climático en zonas marino-costeras. A continuación, se presenta los aportes que esto puede contribuir al cambio climático:

Tabla 14 Aportes del bosque manglar de Puerto Colombia a la mitigación del cambio climático

Componente del manglar	Aporte identificado	Aporte a la mitigación del cambio climático
Biomasa aérea	Almacenamiento de carbono en troncos, ramas y hojas	Reduce la concentración de CO ₂ atmosférico mediante captura y almacenamiento de carbono.
Biomasa subterránea	Acumulación de carbono en raíces y sedimentos asociados	Favorece el almacenamiento prolongado de carbono azul en el ecosistema.
Especie dominante (<i>Rizophora mangle</i>)	Mayor acumulación de biomasa y carbono	Incrementa significativamente la capacidad de captura de carbono del manglar.
Cobertura vegetal del manglar	Conservación de la estructura ecológica del ecosistema	Contribuye a mantener funciones ecosistémicas relacionadas con regulación climática.
Retención de CO ₂ equivalente (CO ₂ e)	Disminución potencial de gases de efecto invernadero	Aporta a la mitigación del calentamiento global mediante almacenamiento natural de carbono.
Protección costera	Reducción de erosión y estabilización del suelo	Disminuye impactos asociados al aumento del nivel del mar y eventos climáticos extremos.
Regulación hídrica	Control natural de inundaciones y dinámica hídrica	Favorece la adaptación de ecosistemas costeros frente a variaciones climáticas.
Conservación de biodiversidad	Hábitat para flora y fauna asociada	Mantiene el equilibrio ecológico y resiliencia ambiental del ecosistema.
Servicios ecosistémicos	Soporte ecológico y ambiental para la zona costera	Fortalece la sostenibilidad ambiental y climática del territorio.

Fuente: (Autor,2026)

7.4.Propuesta De Recomendaciones Para El Manejo Y Conservación Del Ecosistema

A partir de los resultados obtenidos en la investigación, se evidencia la necesidad de implementar estrategias orientadas a la conservación y manejo sostenible del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia, considerando su importancia ecológica como ecosistema de carbono azul y su aporte a la mitigación del cambio climático. En este sentido, se proponen las siguientes recomendaciones:

⇒ Fortalecimiento De Programas De Conservación Y Restauración

Desarrollar programas de conservación ecológica enfocados en la protección de las áreas con mayor densidad y biomasa vegetal, especialmente aquellas dominadas por *Rizophora mangle*, debido a su alta capacidad de almacenamiento de carbono. Asimismo, se sugiere implementar procesos de restauración ecológica en sectores degradados o con menor cobertura vegetal.

⇒ Control De Actividades Antrópicas

Es importante establecer medidas de control frente a actividades que generen deterioro del ecosistema, tales como disposición inadecuada de residuos, tala no autorizada, rellenos, alteración del flujo hídrico y expansión urbana no planificada, ya que estas acciones disminuyen la capacidad del manglar para almacenar carbono y mantener sus funciones ecológicas.

⇒ Implementación De Monitoreos Periódicos

Realizar monitoreos periódicos de las condiciones estructurales y ambientales del manglar, incluyendo variables relacionadas con biomasa, cobertura vegetal, calidad del suelo y estado fitosanitario de las especies presentes. Esto permitirá evaluar cambios en la capacidad de almacenamiento de carbono y detectar oportunamente procesos de degradación.

⇒ **Educación Y Participación Comunitaria**

Fortalecer procesos de educación ambiental y participación comunitaria orientados a sensibilizar a la población sobre la importancia ecológica de los manglares y su función en la mitigación del cambio climático. La vinculación de comunidades locales puede favorecer acciones de conservación y uso sostenible del ecosistema.

⇒ **Inclusión Del Manglar En Estrategias Climáticas Locales**

El bosque manglar de la playa de Puerto Colombia sea incorporado dentro de programas y políticas locales de adaptación y mitigación del cambio climático, reconociendo su función como sumidero natural de carbono azul y ecosistema estratégico para la sostenibilidad ambiental del territorio.

8. Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar el potencial de captura de carbono azul del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia como estrategia de mitigación del cambio climático, evidenciando la importancia ecológica de este ecosistema costero como reservorio natural de carbono. A partir de la aplicación de modelos alométricos y del análisis de biomasa aérea y subterránea, se determinó que el manglar posee una capacidad significativa de almacenamiento de carbono, contribuyendo a la reducción de dióxido de carbono atmosférico y al fortalecimiento de los procesos de regulación climática.

Los resultados obtenidos demostraron que la biomasa aérea representó el componente con mayor aporte al almacenamiento total de carbono, especialmente en aquellas parcelas donde se registraron individuos con mayores diámetros y mejor desarrollo estructural. De igual manera, la biomasa subterránea evidenció una participación importante dentro de los procesos de acumulación de carbono azul, destacando la relevancia del sistema radicular del manglar en la retención de carbono en ecosistemas costeros.

La parcela MGPC02 presentó los valores más altos de biomasa y carbono almacenado, registrando 69.542 Mg de carbono y 255.219 Mg de CO₂ equivalente, lo cual evidencia que las áreas con mayor densidad arbórea y mejores condiciones estructurales poseen una mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono atmosférico. En contraste, la parcela MGPC04 mostró menores valores de biomasa y carbono, indicando posibles diferencias relacionadas con el estado de conservación, estructura vegetal o condiciones ambientales del sitio.

En cuanto a las especies identificadas, *Rizophora mangle* se consolidó como la especie con mayor relevancia ecológica dentro del ecosistema evaluado, debido a su elevada abundancia y capacidad de acumulación de biomasa aérea y subterránea. Los resultados evidenciaron que esta

especie representa el principal aporte al almacenamiento de carbono azul dentro del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia.

Asimismo, la investigación permitió establecer que el bosque manglar no solo cumple funciones relacionadas con la captura y almacenamiento de carbono, sino que también desempeña un papel fundamental en la protección costera, regulación hídrica, estabilización de sedimentos y conservación de biodiversidad, fortaleciendo su importancia dentro de las estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático.

El estudio evidencia la necesidad de fortalecer acciones orientadas a la conservación y manejo sostenible de los ecosistemas de manglar, reconociendo su valor ambiental, ecológico y climático dentro de las zonas marino-costeras del Caribe colombiano.

9. Recomendaciones

A partir de la presente investigación se presentan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda fortalecer las estrategias de conservación y protección del bosque manglar de la playa de Puerto Colombia, especialmente en aquellas áreas donde se identificaron mayores capacidades de almacenamiento de carbono azul, con el fin de preservar su función ecológica y climática.

Es importante implementar programas de restauración ecológica en sectores degradados o con menor densidad arbórea, promoviendo la recuperación de la cobertura vegetal y el fortalecimiento de especies dominantes como *Rizophora mangle*, debido a su alta capacidad de acumulación de biomasa y carbono.

Se sugiere realizar monitoreos periódicos del ecosistema manglar para evaluar cambios en la estructura vegetal, estado fitosanitario, condiciones del suelo y capacidad de almacenamiento de carbono, permitiendo generar información actualizada para futuros procesos de gestión ambiental y planificación territorial.

Asimismo, se recomienda ampliar futuras investigaciones relacionadas con carbono azul incorporando análisis especializados del carbono orgánico presente en los sedimentos del manglar, debido a que este componente representa uno de los principales reservorios de carbono en ecosistemas costeros.

Se considera necesario promover procesos de educación ambiental y participación comunitaria orientados a sensibilizar a la población sobre la importancia de los manglares en la mitigación del cambio climático, conservación de biodiversidad y protección de zonas costeras.

Se recomienda que las autoridades ambientales y entidades territoriales integren los ecosistemas de manglar dentro de estrategias locales y regionales de adaptación y mitigación del

cambio climático, reconociendo su aporte como sumideros naturales de carbono azul y ecosistemas estratégicos para la sostenibilidad ambiental del territorio.

10. Bibliografía

- Alongi, D. M. (2020). Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation. *sci*, 2(3), 67 - 82. doi:doi:10.3390/sci2030067
- Alongi, D. M. (2022). Impactos del cambio climático en las reservas y flujos de carbono azul en los manglares. *bosques*, 2(13), 149. doi:<https://doi.org/10.3390/f13020149>
- Arenales I, B. D. (2024). acumulacion multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar, Las Lisas-La Barrona en el pacifico sur de guatemala. *Universidad de San Carlos de Guatemala*, 1(1), 1. doi:<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puina/INF-2023-34.pdf>
- Beers L, C. S. (2020). *La contribución de los ecosistemas*. Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) de la Convención sobre los Humedales.
- Benavides J, A. S. (2024). Revisión cienciométrica (1990-2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO₂ y CH₄ de manglares. *Madera y Bosques*, 30(4), 19. doi:doi:10.21829/myb.2024.3042628
- Bernal J, A. L. (2024). Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros. *Ciencias de la tierra*, Vol. 48 Núm. 188. Obtenido de <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/quantifying-colombian-blue-carbon-sinks-from-coastal-mangroves/4453>
- Beselly, S. M., Wegen, M. v., Reyns, J., Grueters⁵, U., Dijkstra, J. T., & Roelvink., D. (2025). Strategic mangrove restoration increases carbon stock capacity. *communications earth & environment.*, 6, 422. doi:<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02401-2>

- Bolaños R, B. M. (2025). Cobertura, estructura vegetal y almacenamiento de carbono del manglar de Morales, Puntarenas, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 73(s1), 2215-2075. doi:<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v73iS1.64042>
- Carmona J, U. J. (2024). Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistemas de manglar en Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 2(53), 103 - 132. doi:<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1308>
- Chih Hung H, C. T. (2024). A Review: CO₂ Utilization. *Aerosol and Air Quality Research*, Volume 14, pages 480–499. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.2013.10.0326>
- Choudhary B, D. V. (2024). Carbono azul y el papel de los manglares en la captura de carbono: sus mecanismos, estimación, impactos humanos y estrategias de conservación para incentivos económicos. *Revista Investigación Marina*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase., A. S. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*, 199(1), 1 - 22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Cisneros-de la Cruz, D. J.-S.-H.-G.-M.-M.-C.-M.-M.-P.-C. (2021). Manual para la medición, monitoreo y reporte del carbono y gases de efecto invernadero en manglares en restauración. *A multi-level approach (SWAMP)*. Obtenido de https://corescam.org/wp-content/uploads/2021/05/Manual-captura-de-carbono-en-manglares-y-reporte-de-GEI_Abril2021.pdf
- Costa, M. D., & Macreadie., P. I. (2022). The Evolution of Blue Carbon Science. *Wetlands*, 42(109). doi:<https://doi.org/10.1007/s13157-022-01628-5>

Daniel A. Friess, K. R. (2019). El estado de los bosques de manglares del mundo: pasado, presente y futuro. *Annual Review Environment and Resources*, 44:89-115.

doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>

García, Y., & castillo., D. V. (2018). Estado de conservación de los manglares del caribe colombiano y su potencial en productos forestales no maderables. *CITAS*, 4(7), 95 - 103.

doi:<https://doi.org/10.15332/24224529.5308>

Guo C, P. S. (2024). Factors influencing mangrove carbon storage and its response to environmental stress. *Frontiers in Marine Science*, 11(1), 1 - 15. doi:doi:

10.3389/fmars.2024.1410183

Gutierrez G, R. H. (2022). FLUJOS E INVENTARIOS DE CARBONO AZUL EN MANGLARES ASOCIADOS A UNA LAGUNA COSTERA ANTROPIZADA.

geofísica internacional, 60(1), 13 - 30.

doi:<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2011>

Hernández Narváez, D. T. (2023). Adaptación basada en ecosistemas y carbono azul en la gestión del cambio climático del gran Caribe. *Revista Colombiana de Geografía*, 32(1), 70-87.

doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.90964>

Howard J, G. A. (2023). Blue carbon pathways for climate mitigation: Known, emerging and unlikely. *Marine Policy*, 156(788), 105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105788>

INVEMAR. (2025). *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR* . Obtenido de Guía metodológica para la estimación de carbono azul en manglares de Colombia:

<https://alfresco.invemar.org.co/share/s/mtpFiizbT8-ToqAQzYoQqA>

IPCC. (2023). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge

University Press. Obtenido de [https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-](https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD)

[2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD](https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD)

L, B., S, S. C., & S., F. (16 de junio de 2020). *Ramsar La Convención sobre los Humedales*.

Obtenido de Ramsar La Convención sobre los Humedales:

https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn12_blue_carbon_ccmitigation_s.pdf

Libreros., J. F. (2025). Estimación de la incorporación de la materia foliar en sedimentos de manglar utilizando bolsas de té verde. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 54(1), 93 - 112 . doi:<https://doi.org/10.25268/bimc.invemmar.2025.54.1.1323>

Macreadie, P. A. (2019). El futuro de la ciencia del carbono azul. *Nat Commun*, 3998. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>

Minambiente. (1 de junio de 2022). www.minambiente.gov.co. Obtenido de [www.minambiente.gov.co: https://www.minambiente.gov.co/asuntos-marinos-costeros-y-recursos-acuaticos/carbono-azul/?utm_source=chatgpt.com#tabs-1](https://www.minambiente.gov.co/asuntos-marinos-costeros-y-recursos-acuaticos/carbono-azul/?utm_source=chatgpt.com#tabs-1)

Miniambiente, I. (2019). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MINAMBIENTE Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM*. Obtenido de PROPUESTA DE NIVEL DE REFERENCIA DE LAS EMISIONES FORESTALES POR DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA PARA PAGO POR RESULTADOS DE REDD+ BAJO LA CMNUCC:

https://redd.unfccc.int/files/02012019_nref_colombia_v8.pdf

Ministerio de Medio Ambiente . (1995). *Resolucion 1602 de 1995*.

https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Manglares/080811_res_1602_1995.pdf.

Moreno Muñoz, A. (2023). Evaluación de almacenamiento de carbono azul en el ecosistema de manglar del Pacífico nariñense. *Universidad Nacional de Colombia*.

Muñoz, A. S. (2022). Evaluación de almacenamiento de carbono azul en el ecosistema de manglar del Pacífico nariñense. *Universidad Nacional de Colombia*, 1(1), 81.
doi:<https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/48b51dec-6714-4f97-b01f-dffc1d41190e/content>

Narváez D, D. J. (2022). Adaptación basada en ecosistemas y carbono azul en la gestion del cambio climatico del grann caribe. *Revista Colombiana de Geografía*, 1(32), 70 - 87.
doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.90964>.

O, J. B., A, L. P., A, V. I., Domínguez, S. V., González, M. F., Agudelo, J. E., & Rozo., J. I. (2024). Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*, 48(188), 658 - 670. doi:doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2585>

ONU. (2022). *Causas y efectos del cambio climático*. Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

RAP pacífico. (2020 de agosto de 19). *Region Administrativa y de Planeacion*. Obtenido de Region Administrativa y de Planeacion: <https://rap-pacifico.gov.co/wp-content/uploads/2020/08/SERVICIOS-ECOSISTÉMICOS.pdf>

Republica de colombia . (1974). *Decreto-Ley 2811 de 1974*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>.

Republica de Colombia . (1993). *Ley 99 de 1993*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>.

Republica de Colombia . (2018). *Ley 1931 de 2018*.
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765&utm_source=chatgpt.com.

Republica de Colombia . (2022). *ley 2243 de 2022*. <https://www.suin-juricol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30044409>.

Republica de Colombia. (2021). *Ley 2169 de 2021*. <https://www.suin-juricol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043747>.

UNAL. (06 de Enero de 2023). Manglares en Colombia, aliados para mitigar el cambio climático. *Medio ambiente*. doi:<https://periodico.unal.edu.co/articulos/manglares-en-colombia-aliados-para-mitigar-el-cambio-climatico>

UNIR . (14 de agosto de 2023). *colombia.unir.net*. Obtenido de colombia.unir.net: <https://colombia.unir.net/actualidad-unir/legislacion-ambiental/>

Villanueva, E. E., & Blanco, D. D. (2024). *ANÁLISIS FÍSICO-ECOSISTÉMICO DEL BOSQUE MANGLAR DE LA PLAYA DE PUERTO COLOMBIA Y SU CONTRIBUCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO*. Corporacion Universitaria Reformada.

Wirabuana, P. Y., Baskorowati, L., Pamungkas, B., Mulyana, B., South, J., Purnobasuki, H., . . . Hasan., V. (2025). Mangroves, fauna compositions and carbon sequestration after ten years restoration on Flores Island, Indonesia. . *scientific reports*, 15, 48 - 66. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-87307-x>