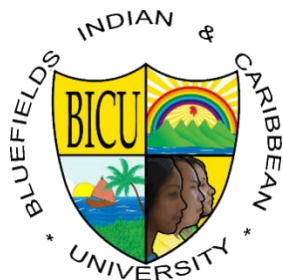


BLUEFIELDS INDIAN & CARIBBEAN UNIVERSITY BICU



Área específica RRNN

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL ENFOQUE CUANTITATIVO

Secuestro de Carbono en suelos de mangle Rojo (*Rhizophorae mangle*) con relación a la composición estructural y salud del bosque de mangle en las comunidades de Orinoco y La Fe, territorio de Laguna de Perlas 2024-2025

Autores:

MSc. Crista Stubb Cuthbert ¹

MSc. Sheilon Lopez Zenon ²

MSc. Rene Romero Ebanks³

Douglassa Josetp Bermudez Gutierrez ⁴

Greibin Levinston Taylor Calderon ⁵

Bluefields, Costa Caribe Sur, Nicaragua
2024-2025

“La Educación es la Mejor Opción para el Desarrollo de los Pueblos”

¹ Líder de la investigación

² Miembro del equipo

³ Miembro del equipo

⁴ Tesista o colaborador

⁵ Tesista o colaborador

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
I. INFORMACIÓN GENERAL.....	6
1.1. Recepción y resolución	6
1.2. Objetivo de desarrollo sostenible (ODS)	¡Error! Marcador no definido.
1.3. Datos generales del investigador principal.....	6
1.4. Identificación del Proyecto de Investigación.....	9
II. INTRODUCCIÓN	10
2.1. Antecedes y contexto del Problema.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. Pregunta de Investigación.....	15
2.3. Objetivos.....	15
a. General	15
b. Específicos	15
2.4. Justificación.....	16
2.5. Limitaciones y riesgos	17
2.6. Variables.....	17
2.7. Hipótesis	17
III. MARCO TEÓRICO	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Estado del arte	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Teorías y conceptos asumidos.....	¡Error! Marcador no definido.
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	24
4.1. Área de localización del estudio	¡Error! Marcador no definido.
4.2. Tipo de estudio según el enfoque, amplitud o periodo ..	¡Error! Marcador no definido.
4.3. Población y muestra	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1. Tipo de muestra y muestreo	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2. Técnica e instrumento de la investigación.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4. Diseño Experimental	¡Error! Marcador no definido.
4.4.1. Técnica de Recolección de Datos.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4.2. Confiabilidad y validez de los instrumentos ..	¡Error! Marcador no definido.
4.5. Operacionalización de la variable	¡Error! Marcador no definido.
4.6. Análisis de datos	29
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
VI. CONCLUSIONES	37
VII. RECOMENDACIONES	39
VIII. REFERENCIAS.....	40
IX. ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.



ÍNDICE DE TABLAS



INDICE DE FIGURAS

RESUMEN

Se determinó el secuestro de carbono en tres ecosistemas de manglares en el municipio de Laguna de Perlas. A pesar de los servicios ecosistémicos de los manglares en las comunidades de estudio, se encuentran amenazados por factores ambientales y antropogénicos, que lamentablemente a menudo resulta en una sobreexplotación de los recursos que conlleva efectos desestabilizadores y en detrimento de la salud ambiental. La investigación, se llevó a cabo en un área de 0.25 ha por comunidad, donde se establecieron transeptos lineales de 250m de largo y 10m de ancho y subdividido en 3 parcelas de 20 m x 40 m, con una distancia de 33 m entre cada parcela. En cada parcela se realizó una caracterización de los ecosistemas, muestreo de suelo a diferentes profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm), las cuales fueron analizadas en laboratorio, mediante el método de Pérdida Por Ignición (LOI por sus siglas en inglés), pudiendo determinar la concentración de carbono secuestrado en cada uno de los perfiles de suelos muestreados, y posteriormente el stock de carbono por área. Resultado de esta investigación revelan que los manglares a temprana edad actúan como un importante sumidero de carbono en todo el perfil del suelo. Las reservas de carbono orgánico del suelo en función de la estructura del manglar fueron de 706 kg/ha, a 2,323 kg/ha, Con máximo valores reportados en Marshall Point y menores en Orinoco, esta tasa de carbono depende en gran medida de las condiciones específicas del sustrato y la composición estructural del ecosistema.

Palabras claves: Secuestro de Carbono, Cambio Climático, Mangle rojo,

ABSTRACT

Carbon sequestration was determined in three mangrove ecosystems in the municipality of Laguna de Perlas. Despite the ecosystem services provided by mangroves in the study communities, they are threatened by environmental and anthropogenic factors, which unfortunately often result in overexploitation of resources, leading to destabilizing effects and detrimental environmental health. The research was conducted in an area of 0.25 ha per community, where linear transects 250 m long and 10 m wide were established and subdivided into three 20 m x 40 m plots, with a distance of 33 m between each plot. In each plot, ecosystem characterization was performed, and soil samples were taken at different depths (0-20 cm, 20-40 cm, and 40-60 cm). These samples were analyzed in the laboratory using the Loss on Ignition (LOI) method, allowing the determination of the concentration of carbon sequestered in each of the sampled soil profiles and, subsequently, the carbon stock per area. The results of this research reveal that early-stage mangroves act as a significant carbon sink throughout the soil profile.

Soil organic carbon reserves, depending on mangrove structure, ranged from 706 kg/ha to 2,323 kg/ha, with the highest values reported in Marshall Point and the lowest in Orinoco. This carbon rate depends largely on the specific substrate conditions and the structural composition of the ecosystem.

Keywords: Carbon sequestration, Climate change, Red mangrove

I. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Recepción y resolución

Uso interno de la Dirección de Investigación y Postgrado			
Fecha de recepción	Resolución	Fecha de resolución	Inicio del proyecto

1.2. Eje, lineamiento y acción de la Estrategia Nacional de Educación

Eje 7: Cambio Climático
Lineamiento:
Promoveremos la investigación e innovación para la generación de propuestas de mitigación y adaptación a la crisis climática.
Acción
Proyectos de investigación e innovación para la adaptación y mitigación ante los efectos del cambio climático.

1.3. Datos generales del investigador principal

Datos Generales del Investigador Principal
Nombres y Apellidos: Crista Solangie Stubb Cuthbert
Facultad/Departamento/Escuela: Área específica de Recursos Naturales
Número de Teléfono:
Número de Celular: 58614271
Correo electrónico institucional: crista.stubb@bicu.edu.ni
ORCID (obligatorio): 0009-0003-8414-4270
Formación Académica: Master en Ciencias Ambientales



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL

1.4. Identificación del Proyecto de Investigación

Título del Proyecto de Investigación:

Fecha de Inicio: **Fecha de Finalización:** **Duración (en meses):**

Área del conocimiento de BICU	Ciencia y Tecnología	x
Áreas del Conocimiento adoptadas por el Consejo Nacional de Evaluación y Acreditación (CNEA)	Educación Administración de empresas y Derecho Ciencias Naturales Matemática y estadística Tecnología de la Información y la Comunicación (TIC) Arte y Humanidades Agricultura, silvicultura, pesca y Veterinaria Salud y bienestar Ingeniería, Industria y Construcción Ciencias Sociales, Periodismo e Información Servicios	

Línea (s) de Investigación: *(Indique al menos una I)*

II. INTRODUCCIÓN

Diferentes estudios han demostrado el importante rol que juegan los suelos de manglares como sumideros naturales y como depósito de carbono más importante a nivel mundial. Según Lal., 2008, los suelos orgánicos pueden actuar como fuentes o sumideros de bióxido de carbono atmosférico dependiendo de las prácticas de uso de suelo, el clima, la textura y la topografía. Por ejemplo, el clima tiene un efecto pronunciado en la concentración de carbono subterráneo. Entre los factores climáticos importantes se incluyen la precipitación, la evapotranspiración potencial (PET) y la relación entre la PET y la precipitación anual. Asimismo, el fuego, natural o controlado, también es una perturbación importante que puede afectar a las reservas de carbono del suelo durante un largo período después del evento.

Por su parte, (Kauffman, 2014) , con el objetivo de cuantificar las reservas de carbono del complejo de ecosistemas de manglares más grande de la República Dominicana, señala que los depósitos medios de C del suelo para los manglares altos, medianos y bajos fueron 546, 1084 y 713 Mg C/ha, respectivamente. Los suelos relativamente más profundos junto con una mayor concentración de C resultaron en depósitos de C más altos en los manglares medianos en comparación con los altos ($P < 0,001$). Estas diferencias se deben a las condiciones geomorfológicas de los sitios, ya que los manglares altos están en el borde del agua y probablemente son más jóvenes y están sujetos a mayores perturbaciones por mareas de tormenta e inundaciones.

Un estudio realizado por (Adame, 2013), acerca del Stock de Carbono en el paisaje kárstico del Caribe mexicano, señala que las reservas de carbono del ecosistema de los manglares del Caribe de México son de 287 Mg/ha para los manglares bajos, 546 Mg/ha para los manglares medianos y 914 Mg/ha para los manglares altos.

(Adame M. F., 2015), realizó otro estudio de stock de Carbono en Chiapas México, pudiendo determinar que la variabilidad de las reservas de C dentro de los manglares en el sitio de Muestreo fue mucho menor en el estuario superior (rango 744–912 MgC ha⁻¹) en comparación con el estuario intermedio e inferior (rango 537–1115 MgC ha⁻¹), como resultado de las diferencias en las fuerzas geomorfológicas. Los manglares en el estuario superior han crecido en un entorno relativamente estable que permitió que el carbono

quedara enterrado y que los bosques se desarrollaran hasta alcanzar un estado maduro. Comparativamente, los manglares en el estuario inferior están expuestos a cambios frecuentes en la hidrología y la sedimentología y son afectados directamente por tormentas tropicales.

Con el propósito de examinar la variedad de reservas de carbono en los manglares a escala de paisaje,

Bhomia 2016, cuantificó las reservas de carbono de los manglares Hondureños a lo largo de las costas del Pacífico y el Caribe y las Islas de la Bahía. También examinó las diferencias en las reservas de carbono de los ecosistemas debido al tamaño y la estructura de la vegetación de manglares. Como resultado, determino que las reservas de carbono del ecosistema oscilaron entre 570 Mg C ha⁻¹ en la costa del Pacífico y *1000 Mg C ha⁻¹ en la costa del Caribe y las Islas de la Bahía. Asimismo, demostró que las reservas de C del ecosistema en función de la estructura del manglar fueron de 1200, 800 y 900 Mg C ha⁻¹, en manglares bajos, medianos y altos, respectivamente. Esta variabilidad en la densidad y estructura de los árboles de manglares representa diferencias en las características de los lugares muestreados, como los entornos geomorfológicos, las precipitaciones, las mareas y la disponibilidad de agua dulce y nutrientes.

A nivel regional son pocos los estudios realizados en ecosistemas de mangle, con el objetivo de contribuir al conocimiento de la situación de los recursos naturales de las zonas desde la perspectiva del valor actual de los ecosistemas; de su integridad y sus potencialidades naturales;

(González, 1997), a través de un diagnóstico Ecológico de las zonas Costeras de Nicaragua, señala que los bosques de manglares en Laguna de Perlas están dominados principalmente por *Rhizophora mangle* (mangle rojo), especie que fue registrada como frecuentemente distribuida a nivel regional a lo largo de la costa Caribe y Pacífica de Nicaragua. Especie considerada más tolerante a altas concentraciones de salinidad y sustrato inundado además representa una fuente importante de alimento, refugio y hábitat para al menos 32 especies de peces e invertebrados. No obstante, debido a su ubicación en la primera franja del bosque de manglares, *R. mangle* se considera la especie más vulnerable a las perturbaciones naturales que modifican en gran medida las características fisiológicas de los manglares.

Un estudio específico en la Laguna de Perlas realizado por Rivera et al. (2021) determinó que los suelos de los manglares de esta región presentan un contenido de carbono orgánico superior al de otros ecosistemas terrestres, debido a la constante deposición de materia orgánica y la baja tasa de descomposición. Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan amenazas como la deforestación, la contaminación y el desarrollo costero, lo que podría comprometer su capacidad de almacenamiento de carbono.

Hasta la fecha, es mínimo estudio sobre secuestro de carbono en manglares en el municipio de Laguna de Perlas. Recientemente, Stubbs 2019 realizó un estudio de secuestro de Carbono en relación a diferentes especies de manglares en 7 comunidades del municipio de Laguna de Perlas. Obteniendo como resultado que los sedimentos de manglares contienen considerables reservas de carbono que oscilan entre 3,44–20,84 kg/m²; y que en comparación de cuatro especies de manglares *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* and *Peliciera rhizophorae*; suelos dominados por la especie de *Rhizophora mangle* contenían el carbono más alto. Esto se debe al complejo sistema de raíces aéreas y la capa de lodo anóxica e inundada predominante en los sitios dominados por *Rhizophora mangle*, los cuales tienen un efecto positivo en la conservación de la materia orgánica, debido al lento proceso de descomposición.

Por otra parte, a nivel regional, se han llevado a cabo diferentes proyectos para crear conciencia sobre el uso sostenible de los ecosistemas costeros, como esfuerzos de adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático. IBEA-BICU en consorcio con HORIZONT 3000, (2012-2014) reforestó 2.5 ha. de manglares en “Puerto el Bluff” y el municipio de Corn Island. De manera similar, un proyecto reciente de ecosistemas marinos por parte de IBEA-BICU (2019), ha reforestado 6.1 hectáreas de manglares en 11 comunidades y 4 cayos dentro del municipio de Laguna de Perlas, (de los cuales se incluyen los sitios de estudio; Haulover, Raitipura, Awas, San Vicente, La Fe, Pearl Lagoon, Kahkahbila), como parte de sus objetivos para contribuir a la recuperación del bosque de manglares en este municipio.

IBEA BICU 2022-2025, continúa desarrollando esfuerzos climáticos a través del establecimiento de viveros de manglares y posteriormente jornadas de reforestación participativas en los territorios de Laguna de Perlas, Tasba Pounie, Awaltara, Rama Kriol,

y el municipio de Corn Island. Pudiendo reforestar un área total de 50 ha de bosques de manglares.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar científicamente el impacto ambiental de estas iniciativas de reforestación, particularmente en relación a los servicios ecosistémicos que ofrecen los manglares, como es la de captura de carbono. Este tipo de análisis no solo complementa los esfuerzos prácticos de restauración impulsados por IBEA BICU, sino que también sirve como una base para futuras investigaciones.

2.1. Contexto del Problema

Desde la era preindustrial a la actualidad, las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera han aumentando lentamente a alrededor de 5 gigatoneladas por año a mediados del siglo XIX. Debido a este aumento y sus posibles impactos, es necesario comprender el proceso de secuestro de carbono dentro de los ecosistemas terrestres y su esfuerzo para mitigar el Cambio Climático.

Los manglares en particular son ecosistemas costeros, considerados como un “importante recurso de carbono azul”, reconocido internacionalmente como una herramienta esencial para contribuir a la mitigación del cambio climático. Se consideran los humedales más productivos del mundo con una rápida tasa de secuestro (Alongi, 2012) y un gran almacenamiento de carbono en sus suelos que tiene un alto potencial de sumidero de carbono y, por lo tanto, contribuye a una reducción y almacenamiento seguro del CO₂ que de otra manera permanecería en la atmósfera (FAO, 2017). Contienen en promedio 1.023 Mg de carbono por hectárea, lo que representa el 98 % del carbono total almacenado en su ecosistema. Por lo tanto, los manglares se consideran los bosques más ricos en carbono de los trópicos (Donato, 2011). No obstante, a menudo se pasa por alto el rol importante que desempeña en el proceso de secuestro y almacenamiento de CO₂. Este último se debe en muchas ocasiones a la falta de conocimiento sobre el importante rol que juegan los ecosistemas de manglares en la lucha contra del Cambio Climático. Específicamente, en el territorio de Laguna de Perlas, donde conocimiento de este servicio ecosistémico es poco explorado.

En el contexto de nuestra región, donde los manglares son fundamentales para la protección costera y los medios de vida locales, la degradación de estos ecosistemas podría tener consecuencias negativas no solo para el clima, sino también para las comunidades de Orinoco y La fe que dependen de ellos como medio de subsistencia y protección costera, lo que resalta la importancia de comprender su contribución al almacenamiento de carbono. Sin embargo, la falta de estudios específicos en esta región deja un vacío crítico en el conocimiento sobre el potencial de captura de carbono en bosque reforestado.

Sumado a lo antes mencionado, es importante resaltar que debido a sus características geográficas (zonas costeras muy bajas, propensas a inundaciones), climáticas (frecuentemente expuesta a fenómenos meteorológicos como tormentas y huracanes) y socioeconómicas (14 de 20 municipios presentan índices de desarrollo humano $<0,5$), la costa caribe de Nicaragua es vulnerable a los efectos del Cambio Climático, y las comunidades del territorio de Laguna de Perlas no es una excepción. Las afectaciones del Cambio Climático han manifestad en continua erosión costera severa, pérdida de biodiversidad, e infraestructura. Ante esta situación, es imperante desarrollar investigaciones que demuestre el potencial de secuestro de carbono de los manglares como una estrategia rentable y amigable con el medio ambiente, en la lucha contra los efectos adversos del Cambio Climático.

2.2. Pregunta de Investigación

2.3. Objetivos

a. General

Cuantificar el secuestro de carbono en suelos de manglar en relación a la composición estructural de dos ecosistemas de mangle rojo en las comunidades costeras de Orinoco y La Fe.

b. Específicos

Caracterizar el ecosistema de mangle seleccionados en términos de composición estructural y salud en las comunidades de Lafe y Orinoco.

Determinar la concentración de CO₂ almacenado en suelos de mangles rojo (*Rhizophorae mangle*) en las comunidades de Lafe y Orinoco.

Determinar el stock de carbono subterráneo en relación a la composición estructural del bosque de mangle rojo en Lafe y Orinoco.

2.4. Justificación

La presente investigación se considera fundamental para comprender y abordar esfuerzos de mitigación y adaptación al Cambio Climático que proporcionan los manglares, debido a que estos ecosistemas se encuentran entre los más eficientes en la captura y almacenamiento de carbono a largo plazo, lo que los convierte en un recurso clave para mitigar las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂). Su importancia también radica en la multifuncionalidad del mangle rojo, que no solo captura carbono, sino que protege las costas contra la erosión y mantiene la biodiversidad marina de nuestras comunidades

A pesar de que los ecosistemas terrestres han sido ampliamente reconocidos por su capacidad para la captura de carbono, existen pocos estudios sobre el almacenamiento de carbono en ecosistemas de manglar a nivel regional, siendo que esta función constituye uno de los principales servicios ambientales que pueden ofrecer.

No hay que obviar que comunitarios de Laguna de Perlas, son beneficiarios directos de los bienes y servicios ambientales que brindan los ecosistemas de manglares, entre los que se encuentran la extracción de madera para uso doméstico (madera para construcción, leña y aparejos de pesca), las barreras costeras frente a fenómenos naturales/desastres y la provisión de hábitats para variedades de especies acuáticas, que incrementan la disponibilidad de recursos acuáticos para la pesca y sustentan el sustento de las comunidades costeras.

A pesar de sus principales servicios, los ecosistemas de manglares en el área de estudio han sido altamente influenciados por actividades antropogénicas y no se les ha dado la atención que merecen. y conocimiento sobre su potencial como sumideros naturales de carbono es relativamente nuevo en el área de estudio.

2.5. Limitaciones y riesgos

Tabla 1: Limitaciones y Riesgos de la investigación

Limitantes	Acciones para corrección	Medios
Escasez de información sobre estudios relacionados a la captación de carbono en la región	Realizar más investigaciones de este tipo	Hacer uso de base de datos científicos ya existentes
Falta de instrumento moderno para determinar con exactitud contenido de carbono	Implementar el método de Perdida Por Ignición (LOI)	Adquisición de instrumento TOC Anallizer
Muestreo realizado únicamente en un periodo determinado	Establecer monitoreo a largo plazo	Se requiere de fondos para hacer la evaluación en diferente temporada (verano e invierno)
Variabilidad en la supervivencia de las plántulas	Monitoreo sistemático	Bitácora de campo

2.6. Variables

- Altura
- Diámetro a la Altura de Pecho (DAP)
- Salud Ambiental del ecosistema
- Carbono secuestrado

2.7. Hipótesis

H0: No existe diferencia significativa entre la captura de carbono del suelo del bosque del mangle rojo *Rhizophora mangle* de la comunidad de Orinoco y La fe del municipio de Laguna de perlas.

H1: Si existe diferencia significativa entre la captura de carbono del suelo del bosque del mangle rojo *Rhizophora mangle* de la comunidad de Orinoco y La fe del municipio de Laguna de perlas.

III. ESTADO DEL ARTE

Generalidades y Servicios ecosistémicos de los manglares

Los manglares son bosques leñosos distribuidos a lo largo de la costa en zonas tropicales y subtropicales, generalmente dominados por una o pocas especies de árboles de manglares (Donato, 2011). Se estima que la superficie global cubierta por bosques de manglares a lo largo de las costas del mundo es de aproximadamente 138, 000 km² (Rull, 2022). Esta área representa una pequeña fracción del bosque tropical. Las especies de árboles de manglares tienen un patrón biogeográfico globalmente heterogéneo, como se manifiesta en la notable distribución asimétrica de la riqueza de especies, con máximos en la región del Indo-Pacífico Occidental (IWP) y mínimos en el área del Atlántico, Caribe y Pacífico Oriental (ACEP o AEP (Rull, 2022).

Actualmente, los manglares del Caribe están dominados por siete especies de árboles formadores de manglares correspondientes a cinco géneros y cuatro familias: *Rhizophora mangle* L., *R. harrisonii* Leechm., *R. racemosa* G. Mey (Rhizophoraceae), *Pelliciera rhizophorae* Planchon & Triana (Tetrameristaceae), *Avicennia germinans* L. (Acanthaceae), *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. F. y *Conocarpus erectus* L. (Combretaceae).

Los manglares son especies adaptada a desarrollarse en suelos inundados, salados y anóxicos (Kathiresan, 2001). La arquitectura de los bosques de manglares está determinada por las partes aéreas y sumergidas de unas pocas especies de árboles características, conocidas como árboles formadores de manglares, que configuran una multitud de hábitats y nichos ecológicos que son ocupados por una gran diversidad de organismos terrestres y marinos. El ecosistema está completamente organizado, tanto estructural como funcionalmente, alrededor de estas especies de árboles de manglar, sin las cuales estos ecosistemas no existirían.

La franja de manglares influye en gran medida en los ambientes terrestres y marinos adyacentes al contribuir al mantenimiento de una alta biodiversidad y al mejorar la

complejidad ecológica en el ecotono terrestre-marino (I. Nagelkerken S.J.M. Blaber b, 2008) .Además, los bosques de manglares son bien conocidos por proporcionar hábitats de crianza únicos para muchas especies marinas. Las etapas juveniles de estas especies prosperan dentro de la compleja estructura que forman las raíces aéreas de los árboles de manglar, donde se favorece la supervivencia al maximizar la disponibilidad de alimentos y minimizar la incidencia de la depredación (Laegdsgaard y Johnson, 2001). Asimismo, desempeñan un papel ecológico y socioeconómico importante al proporcionar alimentos y agua limpia (al filtrar contaminantes químicos y orgánicos del agua) y, por lo tanto, contribuyen al mantenimiento de la calidad del agua, la regulación de la composición del suelo, y la reducción de riesgos (Murdiyarso, 2009). Uno de los servicios importantes que brindan los manglares, que se desarrollará más a fondo en esta investigación, es su papel clave como sumidero de carbono a través del secuestro de CO₂ atmosférico.

Los manglares son considerados como los humedales más productivos del mundo con una rápida tasa de secuestro (Alongi, 2012) y un gran almacenamiento de carbono en sus suelos que tiene un alto potencial de sumidero de carbono y, por lo tanto, contribuye a una reducción y almacenamiento seguro del CO₂ que de otro modo permanecería en la atmósfera. Son considerados como un componente desproporcionadamente importante en el ciclo global del carbono y en la regulación del clima tanto local como global. Reconocidos como un “importante recurso de carbono azul”, el cual es reconocido internacionalmente como una herramienta esencial para contribuir a la mitigación del Cambio Climático. Contienen en promedio 1,023 Mg de carbono por hectárea, lo que representa el 98 % del carbono total almacenado en su ecosistema (Taillardat, 2018).

Rol de los suelos y tipo de especies de Manglares en el proceso de secuestro de Carbono

El suelo es el depósito de carbono más importante a nivel mundial (Lehmann, 2015) y los suelos de humedales pueden contener hasta 200 veces más carbono que la vegetación asociada (Lal, 2008).

Los suelos de los manglares en humedales tropicales son capas formadoras de turba, a través de la acumulación de materia orgánica (Middleton, 2016) originada a partir de tejidos en descomposición de la biomasa aérea. Esta capa alcanza hasta 10 m de espesor, lo que facilita la acumulación de alta concentración de carbono a lo largo del perfil del suelo. Debido a las características únicas de su suelo, salinidad, inundaciones frecuentes y condiciones anóxicas, el carbono almacenado en los suelos de manglares puede resistir la descomposición y, por lo tanto, representa un sumidero de carbono considerable a largo plazo, lo que a diferencia de lo que ocurre en los ecosistemas terrestres, es un proceso que podría continuar a lo largo de milenios (Mitra, 2014).

El contenido de carbono del suelo en los bosques de manglares es de cuatro a ocho veces mayor que en cualquier otro ecosistema terrestre (Huang, 2018) y generalmente se caracteriza por la acumulación de sedimentos (Eagle et al., 2004), que podrían distribuirse en un perfil de suelo de profundidad significativa (Chmura et al., 2003). La formación y deposición de raíces desempeña un papel crucial en la distribución vertical de la materia orgánica en el suelo de los manglares (Middleton y Mckee, 2016), ya que da forma al perfil de profundidad de la fracción lábil de carbono orgánico (Schrumpf et al., 2013).

Tipos de especies de manglares.

Cabe destacar que el secuestro de carbono depende tanto del tipo como de la diversidad de especies de manglares.

Rol de los manglares en el proceso de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático

En los últimos años, el consumo de combustibles fósiles para el transporte, la industria y la agricultura ha provocado altas emisiones de contaminantes como CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), que han tenido graves efectos negativos sobre el medio ambiente, la contaminación y el cambio climático (Bhavesh Choudhary, 2024). Debido a que los ecosistemas naturales tienen la capacidad de almacenar una cantidad significativa de emisiones de carbono, su expansión se considera un componente crucial de la solución.

Los manglares son fundamentales para reducir las emisiones de GEI causadas por las actividades humanas, incluidas la deforestación, la agricultura y las operaciones industriales. Para mitigar el cambio climático, es necesario eliminar el CO₂ del medio ambiente. Las plantas de manglares absorben el carbono en su biomasa aérea y subterránea.

Según Maiti y Chowdhury (2013), las emisiones de carbono son la principal causa del cambio climático y el calentamiento global. Con el aumento gradual de las industrias, la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y otros GEI atmosféricos ha aumentado gradualmente.

El aumento de las temperaturas atmosféricas causado por las altas cantidades de CO₂ en la atmósfera tiene una serie de efectos negativos sobre el ecosistema. Según Farrelly et al. (2013), esto da lugar al derretimiento del hielo polar, el aumento del nivel del mar, el cambio climático y las condiciones meteorológicas extremas. La reducción del consumo energético mundial, el desarrollo de combustibles con bajas emisiones de carbono o sin emisiones de carbono y el secuestro de CO₂ de fuentes puntuales o del medio ambiente mediante métodos naturales y de ingeniería se consideran tres opciones para reducir las emisiones de CO₂ y combatir el cambio climático (Schrag, 2007).

El procedimiento de eliminar CO₂ de la atmósfera, capturarlo y luego almacenarlo se conoce como secuestro de carbono. Los manglares son los ecosistemas más ricos en

carbono del mundo. Por ello, que desempeñan un papel en la regulación y mitigación del cambio climático al absorber y secuestrar cantidades significativas de carbono, principalmente en los suelos, para compensar las emisiones antropogénicas de CO₂ (Alongi, 2022).

Después de ser depositado en un hábitat de carbono azul, el carbono puede tener tres posibles resultados: puede ser descompuesto por microbios y asimilado en nueva biomasa; puede ser respirado nuevamente en CO₂ por microbios; o el Corg particulado o disuelto puede estar en una forma en la que no puede ser utilizado por microbios y puede contribuir al stock de carbono a largo plazo (Bhavesh Choudhary, 2024).

Se considera que la mitigación reduce los impactos del cambio climático (IPCC, 2014), deteniéndolo o revirtiéndolo a través de estrategias de gestión (FAO, 2017) destinadas a reducir la gravedad de las emisiones antropogénicas globales. A nivel mundial, existe un fuerte interés en estabilizar la abundancia de CO₂ y otros gases de efecto invernadero como respuesta para mitigar el riesgo del calentamiento global (Lal, 2008). Se han realizado esfuerzos, por ejemplo, desde los últimos 50 años, la investigación sobre las funciones ecológicas de los manglares, como la tasa de secuestro de carbono, ha aumentado exponencialmente (Lee et al., 2014). El principal enfoque de la investigación en esta área fue comprender cómo factores como la vegetación y el clima controlan la acumulación de carbono orgánico en suelos y sedimentos y si este proceso podría mitigar los impactos del CO₂ en el cambio climático.

A pesar de la gran importancia de los ecosistemas de manglares, a nivel mundial se encuentran amenazados por la creciente explotación antropogénica, alcanzando una alarmante pérdida de 1-3 % por año (Pendleton L., 2012). Se estima que la mitad de los manglares del mundo se han perdido en los últimos 50 años (Benson et al., 2017). Anualmente se pierden 0,003 Pg de CO₂ de potencial de secuestro (Pidgeon, 2009). Esta pérdida de potencial sumidero de carbono (Vinod et al., 2018), tiene un impacto negativo en la capacidad del ecosistema para almacenar carbono y, por lo tanto, aumentaría efectivamente su emisión a la atmósfera (Pendleton L., 2012), lo que puede resultar en una concentración más alta que la que se produjo en los ecosistemas terrestres (Vinod et al., 2018).

Perdida por Ignición un método para determinar la concentración de carbon secuestrado por manglares

El contenido de carbono orgánico del suelo se mide frecuentemente utilizando el método de pérdida por ignición, que se basa en la diferencia de peso entre los suelos secos tratados antes y después de la ignición. El carbono orgánico del suelo se determina utilizando factores de conversión individuales o fórmulas derivadas de la relación perdida por ignición (LOI por sus siglas en ingles) y carbono orgánico del suelo (SOC por sus siglas en ingles), donde el SOC se analiza/estima utilizando un autoanalizador o el factor de multiplicación (2) como una conversión precisa de la relación OM: SOC, determinada y recomendada por varios autores (Howard, 1965; Howard & Howard, 1990; De Vos et al., 2005; Pribyl, 2010; Chaikaew & Chavanich, 2017) para estimar la concentración de carbono orgánico en humedales, con base en el supuesto de que la materia orgánica contiene 50% de carbono

En síntesis, la revisión bibliográfica ha confirmado la vital importancia de los manglares como sumideros naturales de carbono. y su conservación es estratégica para enfrentar el Cambio Climático. Especialmente en un país y región tan Vulnerable como la Costa Caribe Sur de Nicaragua. Sin embargo, la ausencia de datos específicos en Nicaragua, particularmente en el territorio de Laguna de Perlas, representa una brecha científica que debe ser atendida. Cuantificar el carbono almacenado en estos ecosistemas permitirá diseñar políticas ambientales basadas en evidencia, fortalecer la gestión sostenible de los recursos costeros, participar en mercados de carbono y proyectos de compensación, y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo relativo a la acción por el clima y la vida de ecosistemas terrestres y marinos.

Por tanto, la investigación propuesta no solo tiene relevancia científica, sino también social y económica, al generar información clave para la conservación y el desarrollo sostenible en la Costa Caribe Sur de Nicaragua.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Área de localización del estudio

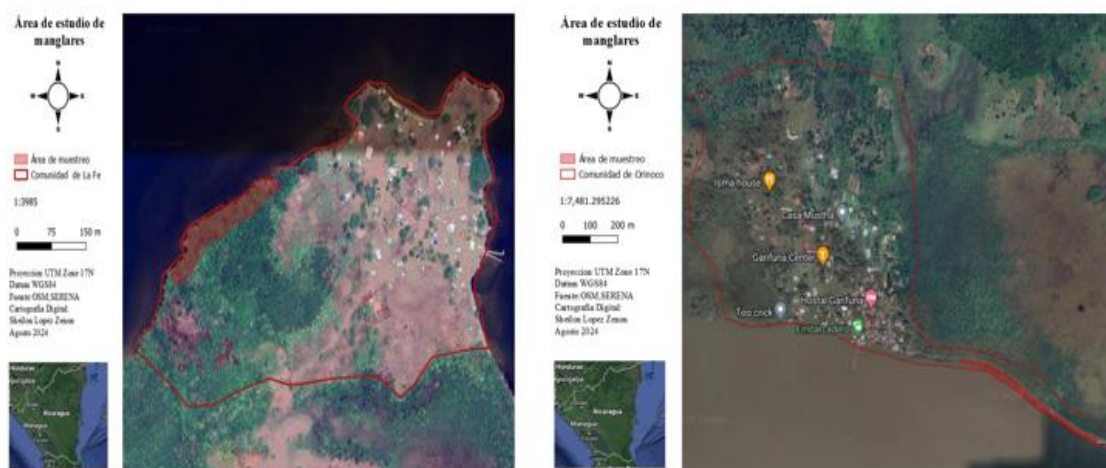


Ilustración 1: Área de localización de estudio de las comunidades de Orinoco y Lafe

Esta investigación se realizó en los ecosistemas de manglares del municipio de Laguna de Perlas, ubicado entre las coordenadas 12° 20' de Latitud Norte y 83° 40' de Longitud Oeste, a 49 km al norte del municipio de Bluefields. Limita al norte con la desembocadura del río Grande y el Tortuguero, al sur con Kukra Hill, al este con el océano Atlántico y al oeste con el Tortuguero y Kukra Hill, tiene una extensión territorial aproximada de 3,876 km² (Alcaldía, 2012).

El clima corresponde a la clasificación de Bosque Húmedo Tropical, prevaleciendo en las partes bajas de la Costa Atlántica, especialmente al sureste de la costa. Por su ubicación en la línea costera de los municipios más húmedos de Nicaragua, la precipitación anual es en promedio de 5000 mm. La temperatura media anual es de 27 °C y la temperatura máxima no supera los 38 °C, y la temperatura de los meses más fríos es superior a los 18 °C (INETER).

Los suelos del municipio de Laguna de Perlas se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales finos, con abundantes gravas silíceas y ocasionalmente pequeños cantos rodados de gravas de roca ígnea básica desgastadas por el agua. Tanto las gravas como las arcillas sedimentarias están constituidas por minerales muy ácidos, ricos en sílice y aluminio (Ayuntamiento, 2008).

4.2. Tipo de estudio según el enfoque, amplitud o periodo

El estudio es descriptivo con enfoque cuantitativo, de corte transversal debido a que la recolección de datos se llevó a cabo en un periodo de tiempo determinado.

4.3. Población y muestra

La población de estudio corresponde a 0.5 ha de bosque de mangle rojo *Rhizophora mangle* ubicado en las comunidades de Orinoco y La Fe del municipio de Laguna de Perlas.

La muestra corresponde a 0.25 ha, en donde se estableció un transecto lineal de 250 m x 10 m subdivididos en 3 parcelas de 20 m x 40 m en toda el área con una distancia de 33 m entre cada parcela. Se muestreó todos los árboles encontrados en las sub parcelas, y las muestras de suelo se tomarán de tres perfiles de suelo (0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm).

4.3.1. Técnica e instrumento de la investigación.

A través de visita in situ, observación directa, inventario forestal se logró establecer parcelas e identificar la composición estructural y salud del bosque en cada parcela, y levantar muestras de suelos, que posteriormente fueron analizadas en laboratorio a través del proceso de Perdida por ignición (LOI por sus siglas en ingles).

Instrumentos utilizados

- Bitácoras de campo.
- Guía de observación.

4.4. Diseño Experimental

4.4.1. Técnica de Recolección de Datos

Caracterización del ecosistema de mangle seleccionados en términos de composición estructural y salud en las comunidades de Lefe y Orinoco.

Para la caracterización del bosque de manglar se realizará un transepto lineal de 250m de largo y 10m de ancho y subdividido en 3 parcelas de 20 m x 40 m en toda el área con una distancia de 33 m entre cada parcela.

Dentro de cada parcela se hará un inventario de todas las especies de mangles encontrados para la caracterización en términos de estructura. Determinando el diámetro y altura de todas las especies encontrados.

Para la evaluación de la salud del bosque se tomará en consideración la regeneración natural del bosque, presencia de bioindicadores, presencia de ataque de insectos u otros organismos sobre las hojas y el índice de salud cuantitativo del bosque.

Concentración de CO₂ almacenado en suelos de mangles rojo (*Rhizophora mangle*) en las comunidades de Lefe y Orinoco.

Para determinar la concentración de carbono almacenado en suelos de mangle se tomará 10 muestras de suelos de cada parcela a una profundidad de 0-30 cm con un muestreador de sedimentos para su posterior análisis en el laboratorio CIAB de la universidad BICU.

El análisis de laboratorio se hará a través de la pérdida por ignición (LOI por sus siglas en ingles), una técnica gravimétrica simple y rápida en la que el suelo se calienta a una temperatura lo suficientemente alta como para encender el carbono orgánico y liberarlo como CO₂.

Previo al proceso de ignición, las muestras serán tamizadas y posteriormente encendidos durante 4 h a 550 °C en un horno de mufla. Después de la extracción, las muestras restantes se enfriaron durante una hora en un desecador, seguido de su peso posterior tomado en una báscula de precisión.

Stock de carbono subterráneo en relación a la composición estructural del bosque de mangle rojo en Lape y Orinoco.

Para determinar el stock de carbono subterráneo, primeramente, se determinará la densidad aparente para cada uno de las muestras de suelo. Para ello, las muestras húmedas de campo obtenidas de todos los sitios serán secados, luego se tomará el peso de las muestras secadas para el cálculo de la densidad aparente con la formula:

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{peso seco (g)} / \text{volumen del suelo (cm}^3\text{)}.$$

Posteriormente se procederá a calcular el stock de carbono, lo cual es una función directa de la concentración de carbono subterráneo y la densidad aparente. $SC = CC * DA * DH * 0.1$

En donde:

SC= Stock de carbono

CC= Concentración de carbono

DA= densidad aparente

IES= intervalo de espesor del suelo

0.1 es el factor de conversión para conseguir el stock de carbono en kg / m²

4.5. Operacionalización de las variables

Tabla 2: Paralización de variables

Variables	Instrumento de medición	Unidades	Frecuencia de monitoreo
Objetivo específico i: Caracterizar el ecosistema de mangle seleccionados en términos de composición estructural y salud en las comunidades de La Fe y Orinoco.			
DAP	Cinta diamétrica	cm	Una vez
Altura	Cinta Metrica	M	Una vez
Salud Ambiental del ecosistema		Índice de salud (%)	Una sola vez
Objetivo específico ii: Determinar la concentración de CO ₂ almacenado en suelos de mangles rojo (<i>Rhizophorae mangle</i>) en las comunidades de Lafe y Orinoco.			
Carbono secuestrado	LOI (perdida por Ignición)	%	Una vez
Objetivo específico iii: Determinar el stock de carbono subterráneo en relación a la composición estructural del bosque de mangle rojo en Lafe y Orinoco.			
Carbono secuestrado por área	Cálculo mediante fórmula	kg/m ²	Una vez

4.6. Análisis de datos

Para el análisis estadístico de la información que conforma la muestra de esta investigación, se empleó el software de Microsoft Excel y Word como instrumento para el manejo de los datos relacionados con los hallazgos correspondientes a las variables del estudio.

A través del método ANOVA de una vía para determinar las estadísticas descriptivas de todos los parámetros físicoquímicos, evaluar la hipótesis y determinar la significancia estadística entre los sitios muestreados, sus respectivos puntos y profundidad. Posteriormente se utilizará una prueba post-hoc para determinar y comparar las diferencias, en los casos en que el ANOVA arrojó una diferencia significativa ($< 0,05$).

Todos los análisis estadísticos se realizarán utilizando IBM SPSS (versión 25). Se hará uso del software ArcGis para construir mapas que representan la ubicación geográfica del área de estudio y los respectivos sitios muestreados. Asimismo, se hará uso de programación Excel para crear tablas y figuras para facilitar la comprensión visual de los datos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización del ecosistema de mangle seleccionados en términos de composición estructural y salud en las comunidades de Lafe y Orinoco.

- **Composición estructural**

El ecosistema del municipio de Laguna de Perlas se caracteriza por cuatro especies diferentes de manglares: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), la especie predominante; seguida de *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), que ocupa el segundo lugar en abundancia; *Pellicieria rizhophorae*, en tercer lugar, en abundancia, y en menor escala, *Avicenia germinans* (mangle negro), con una abundancia muy escasa (Stubbs, 2019).

Los ecosistemas de manglares muestreadas en las comunidades de Orinoco, LaFe y Marshall Point son áreas reforestadas con plántulas de mangle rojo en 2022 en el marco del proyecto WeADAPTogether, ejecutado por el Instituto de Biodiversidad & Estudios Ambientales IBEA-BICU, tras el paso del huracán Julia que azotó el país y la región el día 09 del mes de octubre, 2022 con categoría 1 (INETER, 2022) afectando todas las comunidades del Territorio de Laguna de Perlas.

La especie reforestada es de mucha importancia socioambiental para las comunidades en estudio considerando, en especial sus servicios ecosistémicos de protección costera, y actividades de pesca.

Caracterización diamétrica y de altura de manglares

Se evaluaron un total de 135 individuos de plántulas, distribuidos en 9 sitios de muestreo, de los cuales predominan el mangle Rojo *Rhizophora mangle* como única especie de mangle existente en el sitio. En altura las plántulas tienen un promedio entre 37 cm a 93 cm. Con valores máximos en la comunidad de Orinoco (93 cm), seguido por Marshall Point (78 cm) y Lafe (41 cm). Véase tabla xx para número de individuos por punto de muestreo.

Por su parte, el DAP es un indicador clave en la dendrometría, ya que permite estimar el volumen y biomasa de los árboles. Valores más altos suelen estar asociados con árboles más maduros o con mayor capacidad de almacenamiento de carbono (Chave et al., 2014).

En las comunidades de estudio, se reportaron presencia de un total de 11 árboles que fueron encontradas en área reforestadas, distribuidos únicamente en las comunidades de Marshall Point (8 individuos) y Lafe (3 individuos). Con valores de DAP que oscilan entre 97 cm a 117 cm, y altura de 12 m a 14 m.

Esta diferencia podría indicar que las condiciones ambientales en Lafe y Marshall Point (disponibilidad de nutrientes, menor salinidad o mejores características del sustrato) son más favorables para el crecimiento de las plántulas, en comparación con la comunidad de Orinoco.

Estas diferencias estructurales son importantes para comprender la dinámica del ecosistema de manglar, su capacidad de almacenamiento de carbono y la diversidad de hábitats que pueden ofrecer las distintas comunidades, debido a que el DAP y altura de los manglares desempeñan un papel esencial en la configuración de los ecosistemas de manglares, ya que sirven como indicador del nivel de estrés al que están sometidos. Por ejemplo, debido a su ubicación en la primera franja del manglar, *R. mangle* se considera la especie más vulnerable a las perturbaciones naturales, lo que modifica considerablemente las características fisiológicas de los manglares (Chan-keb et al., 2018).

- **Salud Ambiental**

Según entrevistas y observaciones *in situ*, se identificaron tres diferentes actividades o presiones antropogénicas en los ecosistemas de manglares de los sitios muestreados:

c. Tala de árboles:

En ambas comunidades se evidencio una continua intervención humana en el ecosistema de manglares. La tala de manglares es mayor en la comunidad de Orinoco y Menor en las comunidades de Lafe y Marshall Point. Esto se debe a que en la comunidad de Orinoco los



Ilustración 2: Tala de mangle rojo, Comunidad de La Fe, municipio de Laguna de Perlas

manglares están ubicados a la orilla de la calle y son más accesibles en comparación a los manglares ubicados en las otras dos comunidades.

d. Acumulación de desechos solidos

La deposición directa de residuos sólidos es otra práctica inadecuada implementada en las comunidades de estudio, con mayor acumulación en la comunidad de Orinoco, debido a su ubicación en la zona poblada. Por lo tanto, existe una frecuente acumulación de residuos domésticos tanto a la entrada como dentro del ecosistema. Por otro lado, se sugiere que la acumulación de residuos sólidos podría afectar a diferentes especies pesqueras que habitan en el ecosistema de manglares (por ejemplo, conchas y otras fuentes de alimento), así como a los hábitats circundantes, como los importantes y frágiles arrecifes de coral. Esto podría afectar negativamente la estructura social y los medios de vida de los actores locales, cuya cultura histórica ha estado estrechamente vinculada al ecosistema de manglares y, por lo tanto, dependen de los recursos pesqueros para su subsistencia.

e. Daño en las hojas

Se observó herbivoría en las hojas de *Rhizophora mangle*, tanto en los árboles como en algunas de las plántulas en estado de desarrollo fenológico, pero mas abundante en hojas de plantulas. La abundante herbivoría en hojas de plantulas observada en la especie *R. mangle* sugiere que las plántulas son vulnerables a la depredación. Esto concuerda con los hallazgos de Burrows (2003), quien reportó mayores daños por herbivoría de insectos en hojas jóvenes que en hojas más maduras, ya que estas son más vulnerables durante su etapa temprana.



Ilustración 3: Picadura de hoja en plántula de mangle Rojo, Comunidad de Orinoco, Municipio de Laguna de Perlas

Es importante resaltar que las presiones ambientales antes mencionados, no solo dañan la biodiversidad de la zona, sino que también reducen la capacidad del suelo para regenerar

especies de manglares (Marcin Piątek, 2019), si bien, los ecosistemas de manglares en el área de estudio aún mantienen sus servicios ambientales, cabe señalar que incluso el impacto humano relativamente bajo puede afectar el ambiente de los manglares (Kathiresan, 2001).

5.2. Concentración de CO₂ almacenado en suelos de mangles rojo (*Rhizophora mangle*) en las comunidades de Lafe y Orinoco.

La concentración de carbono orgánico obtenida por LOI varía según los sitios muestreados, sus respectivas réplicas y la profundidad del suelo. La variabilidad espacial sigue el orden; La Fe (41%), Marshall Point (41%), y Orinoco (4%). La concentración de carbono en las comunidades de La Fe y Marshall es significativamente diferente a la de la comunidad de Orinoco, donde se reportan los valores mínimos de carbono secuestrado.

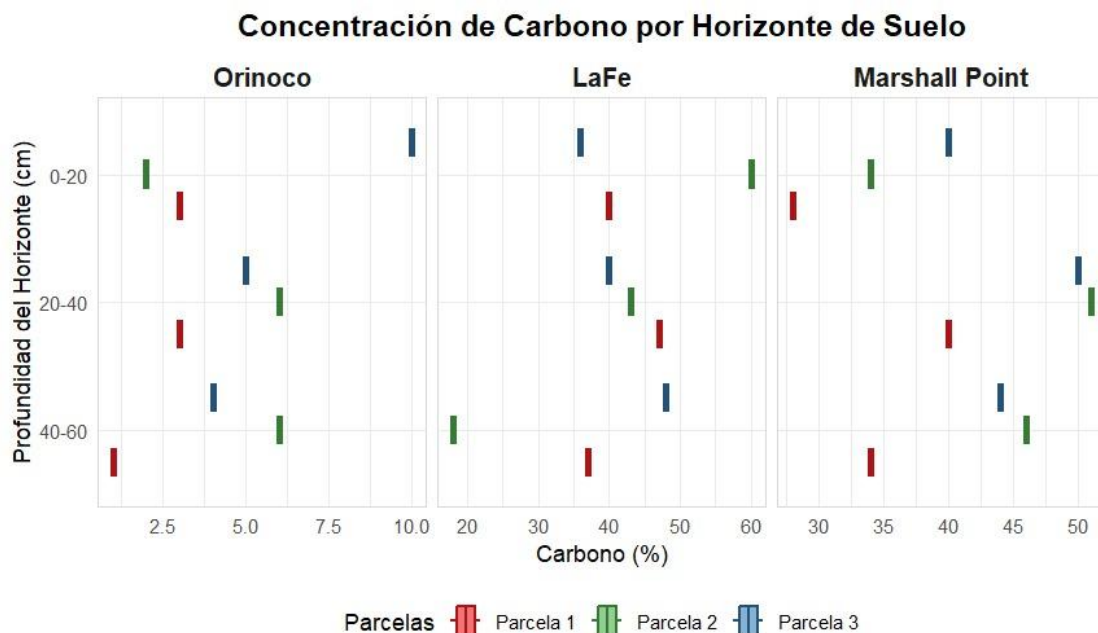


Ilustración 4: Distribución vertical de la concentración de carbono orgánico obtenida por Pérdida Por Ignición en tres comunidades del municipio de Laguna de Perlas

En promedio la concentración de carbono secuestrado en las comunidades de Marshall Point y LaFe, se debe principalmente a que ambas comunidades presentan condiciones edafológicas similares. Con un suelo orgánico negro (fangoso) muy húmedo (en el caso de Marshall Point con substrato más húmedo), que contribuyen a la preservación de

carbono a lo largo de perfil del suelo. A diferencia de estos sitios, el suelo en Orinoco se caracteriza por un tipo más arenoso.

Según la distribución vertical de la concentración de carbono a lo largo de los perfiles del suelo. Todos los sitios muestreados mostraron diferentes tasas de concentración de carbono a lo largo del perfil del suelo, para las cuales el carbono aumenta o disminuye según las particularidades de los sitios. Los valores más altos se observaron en LaFe en el primer horizonte (0-20 cm) que contenía una concentración de carbono de 60 %, y los más bajos en Orinoco, con solo 1 % de carbono orgánico en el tercer horizonte (40-60 cm).

Se sugiere que la tendencia creciente de la concentración de carbono con la profundidad se atribuye a las tensiones ambientales y antropogénicas en las comunidades. Este resultado respalda la explicación de (Huang, 2018) de que el mayor contenido de carbono en la capa más profunda del suelo se debe a perturbaciones tanto antropogénicas como naturales que influyen en la tasa de carbono en los 0-20 cm superiores.

Por otro lado, la tendencia decreciente con la profundidad se relaciona con las condiciones específicas del sitio que influyen en la acumulación de carbono orgánico en la capa superficial del suelo y la reactividad de la actividad microbiana en el transporte de carbono orgánico a lo largo del perfil edáfico.

Se ha informado que la bioturbación por sesarmidos excavadores indujo la oxidación de materia orgánica en subcapas y, por lo tanto, una disminución en el contenido de carbono orgánico en las subcapas (Andreetta, 2014). Este patrón es evidente por ejemplo en el caso de Orinoco donde el sustrato predominante es arenoso y fácilmente podría inducir la oxidación de materia orgánica en las subcapas. Sumado a esto, el número de individuos predominante en la zona (5 individuos) puede constatar la poca concentración de carbono secuestrado.

5.3. Stock de carbono subterráneo en relación a la composición estructural del bosque de mangle rojo en LaFe, Marshall Point & Orinoco.

Resultados de esta investigación, reflejan valores de carbono por hectárea que van de 706 kg/ha, a 2,323 kg/ha. Con máximo valores reportados en Marshall Point y menores en Orinoco. Estos valores son promedios de la masa de carbono de todos los sitios muestreados y sus respectivas réplicas. Evidenciando que incluso áreas reforestadas, donde predominan plántulas, juegan un rol importante en el secuestro de carbono.

Stock de carbono en relación con composición estructural

A pesar de que LaFe representa mayor número de plántulas (78 individuos) y arboles (8 individuos), en comparación con Marshall Point (52 plántulas y 2 árboles), Marshall Point tiene el mayor potencial para secuestrar y almacenar CO₂ atmosférico en comparación con las otras dos comunidades. Resultados similares fueron reportados por Mackenzie et al. (2016), quienes sugirieron que, en un ecosistema menos diverso, hay menor competencia radicular interespecífica en comparación con un ecosistema diverso donde un menor aporte de carbono al suelo se debe a la interacción radicular interespecífica.

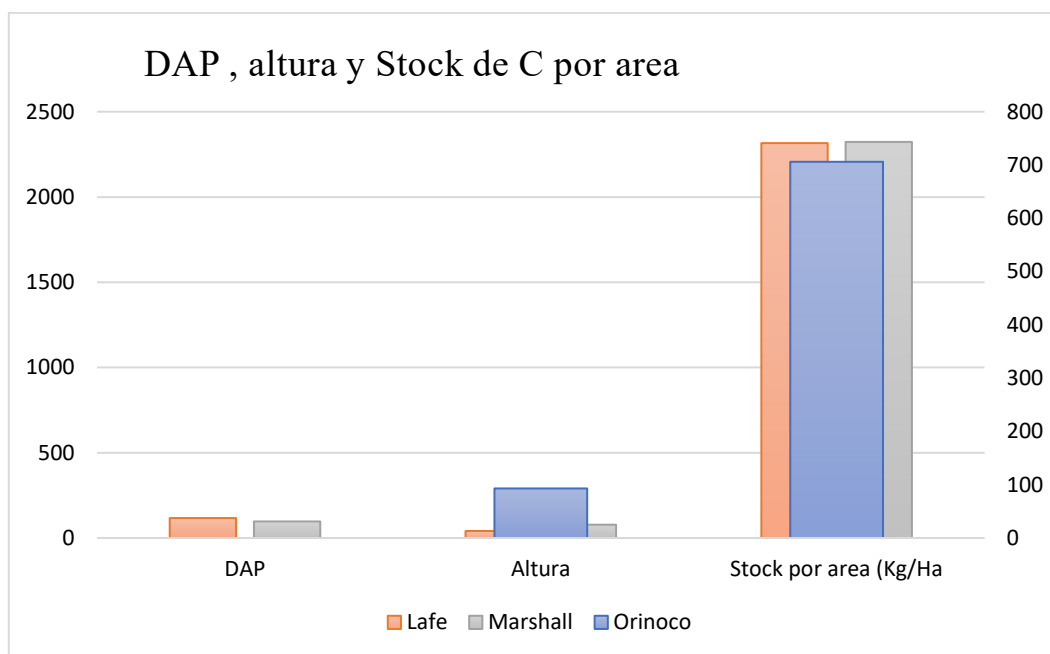


Ilustración 5: Stock de Carbono (kg/ha) en relación a la Composición estructural de bosque de mangle en las comunidades de Orinoco, Marshall Point y LaFe

Comparando el stock de carbono y el DAP por sitio, resultado de esta investigación revelan que ecosistema donde prevalecen mangles más jóvenes capturan mayor contenido de carbono. Esto es evidente en el caso de Marshall Point donde solamente se encontró 2 árboles de manglares en el área de estudio que midieron en promedio 12 cm de DAP y

secuestran 2,323 kg/ha. En contraste en LaFe se reporta 8 individuos que en promedio midieron 117 cm y secuestran un total de 2316. Esto podría explicarse con mayor precisión con los hallazgos de Song y Woodcock (2003), quienes afirman que el manglar maduro es carbono neutral, es decir, no almacena ni libera carbono a la atmósfera. Sin embargo, no se sabe con certeza si el manglar maduro de este estudio está cerca de ser carbono neutral o si ya lo es. Este último sugiere estudios adicionales para poner a prueba dicha conformación.



Ilustración 6: medición de DAP de mangle rojo en la comunidad de La Fe, municipio de Laguna de Perlas

VI. CONCLUSIONES

Se puede concluir que el tamaño de las reservas de carbono en las comunidades de Orinoco y Lefe, a pesar de ser sitios recientemente reforestados, los manglares desde una edad temprana actúan como un importante sumidero de carbono en todo el perfil del suelo, y constituyen un sumidero altamente eficiente de carbono que de otra manera permanecería en la atmósfera, contribuyendo significativamente a los servicios ecosistémicos de regulación climática.

En primera instancia, el análisis de los perfiles de suelo reveló que existe una notable acumulación de carbono orgánico en los diferentes horizontes evaluados. Esta concentración está estrechamente vinculada a la alta tasa de deposición de hojarasca, raíces y otros residuos vegetales característicos de los manglares, lo que favorece la formación de materia orgánica estable en el suelo. Se comprobó que los suelos presentan variabilidad en la concentración de carbono capturado dependiendo de la profundidad, mostrando un gradiente en el cual los horizontes superficiales concentran mayores porcentajes de materia orgánica. Esto confirma que los procesos biológicos activos en la rizosfera del mangle rojo desempeñan un papel crucial en la dinámica del carbono edáfico.

Asimismo, la comparación entre las comunidades estudiadas mostró diferencias en la capacidad de almacenamiento de carbono por área, lo cual podría atribuirse a las distintas tensiones factores como la densidad del bosque, el grado de perturbación antrópica, las condiciones hidrológicas y la dinámica sedimentaria propia de cada sitio.

Además de lo mencionado anteriormente, los resultados de este estudio indican que existe un alto potencial para incrementar la captura de carbono en el futuro mediante la implementación de proyectos sostenibles para reducir las emisiones de carbono mediante la restauración y protección de manglares, ya que se sabe que la estructura y las características de estas especies son cruciales para lograr cierto nivel de tolerancia a los efectos del cambio, así como para contribuir a ecosistemas de manglares saludables con alta biodiversidad, adecuados para mejorar la conectividad del hábitat y que ejercen funciones ecosistémicas. De hecho, programas como REDD+ u otros incentivos



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL

financieros para la mitigación del cambio climático podrían desempeñar un papel importante en la conservación de los ecosistemas de manglares y sus respectivas reservas de carbono, tanto superficiales como subterráneas.

VII. RECOMENDACIONES

- a) Incorporación a los planes de manejo territorial acciones para mitigar los daños ocasionados por los ciclones y otros eventos meteorológicos a los ecosistemas de manglares.
- b) Implementación de planes efectivos de reforestación y monitoreo en áreas degradadas del manglar en comunidades Orinoco , Marshall Point, y La Fe.
- c) Realizar estudios adicionales que demuestren la evolución de carbono en áreas reforestadas impactadas por eventos extremos.
- d) Debido a la falta de información sobre la concentración de carbono en el suelo del ecosistema manglar en las regiones autónomas de la costa caribe de Nicaragua, se sugiere incentivar la producción de investigaciones futuras implementadas en las zonas de manglar de la región, tomando como base la presente investigación posteriores investigaciones basadas en el estudio de la captura de carbono en el bosque de mangle.

VIII. REFERENCIAS

- Adame, M. .. (2013). Carbon Stocks of Tropical Coastal Wetlands within the Karstic Landscape of the Mexican Caribbean. *PLOS ONE*, 8(12).
- Adame, M. F. (2015). Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands.
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. 3(3), 313–.
- Andreetta, A. F. (2014). Mangrove carbon sink . Do burrowing crabs contribute to sediment carbonstorage ? Evidence from a Kenyan mangrove system. *Journal of Sea Research*, 524–533.
- Bhavesh Choudhary, V. D. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives.
- Donato, D. C. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature*, 4(4), 1–5.
- FAO. (2017). Soil Organic Matter: the hidden potential. Food and Agriculture.
- González, L. I. (1997). Diagnostico Ecologico de las Zonas Costeras de.
- Huang, X. W. (2018). Distribution Pattern and Influencing Factors for Soil Organic Carbon (SOC)in Mangrove Communities at Dongzhaigang, China. *Journal of Coastal Research*, 434–442. .
- I. Nagelkerken S.J.M. Blaber b, S. B. (2008). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany*, 155-185.
- Kathiresan, K. &. (2001). Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Biology of Mangrove and Mangrove Ecosystem*, 81–251.
- Kauffman, J. B. (2014). Carbon stocks of . *Ecological Applications*, 24(3), 518–527. .
- Lal. (2008). Carbon sequestration . 815–830.
- Lehmann, J. a. (2015). The Contentious Nature of Soil Organic Matter. *Nature*, 60-68.
- Marcin Piątek, N. S. (2019). Pseudocercospora avicenniicola on black mangrove (Avicennia germinans) in Benin: The first report from Africa.
- Middleton, A. B. (2016). Degradation of Mangrove Tissues and implications for Peat Formation in Belizean Island Forests. *Journal of Ecology*, 818–828. .
- Mitra, A. &. (2014). Carbon Sequestration by Coastal Floral Community New Delhi. 1–11.
- Murdiyarso, D. D. (2009). Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: A preliminary account from plots in Indonesia. .
- R, L. (2008). Carbon sequestration. *Phil. Trans. R. Soc. B*, , 815–830.
- Rull, V. (2022). The Caribbean mangroves: An Eocene innovation with no Cretaceous precursors. *Earth-Science Reviews*.
- Taillardat, P. F. (2018). Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national.

IX. Anexo







