

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE BIOLOGÍA

INFLUENCIA DE LA MAREA SOBRE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO  
(CO<sub>2</sub>) Y METANO (CH<sub>4</sub>) EN MANGLARES DOMINADOS POR MANGLE BICOLOR  
(*Avicennia bicolor*).

ELABORADO POR:  
YUHEIMY CASTILLO

TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL GRADO  
DE LICENCIADO EN BIOLOGÍA CON ORIENTACIÓN EN BIOLOGÍA AMBIENTAL

REPÚBLICA DE PANAMÁ

2024

## HOJA DE APROBACIÓN

Influencia de la marea sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) en manglares dominados por *Avicennia bicolor*.

TESIS

Sometida para optar al título de Licenciado en Biología con Orientación en Biología Ambiental

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

APROBADO POR:

---

Presidente

---

Miembro

---

Miembro

REFRENDADO POR:

---

Fecha: \_\_\_\_\_

## COMITÉ ASESOR

**PROFESOR: Mgtr. Mario Arosemena**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AMBIENTALES

**PROFESOR: Dra. María de Stapf**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

**PROFESOR: Mgtr. Edgardo Muñoz**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AMBIENTALES

**PROFESOR/INVESTIGADOR EXTERNO: Dr. Jorge Hoyos Santillán**

PROFESOR ASOCIADO, ESCUELA DE BIOCENCIAS, UNIVERSIDAD DE NOTTINGHAM, REINO UNIDO

INVESTIGADOR PRINCIPAL DEL PROYECTO PATRIMONIO NATURAL AZUL

INVESTIGADOR ASOCIADO AL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TROPICALES SMITHSONIAN

## **DEDICATORIA**

Para mi Padre, Adán Castillo, por creer siempre en mis sueños.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento por el apoyo de National Audubon Society, en particular a Audubon Americas y al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por ejecutar el proyecto titulado ‘Valoración, Protección y Mejora del Capital Natural Costero en Panamá’ (PN-T1233), financiado por el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) y el Fondo del Reino Unido para el Carbono Azul.

Agradezco a la Universidad de Panamá por ser mi casa de estudios, donde pude desarrollar mi carrera y adquirir las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos de la ciencia.

Quiero agradecer de manera especial al Dr. Jorge Hoyos Santillán por su dedicación y disposición para guiarme en cada etapa de este estudio, convirtiéndose en mi principal mentor y facilitando su culminación. Gracias por inspirarme a seguir en el camino de la ciencia. También estoy muy agradecida con mis asesores, el Mgtr. Mario Arosemena, la Dra. María de Stapf y el Mgtr. Edgardo Muñoz, quienes siempre estuvieron dispuestos a colaborar en cada momento de consulta.

Al Dr. Edwin Domínguez, quien fue un apoyo valioso en mi formación, compartiendo sus conocimientos y experiencias de su trayectoria científica. A mis compañeros de la licenciatura y del voluntariado, quienes con su carisma y alegría hicieron este viaje más ameno, les agradezco.

A mis padres, Mayra Morán y Adán Castillo, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación universitaria y personal; a mi hermana, Keysi Pitti, por orientarme a elegir y culminar una carrera que realmente me apasiona; a mi abuela, Hermelinda Morán, por su escucha atenta y sus sabios consejos; a mi sobrina, Andrea Valderrama, por ayudarme con sus habilidades manuales; y a mi amiga, Zuleidies Salazar, por sus constantes palabras de motivación.

Y, sobre todo, a Dios, por permitirme culminar mis estudios de grado y ayudarme a superar las dificultades en este proceso.

## ACKNOWLEDGMENTS

I would like to acknowledge the support from the National Audubon Society and the Inter-American Development Bank, which executes the project “Valuing, Protecting and Enhancing Coastal Natural Capital in Panama” (PN-T1233), funded by the Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA), and the UK Blue Carbon Fund.

I thank the University of Panama for being my place of study, where I was able to develop my career and acquire the necessary tools to face the challenges of science.

I want to especially thank Dr. Jorge Hoyos Santillán for his dedication and willingness to guide me at every stage of this study, becoming my main mentor and facilitating its completion. Thank you for inspiring me to continue the path of science. I am also very grateful to my advisors, Mgtr. Mario Arosemena, Dr. María de Stapf, and Mgtr. Edgardo Muñoz, who were always willing to collaborate at every moment of consultation.

To Dr. Edwin Domínguez, who was a valuable support in my training, sharing his knowledge and experiences from his scientific journey. To my classmates from the degree program and from volunteering, who with their charisma and joy made this journey more enjoyable, I thank you.

To my parents, Mayra Morán and Adán Castillo, for their unconditional support throughout my university and personal development; to my sister, Keysi Pitti, for guiding me to choose and complete a career that truly inspires me; to my grandmother, Hermelinda Morán, for her attentive listening and wise advice; to my niece, Andrea Valderrama, for helping me with her manual skills; and to my friend, Zuleidies Salazar, for her constant words of motivation.

And, above all, to God, for allowing me to complete my degree and helping me overcome the difficulties throughout this time.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ACKNOWLEDGMENTS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	viii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT.....	x
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES .....	7
2.1 Reservorios de carbono .....	7
2.2 Emisiones de gases de efecto invernadero .....	7
2.3 Marea.....	10
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
3.1 Diseño de la investigación o Metodología de la investigación .....	12
3.2 Área de estudio.....	13
3.3 Descripción de la metodología.....	15
3.3.1. Establecimiento de parcela para estimación de biomasa .....	15
3.3.2. Análisis fisicoquímicos de árboles.....	15
3.3.3. Análisis fisicoquímicos de suelo .....	18
3.3.4. Medición de marea .....	23
3.3.5. Medición de emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> en suelo y árboles.....	23
3.3.6. Análisis de datos.....	25
CAPITULO IV: RESULTADOS .....	26
4.1. Reservorios de carbono .....	26
4.1.1 Análisis fisicoquímicos de árboles.....	26
4.1.2 Análisis fisicoquímicos de suelo .....	26
4.2. Influencia de la marea sobre las emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> en suelo y árboles .....	27
4.2.1. Emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> en suelo.....	27

4.2.2. Emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> en árboles.....	29
CAPITULO V: DISCUSIÓN .....	32
5.1 Reservorios de carbono .....	32
5.2 Emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> en suelo y árboles .....	32
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES .....	36
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
CAPÍTULO VIII: ANEXOS.....	58



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos de árboles .....	26
Tabla 2. Contenido de carbono en los primeros 50 cm de profundidad del suelo en una subparcela de <i>Avicennia</i> .....	26
Tabla 3. Análisis fisicoquímicos del suelo a una profundidad de 5 cm en la población de <i>Avicennia bicolor</i> . ....	27
Tabla 4. Estadística descriptiva de emisiones de CO <sub>2</sub> (mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) y CH <sub>4</sub> (μg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) en suelo dominados por <i>Avicennia bicolor</i> (promedio ± SEM).....	29
Tabla 5. Estadística descriptiva de las emisiones de CO <sub>2</sub> (mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) y CH <sub>4</sub> (μg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) en árboles de <i>Avicennia bicolor</i> . ....	31
Tabla 6. Análisis Post Hoc de Tuckey para las emisiones de CO <sub>2</sub> en suelo.....	59
Tabla 7. Análisis Post Hoc de Tuckey para las emisiones de CO <sub>2</sub> en árboles.....	60
Tabla 8. Análisis Post Hoc de Tuckey para la emisiones de CH <sub>4</sub> en árboles. ....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Área de estudio: Bahía de Parita.....	13
<i>Figura 2.</i> Áreas protegidas y cobertura de manglar en Bahía de Parita. ....	15
<i>Figura 3.</i> Extracción de núcleo de madera.....	16
<i>Figura 4.</i> Núcleo de madera de <i>A. bicolor</i> .....	16
<i>Figura 5.</i> Hojas secas luego de estar 24 horas a 105 °C.....	18
<i>Figura 6.</i> Pesaje de muestra de neumatóforo para determinar la cantidad de isótopos de carbono. .....	18
<i>Figura 7.</i> Muestras de suelo de manglar secas en un desecador. ....	19
<i>Figura 8.</i> Muestras de los primeros 50 cm de profundidad del suelo de manglar.....	19
<i>Figura 9.</i> Pesaje de muestras de suelo secas para LOI. ....	20
<i>Figura 10.</i> Muestras de suelo después de 1h a 550 °C en un deshumidificador. ....	20
<i>Figura 12.</i> Peso de muestras de suelo para analizar contenido de carbono.....	21
<i>Figura 11.</i> Materiales para la prueba de acidificación. ....	21
<i>Figura 13.</i> Preparación de muestras para el análisis de fósforo del suelo de manglar. ....	22
<i>Figura 14.</i> Muestras de suelo para pH y conductividad. ....	22
<i>Figura 15.</i> Medición de pH a la muestra de suelo.....	22
<i>Figura 16.</i> Instalación de tubo de PVC para el registro del nivel de agua. ....	23
<i>Figura 17.</i> Retiro del registrador de nivel de agua HOBO U20L-0x. ....	23
<i>Figura 18.</i> Medición de gases en suelo durante la marea alta. ....	24
<i>Figura 19.</i> Anillo de PVC para la medición de gases en suelo .....	24
<i>Figura 20.</i> Medición de gases en árbol de <i>A. bicolor</i> a una altura < 1m.....	25
<i>Figura 21.</i> Cámara para la medición de gases en árboles.....	25
<i>Figura 22.</i> Emisiones de suelo en manglares de <i>Avicennia bicolor</i> durante el ciclo de marea....	28
<i>Figura 23.</i> Emisiones en árboles de <i>Avicennia bicolor</i> durante ciclo de marea.....	30
<i>Figura 24.</i> Sitio de estudio.....	58
<i>Figura 25.</i> Saturación del suelo por marea alta. ....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Definición de variables.....	58
Anexo 2. Población de <i>Avicennia bicolor</i> .....	58
Anexo 3. Pruebas Post hoc Tuckey.....	59

## RESUMEN

Los manglares son ecosistemas costeros con una alta capacidad de capturar carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Al ser zonas de transición entre tierra y mar, están sujetos a constantes variaciones de marea, un factor que podría ser clave en su función como fuente o sumidero de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>).

Este estudio analiza la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> del suelo y los tallos de *Avicennia bicolor* (*A. bicolor*) en relación con el ciclo de marea diurno, complementando con una evaluación del almacenamiento de carbono en el suelo y árboles vivos. Para ello, aplicamos un análisis de varianza unidireccional para medir el impacto de la marea en estas emisiones.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo aumentaron en marea alta ( $716.50 \pm 31.48$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), mientras que las emisiones de CH<sub>4</sub> siguieron el ciclo de la marea ( $49.9 \pm 2.35$  μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). En los tallos de *A. bicolor*, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen durante la marea creciente, alcanzando su menor promedio a una altura media ( $455.58 \pm 64.11$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); las emisiones de CH<sub>4</sub> fueron mayores a menor altura, alcanzando su valor máximo a menos de un metro en marea alta ( $5.397 \pm 1.06$  μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). El almacenamiento de carbono en una comunidad de *Avicennia* varió entre 47.52 y 133.42 MgC ha<sup>-1</sup> en el suelo y 87.44 MgC ha<sup>-1</sup> en árboles vivos.

Estos resultados destacan la marea como un regulador de las emisiones en ecosistemas costeros y el rol de los manglares como sumideros de carbono en la mitigación climática.

## ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems with a high capacity to capture carbon, contributing to climate change mitigation. As transition zones between land and sea, they are subject to constant tidal variations, a factor that could be key in their role as a source or sink of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>).

This study analyzes the variation of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the soil and stems of *Avicennia bicolor* (*A. bicolor*) in relation to the diurnal tidal cycle, complementing it with an assessment of carbon storage in the soil and living trees. To do this, we applied a one-way analysis of variance to measure the impact of the tide on these emissions.

Soil CO<sub>2</sub> emissions increased at high tide ( $716.50 \pm 31.48$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), while CH<sub>4</sub> emissions followed the tidal cycle ( $49.9 \pm 2.35$  μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). In the stems of *A. bicolor*, CO<sub>2</sub> emissions decreased during the rising tide, reaching their lowest average at mid-height ( $455.58 \pm 64.11$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); CH<sub>4</sub> emissions were higher at lower heights, peaking at less than one meter during high tide ( $5.397 \pm 1.06$  μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Carbon storage in an *Avicennia* community varied between 47.52 and 133.42 MgC ha<sup>-1</sup> in the soil and 87.44 MgC ha<sup>-1</sup> in living trees.

These results highlight the tide as a regulator of emissions in coastal ecosystems and the role of mangroves as carbon sinks in climate mitigation.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo. Dicho fenómeno se caracteriza por la variabilidad climática, incluyendo el aumento en la temperatura, cambios en los patrones de precipitación, incremento del nivel del mar y eventos climáticos extremos (PNUD, 2023; Reisinger et al., 2023) .

Actualmente, existe consenso científico atribuyendo el cambio climático, directa o indirectamente, a las actividades humanas que han modificado la composición atmosférica global (IPCC, 2018; Organización de Naciones Unidas, 1992). La atmósfera está compuesta mayormente por nitrógeno y oxígeno, con una menor proporción de gases trazas, entre los cuales se encuentran los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) (IPCC, 2018). Estos GEI atrapan parte de la radiación, específicamente la infrarroja (calor), lo que da lugar al fenómeno del efecto invernadero (Yoro & Daramola, 2020). La emisión conjunta de GEI ha provocado un desequilibrio energético en la atmósfera, manifestándose como un aumento acelerado del calentamiento global, caracterizado por el aumento de temperaturas en la superficie terrestre (Hansen et al., 2013; Reisinger et al., 2023; Yoro & Daramola, 2020).

En la era preindustrial, se observó un aumento significativo de tres gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Cias et al., 2013); a los cuales se atribuye el 87% del calentamiento global (Forster et al., 2007). El dióxido de carbono atmosférico desempeña un papel central en el ciclo global del carbono, siendo uno de los gases trazas más relevantes en la atmósfera (Cias et al., 2013). En el año 2022, se registraron concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  de  $417.9 \pm 0.2$  partes por millón (ppm) (World Meteorological Organization, 2024) . El metano, en menor proporción, presentó una concentración atmosférica de  $1923 \pm 2$  partes por billón (ppb) en el año 2022 (World Meteorological Organization, 2024) y exhibe un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el  $\text{CO}_2$  (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023). Entre los años 1750 y 2011, las concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  incrementaron un 40 % y un 150 %, respectivamente (Cias et al., 2013) .

Durante la primera década del siglo XXI, la temperatura media global en la superficie del planeta Tierra aumentó un  $+ 0.8^\circ\text{C}$  en relación con el periodo de 1880-1920 (Hansen et al., 2013). Este

incremento sobrepasa la variabilidad durante el Holoceno, con valores de  $0.25 \pm 0.25$  °C (Hansen et al., 2013). Todos los eventos anteriores han contribuido significativamente a una crisis climática. Este término abarca una serie de problemas derivados por las alteraciones climáticas, como desastres naturales (inundaciones, incendios forestales y sequías), inseguridad alimentaria e hídrica y la pérdida de biodiversidad (PNUD, 2023).

Ante esta crisis climática, se han propuesto soluciones basadas en la naturaleza (NbS, por sus siglas en inglés), que mediante la conservación, restauración y un mejor manejo de diferentes ecosistemas busca aumentar el almacenamiento de carbono y/o mitigar las emisiones de efecto invernadero (Griscom et al., 2017). Adicionalmente, las NbS generan beneficios y servicios para la población, contribuyendo a enfrentar problemas ambientales, sociales y económicos (Griscom et al., 2017; UICN, 2016). Dentro de las NbS, los ecosistemas costeros conformados por manglares, pastos marinos y arrecifes de coral resultan particularmente relevantes, dado que: secuestran CO<sub>2</sub> durante períodos largos de tiempo (Murray et al., 2011) y actúan como herramientas para la adaptación, mitigación y resiliencia a los impactos del cambio climático (Lecerf et al., 2023).

Los ecosistemas de manglar se desarrollan en sitios caracterizados por períodos de inundación recurrente, elevados niveles de salinidad, suelos fangosos y anóxicos con gran acumulación de sedimentos, en aguas de marea salina y salobre en regiones tropicales y subtropicales (CATHALAC, 2007; Spalding et al., 2010). Estas condiciones les otorgan las cualidades necesarias para albergar una alta biodiversidad, incluyendo especies marinas, terrestres y estuarinas de alto valor comercial y ecológico (Agardy et al., 2017; CATHALAC, 2007; Cerri et al., 2024; Leal et al., 2022). Se estima que más de 3,000 especies de peces utilizan los manglares dentro de su ciclo de vida (Sheaves, 2017). Este ecosistema es esencial para aves migratorias, debido a que lo utilizan como paradas para descansar, reproducirse y alimentarse (UNEP, 2014, 2023). Además, los manglares son fuente de nutrientes y materia orgánica para los ecosistemas cercanos (*e.g.*, arrecifes de coral y pastos marinos) (Dittmar et al., 2006; Dittmar & Lara, 2001; Kristensen et al., 2008; Mishra & Manish, 2018).

Los manglares pueden almacenar cantidades significativas de carbono durante largos periodos de tiempo, contribuyendo, de manera directa, a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Crooks et al., 2011; Griscom et al., 2017; Pendleton et al., 2012;

UNEP, 2023). En condiciones prístinas, los manglares se comportan como sumideros netos de carbono (Maher et al., 2015), capturando hasta cuatro veces más carbono que ecosistemas forestales no costeros (Donato et al., 2011). Así mismo, sirven como barreras naturales contra olas y tormentas (UNEP, 2023). Su uso para la protección de la línea costera es hasta cinco veces más rentable que el desarrollo de infraestructura (Narayan et al., 2016). Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de su papel como sumidero de carbono, los manglares también emiten gases de efecto invernadero (Alongi, 2014).

Entender la dinámica del carbono en los ecosistemas de manglar, tomando en cuenta tanto las capturas (*e.g.*, fotosíntesis, acumulación en sedimentos); así como las emisiones (*e.g.*, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), es fundamental para desarrollar estrategias que maximicen su capacidad de mitigación del cambio climático (Murray et al., 2011). En este proyecto, se estudiarán las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelos y árboles de manglares, con un enfoque particular en la especie *Avicennia bicolor* localizados en Bahía de Parita, Panamá. Se espera que los resultados contribuyan a la comprensión de la dinámica de estos gases en los manglares; así como, a la identificación de estrategias efectivas para maximizar su capacidad de mitigación del cambio climático y promover su conservación a largo plazo.



## JUSTIFICACIÓN

Los manglares nos brindan múltiples beneficios desde el punto de vista biológico y socioeconómico. Actúan como sitios de reproducción y crecimiento para múltiples especies, refugio de aves migratorias y protectores de fenómenos naturales (Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 2013). Además, los manglares previenen la erosión de suelos productivos y la pérdida excesiva de sedimento al océano, lo que podría provocar un daño a los ecosistemas aledaños (Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 2013). Aunque su importancia como sumidero de carbono es reconocida, su conservación se ve amenazada (Leal et al., 2022).

A pesar de estos beneficios, en Panamá se ha observado una disminución en la cobertura de manglares en los últimos 50 años, pasando de 360,000 hectáreas en 1969 a cerca de 170,000 hectáreas en 2007 (Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 2013; Spalding et al., 2010). Aunque en el último informe nacional se estima que se cuenta con 183,800 hectáreas de manglares (Ministerio de Ambiente, 2021), se continúan otorgando permisos para el desarrollo urbanístico y actividades productivas en estas áreas, incluso en zonas protegidas como la Bahía de Panamá, designada como sitio Ramsar (Sociedad Audubon Panamá, 2002).

La existencia de leyes que priorizan el derecho de propiedad sobre la conservación ambiental (*e.g.*, Ley N° 2 de 22 de agosto de 1916 (Código Civil de la República de Panamá, 1916)), dificulta la implementación de leyes o normativas destinadas a proteger los manglares. Por ejemplo, la Ley 80 de 2009, reconoce derechos posesorios y regula la titulación de tierras en zonas costeras e islas, y la Ley 41 de 1998, conocida como Ley General de Ambiente, artículo 95, establece la conservación de ecosistemas marinos con altos niveles de productividad y diversidad biológica (Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 2013; Legislación de la República de Panamá, 2009).

En la línea con los compromisos internacionales, Panamá, como país en desarrollo, se ha comprometido a reducir y limitar sus emisiones conforme al Acuerdo de París, artículo 4.4 (Organización de Naciones Unidas, 2015) y el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el

Cambio Climático (CMNUCC); específicamente, el artículo 2, busca estabilizar las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (Organización de Naciones Unidas, 1992), así como alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) (Ministerio de Ambiente, 2019). Con estos compromisos en mente, la Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN2) de Panamá, tiene previsto incluir el 50% de los manglares en el Sistema Nacional de Áreas protegidas, aumentar un 1% en la cobertura, y reforestar o bien restaurar 1,800 hectáreas (Ministerio de Ambiente, 2024). Sin embargo, para cumplir con las metas planteadas, es esencial generar información científica para respaldar la implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza, en particular la conservación y la valoración económica de los manglares.

Esta investigación se enfoca en comprender la dinámica de carbono en los manglares de la costa del Pacífico de Panamá, con el propósito de analizar las posibles variables que afectan las emisiones de carbono. Se busca proporcionar información que facilite la comprensión de los GEI en los ecosistemas de manglares y liberación a la atmósfera. Esto ayudara a mejorar las estimaciones sobre la contribución neta de este ecosistema a la mitigación de GEI. A nivel profesional, me permitirá ingresar en la línea de investigación de ecosistemas marinos costeros y su rol frente al cambio climático.

## HIPÓTESIS

Para este proyecto de investigación, se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H<sub>0</sub>): El incremento de la marea no aumenta significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los árboles y suelos de los manglares dominados por la especie *Avicennia bicolor*.

Hipótesis alternativa (H<sub>i</sub>): El incremento de la marea aumenta significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los árboles y suelos de los manglares dominados por la especie *Avicennia bicolor*.

## OBJETIVOS

### A) OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la influencia de los ciclos mareales sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) en comunidades de mangle dominadas por *Avicennia bicolor* en Bahía de Parita, Panamá.

### B) OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Determinar reservorios de carbono<sup>1</sup> en comunidades de *Avicennia bicolor*.
2. Registrar la fluctuación del nivel freático asociado al ciclo mareal en comunidades de *Avicennia bicolor*.
3. Medir fluxes<sup>2</sup> diurnos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en comunidades de mangle dominadas por *Avicennia bicolor*.

---

<sup>1</sup> Reservorio de carbono: cantidad de carbono que contiene un depósito/ecosistema (IPCC, 2022).

<sup>2</sup> Flux: se define como la transferencia de un elemento en unidades de medida de masa por unidad de área por tiempo (*e.g.*, tC ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) (IPCC, 2000). Para la redacción del contenido este término será reemplazado por el término emisiones.

## CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

En respuesta a la creciente importancia de la mitigación del cambio climático, en las últimas décadas, se han llevado a cabo estudios con el objetivo de determinar la cantidad de carbono almacenado (reservorio de carbono) y las emisiones o captura de gases de efecto invernadero (GEI) en los manglares.

### 2.1 Reservorios de carbono

Los ecosistemas tienen la capacidad de almacenar carbono, un proceso que implica la retención de este elemento durante extensos períodos en un sistema particular (IPCC et al., 2018). Esta capacidad difiere del concepto de reserva de carbono, que se define como la cantidad total de este elemento presente en un ecosistema en un momento dado (IPCC, 2000). Los manglares, por ejemplo, almacenan carbono en dos reservas: i) carbono presente en biomasa viva y muerta, y ii) carbono orgánico en el suelo. Estos reservorios incluyen tanto la biomasa superficial (*i.e.*, follaje, ramas, troncos) como la materia orgánica subterránea (*i.e.*, raíces y restos de materia orgánica parcialmente descompuestos) (Murray et al., 2011).

Los bosques de manglar están entre los ecosistemas tropicales con mayores reservas de carbono del planeta. En promedio, los manglares contienen  $856 \pm 32$  Mg de carbono por hectárea (Kauffman et al., 2020). Se estima que, entre el 49% y 98% del carbono total en los ecosistemas de manglares se encuentra en el suelo (reservorios superficiales + reservorios subsuperficiales) (Donato et al., 2011; Murray et al., 2011). La cantidad de carbono estimada para los manglares de Panamá es de 459.6 Mg por hectárea a una profundidad de un metro del suelo, de los cuales el 87 % se almacena en el mismo (Global Mangrove Watch, 2023).

### 2.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

#### 2.2.1 Emisiones de Suelo

En el suelo se pueden generar emisiones de GEI, como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, debido a procesos naturales como la respiración de los organismos y la descomposición de materia orgánica (Alongi et al., 2001; Chen et al., 2014; Dutaur & Verchot, 2007; Ferry, 1992; Hanson et al., 2000; Kristensen et al., 1994; Kristensen, 1997; Topp & Pattey, 1997) .

Los suelos de manglar no son la excepción y suelen presentar condiciones que favorecen la producción de GEI. Por ejemplo, un suelo inundado promueve la descomposición anaeróbica de materia orgánica, produciendo CH<sub>4</sub> a través del proceso de metanogénesis (Alongi et al., 2001; Alongi, 2005; Lin et al., 2020). Así mismo, la presencia de estructuras vegetales especializadas, como las raíces aéreas y neumatóforos, funcionan como conductos de intercambio de gases con la atmósfera. Por ejemplo, las raíces y neumatóforos transportan oxígeno hacia las estructuras vegetales subsuperficiales bajo condiciones de inundación, pero también conducen, en sentido contrario, el CO<sub>2</sub> derivado del proceso de respiración (Alongi, 2012; Howard et al., 2018; Murray et al., 2011). Además, las raíces aéreas y neumatóforos, facilitan el intercambio del CH<sub>4</sub> que se produce en el suelo hacia la atmósfera (Gauci et al., 2010; Purvaja et al., 2004).

La actividad de organismos, como los cangrejos y microorganismos descomponedores de materia orgánica en el suelo, también contribuyen con emisiones de CO<sub>2</sub> durante la respiración (Kristensen et al., 2022, 2008; Kuzyakov, 2006).

Los factores abióticos, que incluyen las propiedades físicas, químicas y ambientales del suelo (*e.g.*, humedad, porosidad, potencial redox, concentración de oxígeno, materia orgánica, niveles de salinidad y de nitrógeno), tienen un impacto significativo en las emisiones de GEI en los suelos de manglar (Chen et al., 2010, 2014; Cias et al., 2013; Goss & Oliver, 2023; IPCC et al., 2018; Konnerup et al., 2014). Otros factores a considerar son la topografía y la estacionalidad (Castellón et al., 2022).

Procesos bióticos y abióticos interactúan para regular las tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> desde el suelo hacia la atmósfera. En estudios globales realizados en suelos de manglar, se han medido emisiones de CO<sub>2</sub> obteniendo tasas en un rango desde -31 hasta 688.71 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, y emisiones de CH<sub>4</sub> relativamente bajas desde -0.0014 hasta 32.675 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Castillo et al., 2017; Chen et al., 2016; Dušek et al., 2021; Sheng et al., 2021).

A nivel regional, se han observado variaciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los suelos de manglar. Las emisiones de CO<sub>2</sub> presentan rangos desde -2,772.2 hasta 2,005.2 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y las emisiones de CH<sub>4</sub> han variado desde -0.156 hasta 350.6 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, (Hernández & Junca-Gómez, 2020; Konnerup et al., 2014; Perdomo, 2012). En manglares

específicos como los de Bahía de Panamá, se estimaron emisiones promedio de CO<sub>2</sub> de 1,330 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Gómez et al., 2023).

### 2.2.2 Emisiones en árboles

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en árboles están directamente relacionados con procesos metabólicos de las plantas (*i.e.*, fotosíntesis, respiración y transpiración), regulando así una parte de dichas emisiones (Amthor, 2000; Cias et al., 2013; Megonigal & Guenther, 2008; Teskey et al., 2008). El intercambio de ambos gases puede verse afectado por características de las plantas que funcionan como barreras fisiológicas (Barba et al., 2019; Covey & Megonigal, 2019; Maier et al., 2018; Pangala et al., 2013, 2017; Teskey et al., 2008; Vargas & Barba, 2019).

A través del proceso de transpiración, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> disuelto en el agua del suelo son absorbidos por las raíces, transportados por el xilema y liberados por la superficie de las plantas a través de estomas o lenticelas (Bloemen et al., 2013; Covey & Megonigal, 2019; Nouchi et al., 1990; Pangala et al., 2013, 2014; Pitz & Megonigal, 2017; Rusch & Rennenberg, 1998)

En la respiración se generan emisiones de CO<sub>2</sub> y se transporta CH<sub>4</sub> por medio del aerénquima. Ambos gases son liberados en diversas estructuras de la planta, como tallos, hojas y raíces (Covey & Megonigal, 2019; Jackson & Armstrong, 1999; Korrensalo et al., 2022; Teskey et al., 2008; Vargas & Barba, 2019). Un ejemplo de esto son las emisiones medidas en neumatóforos de mangles, que pueden representar hasta el 84% del total de las emisiones de CH<sub>4</sub> y están positivamente relacionadas con la cantidad de neumatóforos (Kreuzwieser et al., 2003; Lin et al., 2021; Pangala et al., 2013; Purvaja et al., 2004; Zhang et al., 2022).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> también pueden deberse a la presencia de microorganismos en el árbol, como bacterias metanogénicas que descomponen el duramen y producen CH<sub>4</sub>, o bacterias metanotróficas que consumen este compuesto, así como la presencia de hongos, tanto en el interior como en el exterior del árbol (Gao et al., 2021; Schink et al., 1981; Shortle et al., 1978; Wang et al., 2016, 2017; Zeikus & Ward, 1974). Otros organismos que podrían estar presentes son

plantas sin semillas y algas que forman cubiertas en los troncos de los árboles, contribuyendo también a las emisiones (Machacova et al., 2021).

Considerando los factores bióticos anteriores que afectan las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los árboles, también se deben tener en cuenta los factores abióticos. Estos factores incluyen componentes que influyen en los procesos fisiológicos de la planta, como la temperatura, el contenido de agua, la cantidad de oxígeno disponible en el interior del tallo, la salinidad y las propiedades del suelo (Gao et al., 2021; Ge et al., 2024; Megonigal et al., 2004; Pitz & Megonigal, 2017; Vargas & Barba, 2019; Wang et al., 2017; Yang et al., 2016).

Investigaciones en tallos de manglar han mostrado emisiones de CO<sub>2</sub> desde 0.00176 hasta 772.83 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y emisiones de CH<sub>4</sub> desde -2,099 hasta 3,602.5 CH<sub>4</sub> µg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, observando diferencias en las emisiones a medida que aumenta la altura del tallo y variabilidad entre las especies (Dušek et al., 2021; He et al., 2019; Jeffrey et al., 2019; Yong et al., 2024; Zhang et al., 2022).

### 2.3 Marea

Dado que la hipótesis general que se aborda en esta investigación se encuentra directamente relacionada a los ciclos mareales. A continuación, se presentan antecedentes específicos de este factor abiótico.

Las mareas son movimientos periódicos de las aguas del mar que regulan la entrada y salida de sedimentos, nutrientes y materia orgánica, facilitando el almacenamiento y transporte de carbono en los ecosistemas de manglar (Alongi, 2018; Friess et al., 2019; Li et al., 2024; Parker, 2018). Además, permiten el intercambio de gases y la eliminación de calor en este ecosistema (Alongi & Mukhopadhyay, 2014; Barr et al., 2013).

Las mareas siguen un ciclo de 24 horas y 50 minutos, que se caracteriza por la altura en la que fluctúan los niveles del mar entre marea alta y marea baja, correspondiendo a los niveles máximos y mínimos de mar (Hicks, 2006). Cuando la marea sube, aumenta el nivel de agua saturando el suelo y cuando la marea baja, el nivel de agua disminuye, causando variaciones de manera periódica en el nivel freático (Castellón et al., 2022; Chowdhury et al., 2018). Este ciclo influye

en las emisiones de GEI en ecosistemas de manglar generadas en suelo, sedimentos, tallos y agua (Cabral et al., 2024; Call et al., 2015, 2019; Jacotot et al., 2018; Lin et al., 2021; Maher et al., 2015; Yamamoto et al., 2009; Yong et al., 2024).

En manglares dominados por *Avicennia marina* (mangle nero) se han medido emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo durante el ciclo de la marea, obteniendo valores entre 3.96 – 1,086.36 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y 0.04576 – 42.592 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente, alcanzando su máximo nivel antes de la saturación completa del suelo (Lin et al., 2024). En tallos de manglar, las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> han mostrado variaciones condicionadas por los ciclos de marea y la especie, con emisiones desde 37.41 hasta 114.00 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y desde -66.3 hasta 42.9 μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Epron et al., 2023; Yong et al., 2024).



## CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Diseño de la investigación o Metodología de la investigación

La investigación se centró en describir cómo el ciclo de marea causó variaciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el suelo y en los árboles de manglar dominados por la especie *Avicennia bicolor* en Bahía de Parita, en la provincia de Coclé, distrito de Antón, corregimiento de Antón, ubicado en las coordenadas 8.3073°N y 80.3138°O. La información para los fluxes de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>; así como, las muestras correspondientes de suelo se colectaron en dos momentos diferentes durante la estación lluviosa entre los meses de junio y diciembre del 2023.

De manera complementaria y con la finalidad de caracterizar el sitio de estudio, se realizó la estimación de biomasa aérea (reservorios de carbono) y la caracterización fisicoquímica del suelo en la parcela establecida para medir los flux de carbono. De tal manera que, la investigación comprende tanto trabajo en campo como en laboratorio.

- Diseño Experimental:
  - a. Fluxes en suelo: 1 tipo de vegetación x 1 sitio x 2 subparcelas x 3 collares<sup>3</sup> x 4 puntos de marea x 3 triplicado x 3 días = 216 fluxes CO<sub>2</sub>; 216 fluxes CH<sub>4</sub>.
  - b. Fluxes en árboles: 1 tipo de vegetación x 1 sitio x 2 subparcelas x 2 árboles x 2alturas x 4 puntos de marea x 2 duplicados x 3 días x = 192 fluxes CO<sub>2</sub>; 192 fluxes CH<sub>4</sub>.
- Parámetros fisicoquímicos:
  - a. Caracterización suelo: pH, conductividad, humedad, materia orgánica, carbono, nitrógeno y fósforo total.
  - b. Caracterización de árboles: especie, diámetro a la altura del pecho (DAP), densidad de madera y altura total.
  - c. Emisiones de gases: CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo y árboles.

---

<sup>3</sup> Collares: Son tubos de PVC de 20 cm diámetro con 11.5 cm altura que ayudan a mantener un sello hermético entre el suelo y la cámara estática.

### 3.2 Área de estudio

El sitio de estudio se ubica en Bahía de Parita, específicamente en los manglares de la comunidad Los Azules, ubicado en el corregimiento Antón, distrito de Antón, provincia de Coclé, República de Panamá. Es un área abierta cuyas coordenadas son 8.3073°N y 80.3138°O.



**Figura 1.** Área de estudio: Bahía de Parita. A. Mapa de Panamá. B. Ubicación geográfica de Bahía de Parita en Panamá y coordenadas del sitio de muestreo en Los Azules, Antón, provincia de Coclé.

Bahía de Parita (BdP), se encuentra ubicada en región central del país, en las costas del Pacífico, abarcando las provincias de Coclé, Herrera y Los Santos (López & Díaz, 2023). Sus coordenadas geográficas son aproximadamente 8.3111°N 80.2269°O, 7.9550°N 80.3636°O. Posee una extensión de 47,318.26 ha (Guevara, 2024), e incluye alrededor de 15.000 ha de fangales intermareales (Castillo et al., 2021).

Debido a su ubicación geográfica, BdP forma parte del arco seco y presenta un clima tropical de sabana, con precipitaciones anuales menores a 1,000 mm año<sup>-1</sup>, según la clasificación de Köppen (Autoridad Nacional del Ambiente, 2009). En cuanto a la clasificación ecológica de las zonas de vida de L. R. Holdridge, en esta área predominan el bosque tropical seco y el bosque seco

premontano (Autoridad Nacional del Ambiente, 2010). El bosque tropical seco presenta un rango de precipitación entre 1,100 a 1,650 mm año<sup>-1</sup>, mientras que el bosque seco premontano registra precipitaciones menores a 1,100 mm año<sup>-1</sup>. En ambas zonas de vida, la temperatura se mantiene entre los 18 y 24 °C (Autoridad Nacional del Ambiente, 2010; Tosi, 1971) .

BdP comprende diversos humedales, como: ríos, ciénagas, lagos, manglares y llanuras de inundación, que incluyen áreas dedicadas a actividades como el cultivo de arroz, la producción de sal y la cría de camarones (López & Díaz, 2023). En este territorio se encuentran tres áreas protegidas: El Refugio de Vida Silvestre Cenegón del Mangle, el Parque Nacional Sarigua y el Refugio de Vida Silvestre Peñón de la Honda (Castillo et al., 2021; López & Díaz, 2023).

Los bosques de manglar en la Bahía de Parita abarcan una extensión de 12,641.31 ha (Castillo et al., 2021). Entre las especies de mangle reportadas se encuentran: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Avicennia bicolor* (mangle salado), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Conocarpus erectus* (mangle botón), *Rhizophora racemosa* (mangle caballero) y *Pelliciera rhizophorae* (mangle piñuelo) (Autoridad Nacional del Ambiente & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá, 2013; Castillo et al., 2021; López & Díaz, 2023).

Descripción de las tres zonas protegidas:

- Parque Nacional Sarigua: Este parque cuenta con una superficie total de 8,000 hectáreas, de las cuales 4,729.7 hectáreas corresponden a extensión terrestre (Ministerio de Ambiente, 2018).
- Refugio de Vida Silvestres Peñón de la Honda: Esta área protegida abarca 424.3 hectáreas de terreno y 1,942.5 hectáreas de área marina (Acuerdo Municipal N°32 Refugio de Vida Silvestre Peñon de La Honda, 2007)
- Refugio de Vida Silvestre Cenegón del Mangle: Este refugio tiene una cobertura de 900 hectáreas (Castillo et al., 2021)



#### 3.3.2.1.4 Densidad de madera:

3.3.2.1.4.1 Extracción de muestra: utilizando un barrenador forestal, se tomó un núcleo de madera del individuo, el cual fue colocado en un popote de 20 cm de longitud y rotulado con el nombre de la especie y parcela.



**Figura 3.** Extracción de núcleo de madera.



**Figura 4.** Núcleo de madera de *A. bicolor*.

3.3.2.1.4.2 Procedimiento de laboratorio: la muestra se mantuvo en un refrigerador por el menor tiempo posible, a una temperatura de 4 °C, antes de ser procesada. El núcleo fue medido con una regla de 30 cm de longitud, desde la parte interior (duramen) hasta la exterior (corteza), y luego fue cortado en segmentos de aproximadamente 5 cm cada uno.

Los segmentos obtenidos de núcleo principal se sumergieron en una probeta de 50 ml con agua destilada. La probeta fue colocada sobre una balanza Thomas Scientific modelo TSXT 320M para obtener el volumen de agua desplazada de cada segmento. Luego, los segmentos se colocaron en un horno de secado Memmert UN55 a 60°C por 3 días. Pasado este tiempo, se retiraron del horno utilizando un deshumidificador y se pesaron en la balanza.

Posteriormente, los segmentos se volvieron a colocar en el horno por 3 días a una temperatura de 105°C, y se pesaron nuevamente a esta temperatura. Finalmente, las muestras se guardaron en sus respectivos popotes.

3.3.2.1.4.3 Procesamiento de datos: los datos obtenidos de las muestras se registraron en una base de datos de Excel. Aplicando el principio de Arquímedes (Tippens, 2011), pudimos calcular la densidad de madera promediada a 60°C y a 105°C.

$$\text{Densidad de madera} = \frac{\text{Peso en el aire de la madera}}{\text{Peso en el aire de la madera} - \text{Peso sumergido de la madera}}$$

3.3.2.1.5 Aplicación de ecuaciones alométricas <sup>4</sup> para determinar biomasa de mangle: Utilizamos la densidad de madera en la aplicación de ecuaciones alométricas. Se aplicó la ecuación alométrica establecidas por Chave et al. (2014) para *Avicennia bicolor*.

Esta ecuación permitió estimar la biomasa aérea de cada individuo a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura del árbol (h) y la densidad de madera ( $\rho$ ).

$$ba = 0.0673 \cdot (\rho \cdot \text{DAP}^2 \cdot h)^{0.976}$$

3.3.2.1.6 Determinación de carbono en neumatóforos y hojas:

3.3.2.1.6.1 Extracción de muestra: de cada árbol seleccionado, se extrajeron muestras de hojas y de neumatóforos. Se recolectaron cinco hojas y cinco neumatóforos por cada individuo.

3.3.2.1.6.2 Procedimiento de laboratorio: las hojas y neumatóforos fueron secados en un horno a 105°C durante un periodo de 24 horas. Transcurrido este tiempo, fueron cernidos utilizando un mortero y posteriormente colocados en viales criogénicos de 2.0 ml, etiquetados de acuerdo con la especie y subparcela.

---

<sup>4</sup> Ecuaciones alométricas: son modelos matemáticos que relacionan características conocidas de los árboles con otras de mayor dificultad de conocer. Con estas ecuaciones, es posible determinar la biomasa completa de los árboles o la biomasa de alguna de sus partes (Howard et al., 2018; Jara et al., 2018)

De cada muestra de neumatóforos y hojas, agrupados por especie y subparcela, se tomó una cantidad 2 mg, los cuales fueron colocados en una cápsula de estaño con un tamaño de 9 x 5mm y pesados en una balanza analítica Mettler Toledo AX205. Posteriormente, estas muestras se procesaron en un analizador elemental total (Thermo Flash EA 1112, CE Instruments, Wigan, UK).



**Figura 5.** Hojas secas luego de estar 24 horas a 105 °C.



**Figura 6.** Pesaje de muestra de neumatóforo para determinar la cantidad de isótopos de carbono.

Los individuos de *Avicennia bicolor* seleccionados fueron los mismo en los que se midió las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el tallo.

### 3.3.3. Análisis fisicoquímicos de suelo

3.3.3.1 Extracción de muestras: se tomaron tres muestras de suelo superficial de manera aleatoria en la parcela establecida.

3.3.3.2 Procedimientos de laboratorio: las muestras de suelo fueron procesadas empleando la metodología publicada por Howard et al. (2018).

Los parámetros evaluados fueron:

3.3.3.2.1 Determinación de densidad de suelo: se realizó a través de dos medidas: la densidad aparente del suelo y contenido de carbono orgánico.

3.3.3.2.2 Determinación de densidad aparente de suelo: para esto, se requirió conocer la masa del suelo seco y su volumen original.

3.3.3.2.2.1 Determinación de masa de suelo seco:

Cada muestra se colocó en una charola de aluminio con un diámetro de 60 mm y se secó en un horno de secado Shel Lab modelo SMO28-2 a 70°C durante 72 horas, hasta que alcanzó un peso constante. Luego de este período, las muestras se retiraron del horno y se dejaron enfriar en un desecador durante aproximadamente 10 minutos para igualar la temperatura ambiente. Posteriormente, se pesaron en una balanza de Thomas Scientific modelo TSXT 320M.



**Figura 7.** Muestras de los primeros 50 cm de profundidad del suelo de manglar. Se tomó una muestra cada 10 cm.



**Figura 8.** Muestras de suelo de manglar secas en un desecador.

3.3.3.2.2.2 Determinación de volumen original de muestra:

Se calculó utilizando la ecuación:

$$Volumen\ original = [\pi * (radio\ del\ nucleador)^2] * (profundidad\ de\ la\ muestra, h)$$

3.3.3.2.3 Determinación de Carbono orgánico de muestra seca.

Se llevó a cabo utilizando dos métodos: el analizador automático de elementos y la técnica de pérdida por ignición (LOI) (Howard et al., 2018). Con un mortero de porcelana se trituro cada muestra que se pesó previamente. Una parte de la muestra se destinó para el proceso de LOI, mientras que la otra parte se utilizó en el analizador de elementos.



3.2.1.2.1 Técnica de Pérdida por ignición (LOI): esta técnica relacionó la pérdida de masa con la cantidad de materia orgánica presente en la muestra (Howard et al., 2018).

Se tomó aproximadamente la mitad de la muestra triturada, como mínimo 2 g de cada muestra, y se colocó en crisoles de 20 mm. Estos se introdujeron en la mufla a 550°C durante 1 hora. Después de este proceso, se dejaron enfriar durante 24 horas antes de pesar las cenizas restantes resultantes de la combustión en una balanza analítica.



**Figura 9.** Pesaje de muestras de suelo secas para LOI.



**Figura 10.** Muestras de suelo después de 1h a 550 °C en un deshumidificador.

3.2.1.2.2 Método con analizador de elementos: Este método utiliza la combustión seca para estimar el carbono orgánico e inorgánico de la muestra (Howard et al., 2018).

La mitad de la muestra fue cernida con un mortero y pilón, con esta se llenó 2 viales criogénicos de 2.0 ml cada uno. Posteriormente, se realizó una prueba de acidificación en cada muestra para determinar la presencia de carbonato de calcio y su porcentaje.

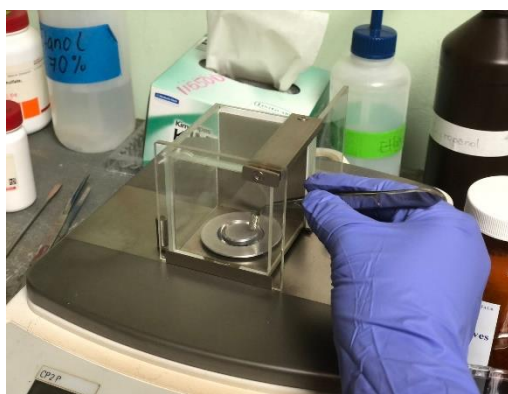
Prueba de Acidificación: se colocó una pequeña parte de la muestra homogeneizada en una placa Petri. Sobre esta muestra, se añadió una gota de Ácido clorhídrico (HCl) 1M utilizando un gotero. Si la muestra presenta burbujas al agregar el ácido, confirma la presencia de carbonatos. Las burbujas observadas corresponden a CO<sub>2</sub> en forma gaseosa.

Las muestras con resultado negativo a la presencia de carbonatos fueron procesadas de la siguiente manera: se pesaron 80 mg de suelo en una balanza analítica Mettler Toledo AX205, utilizando una cápsula de estaño. Esta muestra fue introducida en el analizador de elementos, que generó una gráfica que representaba la cantidad de carbono, expresada en porcentaje de carbono. El equipo también mide la cantidad de nitrógeno presente en la muestra de suelo.

El restante de la muestra fue conservado en pequeñas bolsas de plásticos para su posterior análisis de fósforo.



**Figura 11.** Materiales para la prueba de acidificación.



**Figura 12.** Peso de muestras de suelo para analizar contenido de carbono.

#### 3.3.3.2.4 Análisis de fósforo: protocolo de laboratorio Turner (2007).

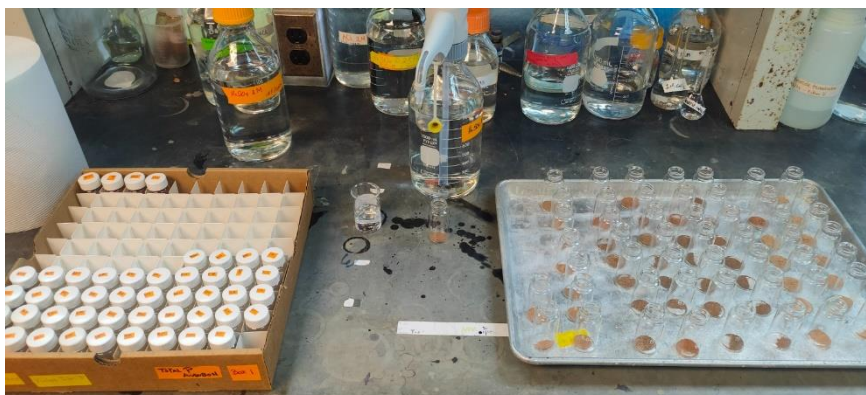
Se tomó 600 mg de la muestra suelo previamente molida y seca, la cual fue pesada en una cápsula de aluminio utilizando una balanza analítica. Posteriormente, la muestra se colocó en un horno de secado a una temperatura de 105°C durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente utilizando un deshumidificador, para luego proceder a pesarla.

Después de pesar la muestra, esta se reintrodujo en una mufla a una temperatura de 550 °C por un periodo de 1 hora. Luego, utilizando el deshumidificador, se retiró la muestra del horno y se dejó enfriar para pesarla por segunda vez.

A continuación, la muestra fue transferida a un tubo de centrifuga de 50 ml y se le agregó 30 ml de Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 1M con una pipeta dispensadora. Una vez que la muestra estuvo en el

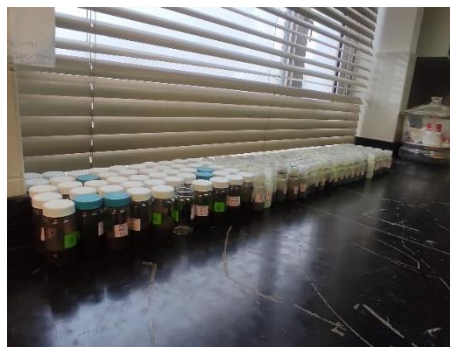
tubo, se agitó durante 16 horas a una velocidad baja. Cumplido este paso, se procedió a centrifugar a una velocidad de 8180 r.p.m durante 10 minutos.

La cantidad de fosfato se determinó usando el método Lachat Quickchem 10-115-01-1-B. La cantidad de fósforo total se obtuvo multiplicando la concentración de fosfato en  $\text{mg P L}^{-1}$  por 30 dividiendo el resultado por el peso seco obtenido en el horno.



**Figura 13.** Preparación de muestras para el análisis de fósforo del suelo de manglar.

3.3.3.2.5 pH y conductividad: se tomó 10 g de la muestra de suelo para realizar la prueba de pH y conductividad. Estos 10 g de muestra se colocaron en un vial de 50 ml y se mezclaron con 20 ml de agua desionizada. Utilizando un medidor de pH y conductividad Mettler Toledo Seven Direct SD23, se procedió a tomar el pH y conductividad simultáneamente. Además, se realizó una segunda toma de pH, pero esta vez se añadió 0.2 ml de  $\text{CaCl}_2$  a 1.0 M a las muestras antes de realizar la medición.



**Figura 14.** Muestras de suelo para pH y conductividad.



**Figura 15.** Medición de pH a la muestra de suelo.

### 3.3.4. Medición de marea

Se utilizó un tubo PVC con un diámetro de 50.8 mm y una longitud de 200 cm. Este fue ranurado diagonalmente a sus costados, dejando los primeros 50 cm sin ranurar. El extremo ranurado del tubo fue sellado por el fondo. El tubo se enterró en el suelo a una profundidad de 150 cm, dejando los primeros 50 cm sin enterrar. En el extremo sin enterrar se colocó la otra tapa, la cual contará con un gancho al que se le sujetará un alambre de 150 cm. En este alambre que se le fijó un registrador de datos de nivel de agua HOBO U20L-0x. Ambos extremos del tubo fueron sellados.

Además, a una distancia de 1 metro del tubo enterrado se colocó otro registrador que midió la presión atmosférica.



**Figura 16.** Instalación de tubo de PVC para el registro del nivel de agua.



**Figura 17.** Retiro del registrador de nivel de agua HOBO U20L-0x.

### 3.3.5. Medición de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo y árboles

#### 3.3.5.1 Medición de emisiones en suelo:

Se estableció un transecto con dos ejes perpendiculares a la costa. Se colocaron 3 collares por transecto, separados por una distancia de 15 m entre cada uno. Para medir los gases de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el suelo, se utilizó una cámara estática <sup>5</sup>inteligente LI-COR 8200-01S, la cual se conectó al

---

<sup>5</sup> Cámara estática: Es un método para medir el flujo de carbono directamente en el lugar. Consiste en un sistema cerrado que atrapa los gases que se encuentra entre el suelo, las plantas o partes de plantas (como las raíces) y el espacio de la cámara. Se mide el cambio de concentración que presenten los gases consumidos o emitidos durante un periodo (Howard et al., 2018).

Analizador de gases traza de LI-7810 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. El analizador registró la concentración de estos gases aproximadamente durante 3 minutos, con tres repeticiones. Simultáneamente, se registró la temperatura y humedad utilizando el registrador HOBO MX2202.



**Figura 18.** Medición de gases en suelo durante la marea alta.



**Figura 19.** Anillo de PVC para la medición de gases en suelo. En el interior y exterior del anillo se encuentran neumatóforos.

### 3.3.5.2 Medición de emisiones en árboles

En una vegetación predominante por *Avicennia bicolor*, se seleccionaron 2 árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) entre 50 y 90 cm de circunferencia, en los cuales se midió las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> a diferentes alturas categorizadas en menores a 1.00 m, menores de 1.50 m y mayores de 1.70 m. Para estas mediciones, se utilizó una cámara con un área de 1147.5 cm<sup>2</sup>, la cual estuvo incorporada al Analizador de gases traza de LI-7810 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. Los gases fueron medidos en secciones de cortezas sin defectos.

La cámara para mediciones de emisiones en los tallos de árboles se construyó con una base de tapete de espuma gruesa para lograr un sello hermético y fue hecha de plástico acrílico. Las cámaras fueron asegurados con 2 o 3 correas de amarre.



**Figura 20.** Medición de gases en árbol de *A. bicolor* a una



**Figura 21.** Cámara para la medición de gases en árboles.

### 3.3.6. Análisis de datos

#### 3.3.6.1 Análisis estadísticos para las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo y árboles

Los datos obtenidos fueron transformados a Logaritmos base 10 para aproximarlos a una distribución normal. Se consideró un valor de significancia de  $p < 0.05$ .

#### Análisis de varianza unidireccional (ANOVA)

Se aplicó un ANOVA para determinar la presencia o ausencia de diferencias significativas entre las emisiones generadas según el ciclo de marea. Este análisis compara las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en suelo en marea baja, subiendo, alta y bajando. También, compara los flux de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en árboles a alturas diferentes según las cuatro categorías de marea.

#### Test post hoc - Comparación por pares de Tukey

La prueba se realizó para determinar la diferencia entre los flux de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> entre cuatro categorías de marea.

Se realizó utilizando el programa Jamovi 2.4.14.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Reservorios de carbono

#### 4.1.1 Análisis fisicoquímicos de árboles

La cantidad de biomasa en árboles vivos de una subparcela de *Avicennia* fue de 174.8 Mg ha<sup>-1</sup>, esto equivale a un almacenamiento de carbono de 87.4 MgC ha<sup>-1</sup>.

En la (Tabla 1) se presentan los resultados de los análisis realizados en los árboles de la subparcela de *Avicennia* y en el sitio de medición de gases de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

**Tabla 1.** Análisis fisicoquímicos de árboles

Parámetros	Contenido
Densidad de madera de <i>A. bicolor</i> 60 °C	0.77 g cm <sup>-3</sup>
Densidad de madera de <i>A. bicolor</i> 105°C	0.76 g cm <sup>-3</sup>
Densidad de madera de <i>A. germinans</i> 60°C	0.73 g cm <sup>-3</sup>
Densidad de madera de <i>A. germinans</i> 105°C	0.71 g cm <sup>-3</sup>
Cantidad de carbono en neumatóforos de <i>A. bicolor</i>	34.92 %
Cantidad de carbono en hojas de <i>A. bicolor</i>	36.81 %

#### 4.1.2 Análisis fisicoquímicos de suelo

La cantidad de carbono estimado en el suelo a una profundidad de 50 cm en una subparcela de *Avicennia*, obtenida mediante el método de LOI fue de 133.42 MgC ha<sup>-1</sup> y a través del análisis de elementos fue de 47.52 MgC ha<sup>-1</sup> (Tabla 2).

**Tabla 2.** Contenido de carbono en los primeros 50 cm de profundidad del suelo en una subparcela de *Avicennia*

Profundidad (cm)	Método de estimación de carbono	
	LOI (MgC ha <sup>-1</sup> )	Análisis de elementos (MgC ha <sup>-1</sup> )
50	133.42	47.52

La cantidad de carbono total (suelo + árboles vivos) en la subparcela de *Avicennia*, estimada mediante el método LOI, es de 220.82 MgC ha<sup>-1</sup>, mientras que el análisis de elementos estima un total de 134.92 MgC ha<sup>-1</sup>.

En la (Tabla 3) se presentan los resultados del análisis fisicoquímico del suelo a 5 cm de profundidad en una población de *Avicennia bicolor*, correspondiente al sitio de medición de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

**Tabla 3.** Análisis fisicoquímicos del suelo a una profundidad de 5 cm en la población de *Avicennia bicolor*.

Parámetros	Contenido (0-5cm)
Densidad de suelo	0.22 g cm <sup>-3</sup>
Densidad aparente de suelo	0.89 g cm <sup>-3</sup>
Masa de suelo seco	26.67 g
Volumen original de la muestra	29.69 cm <sup>-3</sup>
Carbono orgánico por LOI	8.39 %
Cantidad de carbono por LOI	27.96 MgC ha <sup>-1</sup>
Carbono orgánico con analizador automático de elementos	2.48%
Cantidad de carbono con analizador de elementos	7.08 MgC ha <sup>-1</sup>
Nitrógeno	0.17%
Fósforo	488.03 mgP kg <sup>-1</sup>
pH (w)	6.89
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6.14
Conductividad	4.08 mS cm <sup>-1</sup>

## 4.2. Influencia de la marea sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo y árboles

### 4.2.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo

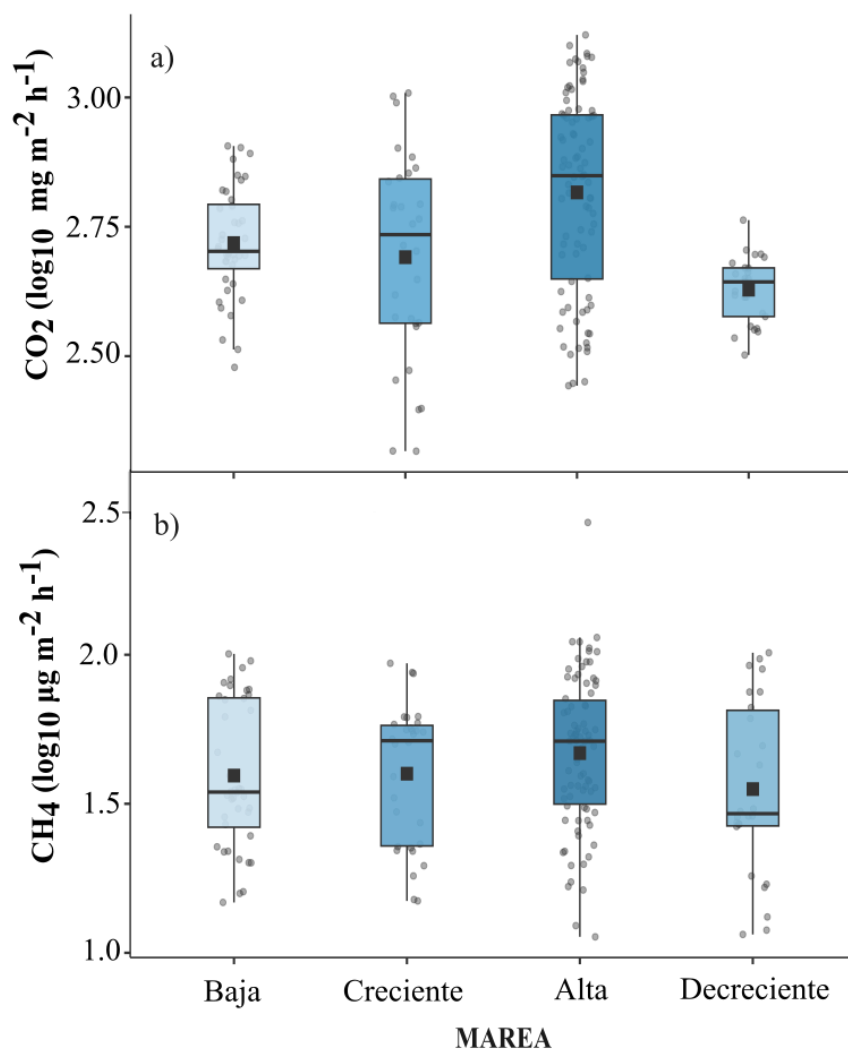
Los valores promedio de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo fueron de  $607 \pm 18.9$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y  $49.9 \pm 2.4$  µg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 3, Figura 22).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> oscilaron entre 207.17 y 1,320.53 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> durante el ciclo de marea (Figura 22a). El ANOVA reveló una diferencia significativa en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el ciclo de marea (CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)  $F_{3, 175} = 10.9$ ;  $P < 0.05$ ). La prueba post hoc de Tukey mostró que las emisiones de CO<sub>2</sub> en marea alta fueron significativamente diferentes en comparación con las demás categorías de marea (Anexo – Tabla 6). A pesar de esta diferencia, la media de las emisiones de CO<sub>2</sub> se mantuvieron constantes respecto al ciclo de la marea (Figura 22a).

También, se observó un incremento y mayor variabilidad en las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la marea alta, con emisiones promedio de 716.50 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 3). Las emisiones más bajas se registraron durante la marea decreciente, con un valor de 429.59 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 3, Figura 22a).



Las emisiones de CH<sub>4</sub> variaron entre 11.3 y 277.9 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a lo largo del ciclo de marea (Tabla 3, Figura 22b). Los análisis estadísticos indican que no hay diferencia significativa entre las emisiones de CH<sub>4</sub> durante un ciclo de marea (CH<sub>4</sub> (μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) F<sub>3,174</sub> = 1.88; P > 0.05). Sin embargo, se observó que la media de las emisiones de CH<sub>4</sub> variaron en relación con el nivel de marea, con valores más altos durante la marea alta y menores durante la marea baja (Figura 22b). La emisión promedio más alta de CH<sub>4</sub> fue de 55.4 μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> durante la marea alta y la emisión promedio más baja de CH<sub>4</sub> fue de 43.8 μg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> durante la marea decreciente (Tabla 3).



**Figura 22.** Emisiones de suelo en manglares de *Avicennia bicolor* durante el ciclo de marea: **a)** CO<sub>2</sub> (log<sub>10</sub> mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y **b)** CH<sub>4</sub> (log<sub>10</sub> μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

**Tabla 4.** Estadística descriptiva de emisiones de CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y CH<sub>4</sub> (μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) en suelo dominados por *Avicennia bicolor* (promedio ± SEM).

	Categoría de marea	N	Media	Mínimo	Máximo
<b>CO<sub>2</sub></b>	baja	40	538.23 ± 20.61	300.83	805.58
	creciente	30	541.22 ± 42.66	207.17	1019.90
	alta	84	716.50 ± 31.48	277.22	1320.53
	decreciente	25	429.59 ± 12.66	317.88	579.31
<b>CH<sub>4</sub></b>	baja	40	45.9 ± 4.07	14.8	100.7
	creciente	30	45.5 ± 4.05	14.9	93.6
	alta	82	55.4 ± 4.03	11.3	277.9
	decreciente	26	43.8 ± 5.64	11.5	101.6

#### 4.2.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en árboles

Las emisiones de CO<sub>2</sub> en *Avicennia bicolor* oscilaron entre 163.93 y 1,027.92 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 5, Figura 23a). Según el análisis ANOVA, existen diferencias significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> de los tallos de *A. bicolor* a lo largo del ciclo de marea (CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) F<sub>3, 131</sub> = 13.3; P < 0.05). La prueba post hoc Tukey confirmó que las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la marea creciente fueron significativamente diferentes en comparación a las demás categorías de marea (Anexo – Tabla 7). No se observaron diferencias significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> medidas a distintas alturas del tallo.

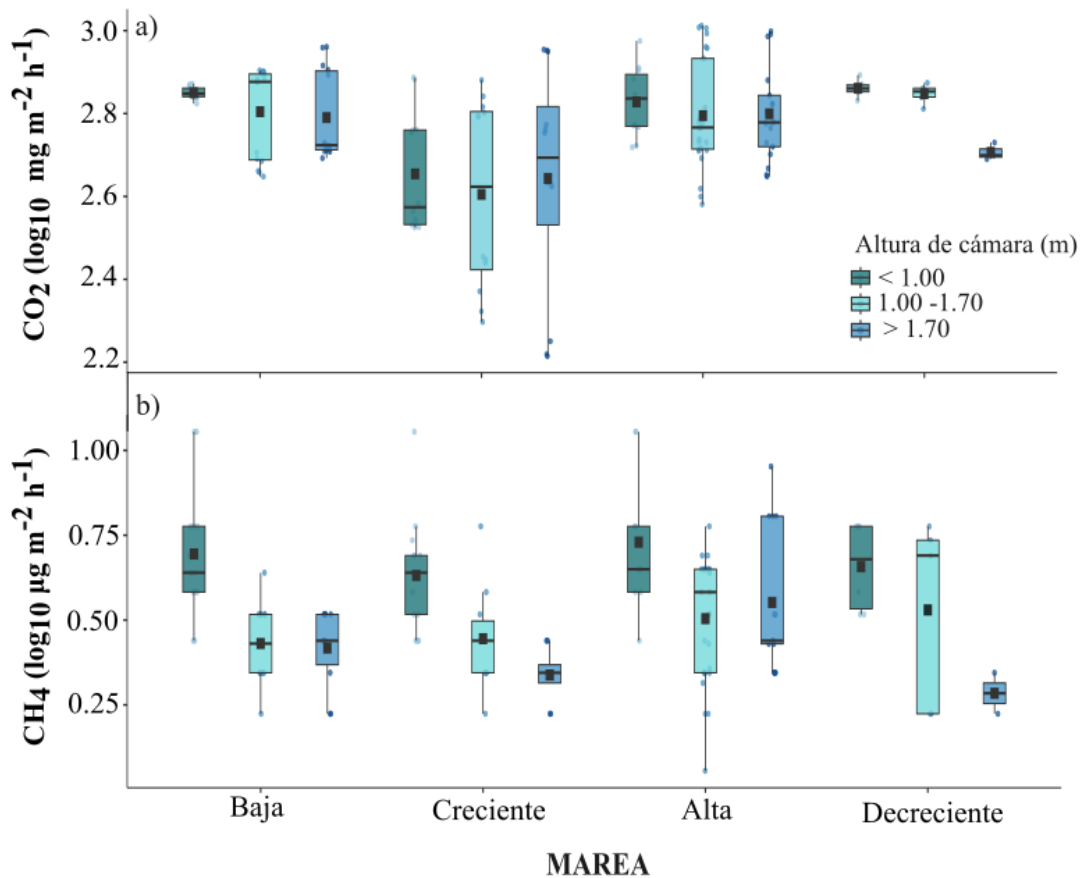
Las emisiones promedio más altas de CO<sub>2</sub> fueron de 726.77 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, registradas a una altura < 1m durante la marea decreciente (Figura 23a). En contraste, la emisión promedio más baja fue de 455.58 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> durante la marea creciente, a un rango de altura entre 1 – 1.7 m (Figura 23a). En general, las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron relativamente bajas durante la marea creciente (Tabla 5, Figura 23a).

Las emisiones de CH<sub>4</sub> variaron entre 0.54 y 10.75 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 5). De acuerdo, con el análisis ANOVA, hay diferencias significativas en las emisiones de CH<sub>4</sub> durante el ciclo de marea (CH<sub>4</sub> (μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) F<sub>3, 116</sub> = 3.24; P<0.05). Este análisis también mostró diferencias significativas en las emisiones de CH<sub>4</sub> de acuerdo con la altura de medición (CH<sub>4</sub> (μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) F<sub>2, 116</sub> = 20.68; P<0.05).

La prueba post hoc de Tukey reveló diferencias significativas en las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la marea creciente y la marea alta (Anexo – Tabla 8). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas al analizar ambos factores en conjunto.

La emisión promedio de CH<sub>4</sub> más alta fue de 5.40 µg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, registrada a una altura < 1m durante la marea alta (Tabla 5, Figura 23b). Por otro lado, la emisión promedio más baja fue de CH<sub>4</sub> fue de 1.34 µg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> durante la marea decreciente a una altura > 1.7 m (Tabla 5, Figura 23b).

Los valores promedio de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> fueron de 617 ± 16.0 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> y 3.23 ± 0.184 µg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 5).



**Figura 23.** Emisiones en árboles de *Avicennia bicolor* durante ciclo de marea: a) CO<sub>2</sub> (log<sub>10</sub> mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y b) CH<sub>4</sub> (log<sub>10</sub>µg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

**Tabla 5.** Estadística descriptiva de las emisiones de CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y CH<sub>4</sub> (μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) en árboles de *Avicennia bicolor*.

	Categoría de marea	Altura de cámara (m)	N	Media	Mínimo	Máximo
CO <sub>2</sub>	Baja	< 1.00	11	708.32	666.77	744.91
		1.00 -1.70	15	656.25	444.57	801.88
		> 1.70	14	635.51	492.28	913.83
	Creciente	< 1.00	12	475.45	335.12	770.23
		1.00 -1.70	12	455.58	198.23	759.48
		> 1.70	12	517.61	163.93	899.91
	Alta	< 1.00	11	684.74	523.32	944.24
		1.00 -1.70	25	652.72	381.15	1027.92
		> 1.70	17	651.25	444.91	996.48
	Decreciente	< 1.00	6	726.77	677.58	781.08
		1.00 -1.70	5	705.20	647.27	747.98
		> 1.70	3	508.96	489.59	536.88
CH <sub>4</sub>	Baja	< 1.00	13	4.88	2.15	10.75
		1.00 -1.70	12	2.19	1.08	3.76
		> 1.70	10	2.10	1.08	2.69
	Creciente	< 1.00	13	4.05	2.15	10.75
		1.00 -1.70	10	2.36	1.08	5.37
		> 1.70	8	1.61	1.08	2.15
	Alta	< 1.00	9	5.40	2.15	10.75
		1.00 -1.70	27	2.85	0.54	5.37
		> 1.70	13	3.42	1.61	8.37
	Decreciente	< 1.00	6	4.12	2.69	5.37
		1.00 -1.70	5	3.33	1.08	5.37
		> 1.70	2	1.34	1.08	1.61

## CAPITULO V: DISCUSIÓN

### 5.1 Reservorios de carbono

Nuestros resultados muestran que los árboles vivos y el suelo hasta 50 cm de profundidad en la subparcela de *Avicennia* almacenan entre 134.9 y 220.8 MgC ha<sup>-1</sup>, una estimación parcial del carbono total en la subparcela. Esta cantidad es menor que los 459.6 MgC ha<sup>-1</sup> reportados para Panamá, que incluyen la biomasa aérea y el suelo hasta un metro de profundidad (Global Mangrove Watch, 2023).

En cuanto al carbono almacenado en el suelo, encontramos que los primeros 50 cm concentran entre el 35.21% y el 60.41% del total medido. Estas variaciones responden a los métodos empleados: el método LOI mostró mayores valores de carbono, aunque es susceptible a sobreestimaciones en suelos que tienen más del 11% de arcilla y presencia de carbonatos, ya que también incluye el agua perdida como materia orgánica (Howard et al., 2018). En cambio, el analizador automático de elementos proporciona una medida más precisa al cuantificar únicamente el carbono presente en la muestra. Nuestros datos sugieren que el suelo podría ser el principal reservorio de carbono en los manglares, es importante considerar factores como la cantidad de materia orgánica en descomposición y la profundidad del suelo (Donato et al., 2011; Kauffman et al., 2020).

Los parámetros fisicoquímicos de los primeros 5 cm del suelo muestran características típicas de suelos de manglar. La baja densidad y densidad aparente indican alta porosidad y un buen almacenamiento de materia orgánica (Moreno-Casasola & Warner, 2009). El análisis de LOI reveló un mayor contenido de carbono que el analizador automático, en línea con los resultados previos. Además, el contenido de nitrógeno es bajo mientras que el fósforo presenta niveles elevados, probablemente debido a la entrada de agua de mar. El pH, aunque ligeramente ácido, está dentro del rango adecuado para manglares y la elevada conductividad es característica de los ambientes salinos (Hossain & Nuruddein, 2016).

Respecto al carbono en la biomasa aérea, nuestro estudio estima que los árboles vivos almacenan 87.4 MgC ha<sup>-1</sup>, en comparación con los 70.63 MgC ha<sup>-1</sup> reportados a nivel nacional en Panamá (Global Mangrove Watch, 2023). Esta diferencia podría deberse a variaciones en la composición de especies, estructura del bosque, densidad del dosel y/o edad de los árboles. Cabe destacar que la estimación nacional de biomasa aérea abarca todas las especies del territorio, mientras que nuestro estudio se restringe a dos especies en una zona delimitada. Las densidades empleadas para estimar el carbono en *Avicennia germinans* y *Avicennia bicolor* de esta investigación son consistentes con las estimaciones previas para ambas especies en América Central y Sur (Chave et al., 2006; Howard et al., 2018; Swenson & Enquist, 2007).

### 5.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo y árboles

Nuestro estudio demostró que la marea influye parcialmente en las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> tanto en suelo como en los árboles de manglar. Sin embargo, las emisiones en estos dos componentes se

comportaron de manera diferente a lo largo del ciclo de la marea. Es relevante señalar que para la toma de las emisiones en suelo no se discriminó la presencia de neumatóforos.

### 5.2.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en suelo

Las emisiones de CO<sub>2</sub> en el suelo mostraron un comportamiento similar a lo largo del ciclo de marea. Esto podría explicarse por la influencia de procesos biogeoquímicos adicionales que ocurren en el suelo, particularmente debido a la vegetación y la presencia de raíces de *A. bicolor*, neumatóforos. Estas estructuras pueden aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la marea alta al absorber oxígeno en condiciones de inundación (Alongi, 2012). Estudios previos respaldan que los neumatóforos elevan las emisiones de CO<sub>2</sub> en estos ecosistemas (Kristensen et al., 2022; Lin et al., 2021; Sheng et al., 2021).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> observadas en este estudio se encuentran dentro de los intervalos reportados en estudios previos sobre ecosistemas de manglar (Castillo et al., 2017; Dušek et al., 2021; Perdomo, 2012; Sheng et al., 2021). Sin embargo, la emisión media de CO<sub>2</sub> fue aproximadamente un 54.4% inferior a la registrada en la Bahía de Panamá (Gómez et al., 2023). Esto podría deberse al estado de conservación del área de estudio, ya que investigaciones anteriores han mostrado que los manglares prístinos emiten menores cantidades de CO<sub>2</sub> en comparación con aquellos perturbados por actividades humanas (Barroso et al., 2022; Maher et al., 2015).

Por otro lado, aunque las emisiones de CH<sub>4</sub> no mostraron diferencias entre las cuatro categorías de marea, las medias sugieren una relación con el nivel de la marea. Las emisiones de CH<sub>4</sub> aumentan a medida que la marea sube y disminuyen cuando baja. Este patrón concuerda con la dinámica del CH<sub>4</sub> en suelos inundados y con lo previamente reportado sobre el efecto de las mareas en las emisiones (Lin et al., 2024; Topp & Pattey, 1997). Durante la marea alta, la reducción de oxígeno en el suelo favorece la actividad metanogénica, lo que aumenta las emisiones de CH<sub>4</sub> (Alongi, 1998; Kristensen et al., 2008). Cuando la marea baja, el suelo se oxigena, lo que reduce la producción de CH<sub>4</sub> y facilita su oxidación por bacterias metanotróficas, explicando la disminución en las emisiones durante la marea baja (Alongi et al., 2001b).

Las emisiones de CH<sub>4</sub> en suelo de este estudio son comparable con investigaciones previas que han reportado emisiones bajas en ecosistemas de manglar (Castillo et al., 2017; Chen et al., 2016; Dušek et al., 2021). Las bajas emisiones de CH<sub>4</sub> observadas en este estudio podrían deberse a la alta salinidad del suelo, que inhibe la metanogénesis o a la limitada disponibilidad de materia orgánica para descomposición (Alongi et al., 2001b; Poffenbarger et al., 2011; Purvaja & Ramesh, 2001). Además, la competencia entre las bacterias reductoras de sulfato y las arqueas metanogénicas podría reducir aún más la producción de CH<sub>4</sub> en los suelos de manglar (Alongi et al., 2001b; Kristensen et al., 1994; Purvaja et al., 2004).

### 5.2.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en árboles

Las emisiones de CO<sub>2</sub> en los tallos de *A. bicolor* estuvieron dentro de rangos similares a los registrados previamente en *A. marina*, con niveles más bajos durante la marea creciente en comparación con la marea baja (Yong et al., 2024). Esta disminución durante la marea creciente podría estar relacionada con la mayor saturación del suelo, que limitaría la difusión del CO<sub>2</sub> desde las raíces hacia el tallo (Jackson & Armstrong, 1999; Teskey et al., 2007). Durante la marea alta (no superó los 10 cm sobre la superficie del suelo), las emisiones fueron mayores que en marea creciente. Aunque un nivel de agua más elevado podría afectar la difusión de gases (CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) en los tallos y raíces, nuestros resultados no muestran este efecto (Kitaya et al., 2002; Yamamoto et al., 2009), sugiriendo la posible influencia de otros procesos en el aumento de las emisiones durante la marea alta. Futuros estudios en condiciones de mayor inundación podrían ayudar a verificar si hay cambios en la difusión de gases bajo estas circunstancias.

Otro factor que pudo influir en los resultados fueron las lluvias previas o durante el muestreo, junto con los días nublados característicos de la época lluviosa. Estas condiciones podrían haber enmascarado el efecto de la marea en las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que procesos como la fotosíntesis y la respiración en las plantas están influenciados por el clima (Amthor, 2000; Vargas & Barba, 2019).

En cuanto a las emisiones de CH<sub>4</sub>, los árboles de *A. bicolor* mostraron diferencias entre marea creciente y marea alta, con menores emisiones durante la marea creciente y mayores en marea alta. Las emisiones medidas a alturas < 1m tendieron a aumentar en marea alta y a disminuir en marea baja, en un patrón que refleja el ciclo de marea y coincide con las emisiones de CH<sub>4</sub> desde el suelo. Sin embargo, las emisiones a alturas > 1m no siguieron una tendencia relacionada con el ciclo de la marea.

Estos resultados sugieren que los tallos de *A. bicolor* podrían actuar como conductos para el transporte de CH<sub>4</sub> desde el suelo a la atmósfera, especialmente a menores alturas, como lo han indicado estudios previos (Megonigal & Guenther, 2008; Takahashi et al., 2022; Yáñez-Espinosa & Angeles, 2022). A medida que el gas asciende en el tallo, las emisiones disminuyen, lo que explicaría la pérdida de correspondencia con el ciclo de marea a mayores alturas (Gao et al., 2021; Ge et al., 2024).

Las emisiones de CH<sub>4</sub> de *A. bicolor* observadas en este estudio se encuentran dentro del rango registrado para *A. marina*, aunque son menores en comparación con otros estudios en el mismo género (Dušek et al., 2021; Jeffrey et al., 2020; Yong et al., 2024). Esto podría atribuirse a una menor producción de CH<sub>4</sub> en el suelo de nuestro sitio de estudio, ya que la composición y

estructura del suelo, junto con las condiciones ambientales espaciales y temporales, influyen en la generación de este gas (Castellón et al., 2021, 2022).



## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la influencia del ciclo de la marea en las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en manglares dominados por *A. bicolor*, con el objetivo de comprender la dinámica de carbono en estos ecosistemas. Los resultados obtenidos indican que, aunque las emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo mostraron diferencia por la marea, otros factores podrían influir a mayor medida. Por otro lado, las emisiones de CH<sub>4</sub> mostraron una tendencia respecto al ciclo de marea, sugiriendo una relación entre el nivel freático del suelo y la emisión de este gas.

Además, se observó que los tallos de *A. bicolor* también contribuyeron a las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en los tallos parecen estar más relacionadas a los procesos fisiológicos de la especie, como la respiración. En contraste, las emisiones de CH<sub>4</sub> sugieren que los tallos pueden actuar como conductores del gas producido en el suelo.

En relación con el almacenamiento de carbono, los resultados confirman la importancia de las comunidades de *Avicennia* como reservorios de carbono, tanto en su biomasa área como en el suelo. Sin embargo, la variabilidad en el almacenamiento de carbono y los diferentes métodos de medición resaltan la necesidad de investigaciones adicionales por la complejidad de la estimación de carbono en estos ecosistemas.

En conclusión, este estudio contribuye a una mejor comprensión de la dinámica del carbono en poblaciones de *A. bicolor* en Panamá, como el rol de los manglares en la mitigación del cambio climático. Nuestros hallazgos destacan la importancia de considerar tanto los factores abióticos como los bióticos al evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero y el almacenamiento de carbono en estos ecosistemas costeros. Así mismo, la necesidad de conservar los manglares para mantener sus servicios ecosistémicos, especialmente el almacenamiento de carbono.

## CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo Municipal N°32 Refugio de Vida Silvestre Peñon de La Honda (2007).
- Agardy, T., Hicks, F., Nistharam, F., Fisam, A., Schmidh, A., & Grimsditch, G. (2017). *Ecosystem services asseement of North Ari Atoll*. IUCN and the Government of Maldives in collaboration with USAID and Forest Trends.  
<https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-003.pdf>
- Alongi, D. M. (1998). *Coastal Ecosystem Processes*. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781003057864>
- Alongi, D. M. (2005). *Mangrove microbe soil relations*.  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE060p0085>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D. M. (2018). Impact of global change on nutrient dynamics in mangrove forests. *Forests*, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/f9100596>
- Alongi, D. M., Wattayakorn, G., Pfitzner, J., Tirendi, F., Zagorskis, I., Brunskill, G. J., Davidson, A., & Clough, B. F. (2001a). Organic carbon accumulation and metabolic pathways in sediments of mangrove forests in southern Thailand. *Marine Geology*, 179(1), 85–103.  
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00195-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00195-5)
- Alongi, D. M., Wattayakorn, G., Pfitzner, J., Tirendi, F., Zagorskis, I., Brunskill, G. J., Davidson, A., & Clough, B. F. (2001b). Organic carbon accumulation and metabolic pathways in

- sediments of mangrove forests in southern Thailand. *Marine Geology*, 179(1), 85–103.  
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00195-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00195-5)
- Alongi, D., & Mukhopadhyay, S. (2014). Contribution of mangroves to coastal carbon cycling in low latitude seas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.005>
- Amthor, J. S. (2000). Respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 86(1), 1–20.  
<https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1175>
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2009). *Atlas de las tierras secas y degradadas de Panamá*.
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2010). *Atlas ambiental de la República de Panamá*.
- Autoridad Nacional del Ambiente, & Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá. (2013). *Manglares de Panamá: importancia, mejores prácticas y regulaciones vigentes*. 2013.
- Barba, J., Bradford, M. A., Brewer, P. E., Bruhn, D., Covey, K., van Haren, J., Megonigal, J. P., Mikkelsen, T. N., Pangala, S. R., Pihlatie, M., Poulter, B., Rivas-Ubach, A., Schadt, C. W., Terazawa, K., Warner, D. L., Zhang, Z., & Vargas, R. (2019). Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle. *New Phytologist*, 222(1), 18–28.  
<https://doi.org/10.1111/nph.15582>
- Barr, J. G., Fuentes, J. D., Delonge, M., O'halloran, T., Barr, D., & Zieman, J. C. (2013). Summertime influences of tidal energy advection on the surface energy balance in a mangrove forest. *Biogeosciences*, 10, 501–511. <https://doi.org/10.5194/bg-10-501-2013>, 2013.
- Barroso, G. C., Abril, G., Machado, W., Abuchacra, R. C., Peixoto, R. B., Bernardes, M., Marques, G. S., Sanders, C. J., Oliveira, G. B., Oliveira Filho, S. R., Amora-Nogueira, L., & Marotta, H. (2022). Linking eutrophication to carbon dioxide and methane emissions from exposed

- mangrove soils along an urban gradient. *Science of The Total Environment*, 850, 157988.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157988>
- Bloemen, J., McGuire, M. A., Aubrey, D. P., Teskey, R. O., & Steppe, K. (2013). Transport of root-respired CO<sub>2</sub> via the transpiration stream affects aboveground carbon assimilation and CO<sub>2</sub> efflux in trees. *New Phytologist*, 197(2), 555–565. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04366.x>
- Cabral, A., Yau, Y. Y. Y., Reithmaier, G. M. S., Cotovicz, L. C., Barreira, J., Broström, G., Viana, B., Fonseca, A. L., & Santos, I. R. (2024). Tidally driven porewater exchange and diel cycles control CO<sub>2</sub> fluxes in mangroves on local and global scales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 374, 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.04.020>
- Call, M., Maher, D. T., Santos, I. R., Ruiz-Halpern, S., Mangion, P., Sanders, C. J., Erler, D. V., Oakes, J. M., Rosentreter, J., Murray, R., & Eyre, B. D. (2015). Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes over semi-diurnal and spring–neap–spring timescales in a mangrove creek. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150, 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.11.023>
- Call, M., Santos, I. R., Dittmar, T., de Rezende, C. E., Asp, N. E., & Maher, D. T. (2019). High pore-water derived CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from a macro-tidal mangrove creek in the Amazon region. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247, 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.12.029>
- Castellón, S. E. M., Cattanio, J. H., Berrêdo, J. F., Rollnic, M., Neu, V., & Ribeiro, M. (2021). Spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane fluxes in an Amazonian estuary. *International Journal of Hydrology*, 5(6), 327–336. <https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00294>

- Castellon, S. E. M., Cattanio, J. H., Berredo, J., Paraense, M., Goeldi -Mpeg, E., Rollnic, M., Castellón, S. E. M., Cattanio, J. H., Berrêdo, J. F., De, M., Ruivo, L., & Noriega, C. (2022). Greenhouse gas fluxes in mangrove forest soil in the Amazon estuary. *Biogeosciences*, *19*, 5483–5497. <https://doi.org/10.5194/bg-2021-325>
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017). Soil greenhouse gas fluxes in tropical mangrove forests and in land uses on deforested mangrove lands. *CATENA*, *159*, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.08.005>
- Castillo, Y. B., Kim, K., & Kim, H. S. (2021). Thirty-two years of mangrove forest land cover change in Parita Bay, Panama. *Forest Science and Technology*, *17*(2), 67–79. <https://doi.org/10.1080/21580103.2021.1922512>
- CATHALAC. (2007). *Diagnóstico del estado actual de los manglares, su manejo y su relación con la pesquería*.
- Cerri, F., Louis, Y. D., Fallati, L., Siena, F., Mazumdar, A., Nicolai, R., Zitouni, M. S., Adam, A. S., Mohamed, S., Lavorano, S., & Galli, P. (2024). Mangroves of the Maldives: a review of their distribution, diversity, ecological importance and biodiversity of associated flora and fauna. *Aquatic Sciences*, *86*(2), 44. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01061-2>
- Chave, J., Muller-Landau, H. C., Baker, T. R., Easdale, T. A., ter Steege, H., & Webb, C. O. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, *16*(6), 2356–2367. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:rapvow\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:rapvow]2.0.co;2)
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A.,

- Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chen, G. C., Tam, N. F. Y., & Ye, Y. (2010). Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from mangrove soil in South China. *Science of The Total Environment*, 408(13), 2761–2767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.007>
- Chen, G. C., Ulumuddin, Y. I., Pramudji, S., Chen, S. Y., Chen, B., Ye, Y., Ou, D. Y., Ma, Z. Y., Huang, H., & Wang, J. K. (2014). Rich soil carbon and nitrogen but low atmospheric greenhouse gas fluxes from North Sulawesi mangrove swamps in Indonesia. *Science of The Total Environment*, 487, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.140>
- Chen, G., Chen, B., Yu, D., Tam, N. F. Y., Ye, Y., & Chen, S. (2016). Soil greenhouse gas emissions reduce the contribution of mangrove plants to the atmospheric cooling effect. *Environmental Research Letters*, 11(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124019>
- Chowdhury, T. R., Bramer, L., Hoyt, D. W., Kim, Y.-M., Metz, T. O., McCue, L. A., Diefenderfer, H. L., Jansson, J. K., & Bailey, V. (2018). Temporal dynamics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> loss potentials in response to rapid hydrological shifts in tidal freshwater wetland soils. *Ecological Engineering*, 114, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.041>
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. L., Myneni, R. B., Piao, S., Thornton, P., Qin, D., Plattner, G. -k, Tignor, M., Allen, S. K., ... Germany, V. B. (2013). *Carbon and other biogeochemical cycles. In: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental*

*Panel on Climate Change coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors.* Peter.

Código Civil de la República de Panamá (1916).

Covey, K. R., & Megonigal, J. P. (2019). Methane production and emissions in trees and forests. *New Phytologist*, 222(1), 35–51. <https://doi.org/10.1111/nph.15624>

Crooks, S., Herr, D., Tamelander, J., Laffoley, D., & Vandever, J. (2011). Mitigating climate change through restoration and management of coastal wetlands and near-shore marine ecosystems: challenges and opportunities. *Marine Ecosystem Series*, 69.

Dittmar, T., Hertkorn, N., Kattner, G., & Lara, R. J. (2006). Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(1). <https://doi.org/10.1029/2005GB002570>

Dittmar, T., & Lara, R. (2001). Do mangroves rather than rivers provide nutrients to coastal environments south of the Amazon River? Evidence from long-term flux measurements. *Marine Ecology Progress Series*, 213, 67–77. <https://doi.org/10.3354/meps213067>

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>

Dušek, J., Nguyen, V. X., Le, T. X., & Pavelka, M. (2021). Methane and carbon dioxide emissions from different ecosystems at the end of dry period in South Vietnam. *Tropical Ecology*, 62(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42965-020-00118-1>

Dutaur, L., & Verchot, L. V. (2007). A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4). <https://doi.org/10.1029/2006GB002734>

- Epron, D., Mochidome, T., Bassar, A. T. M. Z., & Suwa, R. (2023). Variability in methane emissions from stems and buttress roots of *Bruguiera gymnorrhiza* trees in a subtropical mangrove forest. *Ecological Research*, *n/a*(*n/a*). <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12415>
- Ferry, J. G. (1992). Biochemistry of Methanogenesis. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, *27*(6), 473–503. <https://doi.org/10.3109/10409239209082570>
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., & Dorland, R. V. (2007). 2007:changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. En *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2019). The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, *44*(Volume 44, 2019), 89–115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Gao, C.-H., Zhang, S., Ding, Q.-S., Wei, M.-Y., Li, H., Li, J., Wen, C., Gao, G.-F., Liu, Y., Zhou, J.-J., Zhang, J.-Y., You, Y.-P., & Zheng, H.-L. (2021). Source or sink? a study on the methane flux from mangroves stems in Zhangjiang estuary, southeast coast of China. *Science of The Total Environment*, *788*, 147782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147782>
- Gauci, V., Gowing, D. J. G., Hornibrook, E. R. C., Davis, J. M., & Dise, N. B. (2010). Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment*, *44*(17), 2157–2160. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.034>
- Ge, M., Korrensalo, A., Laiho, R., Kohl, L., Lohila, A., Pihlatie, M., Li, X., Laine, A. M., Anttila, J., Putkinen, A., Wang, W., & Koskinen, M. (2024). Plant-mediated CH<sub>4</sub> exchange in



- wetlands: a review of mechanisms and measurement methods with implications for modelling. *Science of The Total Environment*, 914, 169662.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169662>
- Global Mangrove Watch. (2023). *Mangrove habitat extent, net change, and blue carbon data*.  
[https://www.globalmangrovetwatch.org/?active-widgets=\[%22mangrove\\_habitat\\_extent%22,%22mangrove\\_net\\_change%22,%22mangrove\\_habitat\\_change%22,%22mangrove\\_alerts%22,%22mangrove\\_species\\_location%22,%22mangrove\\_species\\_distribution%22,%22mangrove\\_species\\_threatened%22,%22widgets\\_deck\\_tool%22\]](https://www.globalmangrovetwatch.org/?active-widgets=[%22mangrove_habitat_extent%22,%22mangrove_net_change%22,%22mangrove_habitat_change%22,%22mangrove_alerts%22,%22mangrove_species_location%22,%22mangrove_species_distribution%22,%22mangrove_species_threatened%22,%22widgets_deck_tool%22])
- Gómez, N. A., Rodríguez, L., Serrano, F. R. L., & Pinzón, R. (2023). Assessment of soil respiration process in a mangrove swamp of Panama's Bay. *Heliyon*, 9(7).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18189>
- Goss, M. J., & Oliver, M. (2023). *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Second).  
<http://www.sciencedirect.com:5070/referencework/9780323951333/encyclopedia-of-soils-in-the-environment>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645–11650.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Guevara, J. M. (2024, septiembre 18). *Panamá, Patrimonio Natural Azul*. ArcGIS StoryMaps.  
<https://storymaps.arcgis.com/stories/c625a2f2b81c42a49a493733dbcccb45>

- Hansen, J., Kharecha, P., Sato, M., Masson-Delmotte, V., Ackerman, F., Beerling, D. J., Hearty, P. J., Hoegh-Guldberg, O., Hsu, S. L., Parmesan, C., Rockstrom, J., Rohling, E. J., Sachs, J., Smith, P., Steffen, K., Susteren, L. V., Schuckmann, K. V., & Zacher, J. C. (2013). Assessing “dangerous climate change”: required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PLoS ONE*, 8(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081648>
- Hansen, J., Sato, M., Russell, G., & Kharecha, P. (2013). Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2001), 20120294. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>
- Hanson, P., Edwards, N., Garten, C., & Andrews, J. A. (2000). Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, Andrews JA.. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: 115-146. *Biogeochemistry*, 48, 115–146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>
- Hatano, R. (2011). *Greenhouse gas fluxes: effects of physical conditions* (pp. 339–351). [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1\\_64](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_64)
- He, Y., Guan, W., Xue, D., Liu, L., Peng, C., Liao, B., Hu, J., Zhu, Q., Yang, Y., Wang, X., Zhou, G., Wu, Z., & Chen, H. (2019). Comparison of methane emissions among invasive and native mangrove species in Dongzhaigang, Hainan Island. *Science of The Total Environment*, 697, 133945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133945>
- Hernández, M. E., & Junca-Gómez, D. (2020). Carbon stocks and greenhouse gas emissions (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) in mangroves with different vegetation assemblies in the central coastal plain of

- Veracruz Mexico. *Science of the Total Environment*, 741.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140276>
- Hicks, S. D. (2006). *Understanding Tides*. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service.
- Hossain, M. D., & Nuruddin, A. A. (2016). Soil and Mangrove: A Review. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(2), 198–207.  
<https://doi.org/10.3923/jest.2016.198.207>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (2018). *Carbono Azul, Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos*. [www.iucn.org/es](http://www.iucn.org/es)
- Intergovernmental Panel On Climate Change. (2023). *Climate Change 2021 – the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1a ed.). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2000). *Summary for policymakers land use, land-use change, and forestry*.  
<https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>
- IPCC. (2018). Annex I: glossary. En *Global Warming of 1.5°C* (pp. 541–562). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>
- IPCC. (2022). Annex I: Glossary. En *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>

- IPCC, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield (eds, T. (2018). *Anexo I:Glosario*. IPCC.
- Jackson, M. B., & Armstrong, W. (1999). Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. *Plant Biology*, *1*(3), 274–287. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1999.tb00253.x>
- Jacotot, A., Marchand, C., & Allenbach, M. (2018). Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a *Rhizophora* mangrove forest (New Caledonia). *Science of the Total Environment*, *631–632*, 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.006>
- Jara, M. C., Brenes, C., Leandro, P., Molina, O., Romero, T., Gómez, D. T., & Mazariegos, S. V. (2018). *Manual Centroamericano para la medición de carbono azul en manglares*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27873.61282>
- Jeffrey, L. C., Maher, D. T., Tait, D. R., Euler, S., & Johnston, S. G. (2020). Tree stem methane emissions from subtropical lowland forest (*Melaleuca quinquenervia*) regulated by local and seasonal hydrology. *Biogeochemistry*, *151*(2), 273–290. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00726-y>
- Jeffrey, L. C., Reithmaier, G., Sippo, J. Z., Johnston, S. G., Tait, D. R., Harada, Y., & Maher, D. T. (2019). Are methane emissions from mangrove stems a cryptic carbon loss pathway? Insights from a catastrophic forest mortality. *New Phytologist*, *224*(1), 146–154. <https://doi.org/10.1111/nph.15995>

- Kauffman, J. B., Adame, M. F., Arifanti, V. B., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R. K., Donato, D. C., Feller, I. C., Ferreira, T. O., Jesus Garcia, M. del C., MacKenzie, R. A., Megonigal, J. P., Murdiyarso, D., Simpson, L., & Hernández Trejo, H. (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, *90*(2), e01405. <https://doi.org/10.1002/ecm.1405>
- Kitaya, Y., Yabuki, K., Kiyota, M., Tani, A., Hirano, T., & Aiga, I. (2002). Gas exchange and oxygen concentration in pneumatophores and prop roots of four mangrove species. *Trees*, *16*(2–3), 155–158. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0167-5>
- Konnerup, D., Betancourt-Portela, J. M., Villamil, C., & Parra, J. P. (2014). Nitrous oxide and methane emissions from the restored mangrove ecosystem of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *140*, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.006>
- Korrensalo, A., Mammarella, I., Alekseychik, P., Vesala, T., & Tuittila, E.-S. (2022). Plant mediated methane efflux from a boreal peatland complex. *Plant and Soil*, *471*(1), 375–392. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05180-9>
- Kreuzwieser, J., Buchholz, J., & Rennenberg, H. (2003). Emission of methane and nitrous oxide by Australian mangrove ecosystems. *Plant Biology*, *5*(4). <https://doi.org/10.1055/s-2003-42712>
- Kristensen, E. (1997). *Carbon, Sulfur and Nitrogen Biogeochemistry of Tropical Mangrove Sediments* (Vol. 3, pp. 199–232). [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1066-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1066-4_12)
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. (2008, agosto). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. En *Aquatic Botany* (Vol. 89, Número 2, pp. 201–219). <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>

- Kristensen, E., Flindt, M. R., Ulomi, S., Borges, A. V., Abril, G., & Bouillon, S. (2008). Emission of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> to the atmosphere by sediments and open waters in two Tanzanian mangrove forests. *Marine Ecology Progress Series*, 370, 53–67. <https://doi.org/10.3354/meps07642>
- Kristensen, E., King, G., Holmer, M., Banta, G., Jensen, M., Hansen, K., & Bussarawit, N. (1994). Sulfate reduction, acetate turnover and carbon metabolism in sediments of the Ao-Nam-Bor Mangrove, Phuket, Thailand. *Marine Ecology Progress Series*, 111, 245–255. <https://doi.org/10.3354/meps111245>
- Kristensen, E., Valdemarsen, T., Moraes, P. C., Güth, A. Z., Sumida, P. Y. G., & Quintana, C. O. (2022). Pneumatophores and crab burrows increase CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission from sediments in two Brazilian fringe mangrove forests. *Marine Ecology Progress Series*, 698, 29–39. <https://doi.org/10.3354/meps14153>
- Kuzyakov, Y. (2006, marzo). Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods. En *Soil Biology and Biochemistry* (Vol. 38, Número 3, pp. 425–448). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
- Leal, M., Spalding, M. D., De, C., Longley-Wood, K., An, T., Andradi-Brown, D., Arquiza, Y., Barnes, E., Beeston, M., Benbow, S., Berzina-Rodrigo, A., Bood, N., Brown, C., Bunting, P., Cameron, C., Canty, S., Cummings-Krueger, E., Dahdouh-Guebas, F., Hoog, A. D., ... Ermgassen, P. Z. (2022). *El estado de los manglares 2022*. Global Mangrove Alliance. [www.yokedesign.studio](http://www.yokedesign.studio)
- Lecerf, M., Herr, D., Elverum, C., Delrieu, E., & Picourt, L. (2023). *Coastal and marine ecosystems as nature based solutions in new or update Nationally Determined Contributions*.

Legislación de la República de Panamá (2009).

Li, X., Cheng, X., Cheng, K., Cai, Z., Feng, S., & Zhou, J. (2024). The influence of tide-brought nutrients on microbial carbon metabolic profiles of mangrove sediments. *Science of The Total Environment*, 906, 167732. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167732>

Lin, C.-W., Kao, Y.-C., Chou, M.-C., Wu, H.-H., Ho, C.-W., & Lin, H.-J. (2020). Methane emissions from subtropical and tropical mangrove ecosystems in Taiwan. *Forests*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/f11040470>

Lin, C.-W., Kao, Y.-C., Lin, W.-J., Ho, C.-W., & Lin, H.-J. (2021). Effects of pneumatophore density on methane emissions in mangroves. *Forests*, 12(3), 314. <https://doi.org/10.3390/f12030314>

Lin, C.-W., Lin, W.-J., Ho, C.-W., Kao, Y.-C., Yong, Z.-J., & Lin, H.-J. (2024). Flushing emissions of methane and carbon dioxide from mangrove soils during tidal cycles. *Science of The Total Environment*, 919, 170768. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170768>

López, O., & Díaz, Y. (2023). *Plan de Conservación para los Humedales de la Bahía de Parita*. <https://www.researchgate.net/publication/369063454>

Machacova, K., Borak, L., Agyei, T., Schindler, T., Soosaar, K., Mander, Ü., & Ah-Peng, C. (2021). Trees as net sinks for methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in the lowland tropical rain forest on volcanic Réunion Island. *New Phytologist*, 229(4), 1983–1994. <https://doi.org/10.1111/nph.17002>

Maher, D. T., Cowley, K., Santos, I. R., Macklin, P., & Eyre, B. D. (2015). Methane and carbon dioxide dynamics in a subtropical estuary over a diel cycle: insights from automated in situ radioactive and stable isotope measurements. *Marine Chemistry*, 168, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.017>

- Maier, M., Machacova, K., Lang, F., Svobodova, K., & Urban, O. (2018). Combining soil and tree-stem flux measurements and soil gas profiles to understand CH<sub>4</sub> pathways in *Fagus sylvatica* forests. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 31–35. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600405>
- Megonigal, J. P., & Guenther, A. B. (2008). Methane emissions from upland forest soils and vegetation. *Tree Physiology*, 28(4), 491–498. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.4.491>
- Megonigal, J. P., Hines, M. E., & Visscher, P. T. (2004). *Anaerobic metabolism: linkages to trace gases and aerobic processes*. <http://repository.si.edu/xmlui/handle/10088/15579>
- Ministerio de Ambiente. (2018). *Sarigua un ejemplo de recuperación de suelos para el mundo*.
- Ministerio de Ambiente . (2019). *Estrategía nacional de cambio climático 2050*.
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Informe ejecutivo del mapa de cobertura boscosa y uso de suelo, año 2021*.
- Ministerio de Ambiente. (2024). *Segunda contribución determinada a nivel nacional (CDN2) de Panamá*.
- Mishra, A. K., & Manish, K. (2018). *Andaman mangrove sediments: Source of nutrients and sink of heavy metals* (p. 431262). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/431262>
- Moreno-Casasola, P., & Warner, B. G. (2009). *Breviario para describir, observar y manejar humedales*. [http://www1.inecol.edu.mx/inecol/libros/Breviario\\_Humedales.pdf](http://www1.inecol.edu.mx/inecol/libros/Breviario_Humedales.pdf)
- Murray, B. C., Pendleton, L., Jenkins, W. A., & Sifleet, S. (2011). *Green payments for blue carbon economic incentives for protecting threatened coastal habitats*.
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G.-M., & Burks-Copes, K. A. (2016). The



- effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLOS ONE*, 11(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>
- Nouchi, I., Mariko, S., & Aoki, K. (1990). Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiology*, 94(1), 59–66. <https://doi.org/10.1104/pp.94.1.59>
- Organización de Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Organización de Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCC)*.
- Pangala, S. R., Enrich-Prast, A., Basso, L. S., Peixoto, R. B., Bastviken, D., Hornibrook, E. R. C., Gatti, L. V., Marotta, H., Calazans, L. S. B., Sakuragui, C. M., Bastos, W. R., Malm, O., Gloor, E., Miller, J. B., & Gauci, V. (2017). Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 552(7684), 230–234. <https://doi.org/10.1038/nature24639>
- Pangala, S. R., Gowing, D. J., Hornibrook, E. R. C., & Gauci, V. (2014). Controls on methane emissions from *Alnus glutinosa* saplings. *New Phytologist*, 201(3), 887–896. <https://doi.org/10.1111/nph.12561>
- Pangala, S. R., Moore, S., Hornibrook, E. R. C., & Gauci, V. (2013). Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist*, 197(2), 524–531. <https://doi.org/10.1111/nph.12031>
- Parker, B. (2018). Tides. En C. W. Finkl & C. Makowski (Eds.), *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 1–16). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4\\_324-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_324-2)

- Parsons, T. R., & Lalli, C. M. (2006). *Biological oceanography: An introduction*.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Marbà, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012). Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLOS ONE*, 7(9), e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Perdomo, L. V. (2012). *Proyecto Balance de gases de efecto invernadero GEI en áreas de manglar de la cienaga grande de Santa Marta con diferente grado de conservación*.
- Pitz, S., & Megonigal, J. P. (2017). Temperate forest methane sink diminished by tree emissions. *New Phytologist*, 214(4), 1432–1439. <https://doi.org/10.1111/nph.14559>
- PNUD. (2023). *The climate dictionary*. [https://climatepromise.undp.org/sites/default/files/research\\_report\\_document/ES%20WE%20-%20The%20Climate%20Dictionary%20-%20Publication%20v2.pdf](https://climatepromise.undp.org/sites/default/files/research_report_document/ES%20WE%20-%20The%20Climate%20Dictionary%20-%20Publication%20v2.pdf)
- Poffenbarger, H. J., Needelman, B. A., & Megonigal, J. P. (2011). Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. *Wetlands*, 31(5), 831–842. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0197-0>
- Purvaja, R., Ramachandran, R., & Frenzel, P. (2004). Plant-mediated methane emission from an Indian mangrove. *Global Change Biology*, 10, 1825–1834. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00834.x>
- Purvaja, R., & Ramesh, R. (2001). Natural and anthropogenic methane emission from coastal wetlands of South India. *Environmental management*, 27, 547–557. <https://doi.org/10.1007/s002670010169>

- Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestvedt, J. S., Hansen, G., Jung, Y., Ludden, C., Masson-Delmotte, V., Matthews, J. B. R., Mintenbeck, K., Orendain, D. J. A., Pirani, A., Poloczanska, E., & Romero, J. (2023). Annex I Glossary. En *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Rusch, H., & Rennenberg, H. (1998). Black alder (*Alnus Glutinosa* (L.) Gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere. *Plant and Soil*, *201*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1023/A:1004331521059>
- Schink, B., Ward, J. C., & Zeikus, J. G. (1981). *Microbiology of Wetwood: role of anaerobic bacterial populations in living trees* | *Microbiology Society*. *123*(2). <https://doi.org/10.1099/00221287-123-2-313>
- Sheaves, M. (2017). How many fish use mangroves? The 75% rule an ill-defined and poorly validated concept. *Fish and Fisheries*, *18*(4), 778–789. <https://doi.org/10.1111/faf.12213>
- Sheng, N., Wu, F., Liao, B., & Xin, K. (2021). Methane and carbon dioxide emissions from cultivated and native mangrove species in Dongzhai Harbor, Hainan. *Ecological Engineering*, *168*, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106285>
- Shortle, W. C., Menge, J. A., & Cowling, E. B. (1978). Interaction of bacteria, decay fungi, and live sapwood in discoloration and decay of trees<sup>1</sup>. *European Journal of Forest Pathology*, *8*(5–6), 293–300. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1978.tb00642.x>

- Sociedad Audubon Panamá. (2002). *Ficha informativa de los humedales de Ramsar*.  
[http://www.panda.org/about\\_wwf/where\\_we\\_work/ecoregions/global200/pages/countries/panama.ht](http://www.panda.org/about_wwf/where_we_work/ecoregions/global200/pages/countries/panama.ht)
- Spalding, M., Blasco, F., & Field, C. (2010). *World mangrove atlas*.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To physical oceanography*.
- Swenson, N. G., & Enquist, B. J. (2007). Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: Wood density and its community-wide variation across latitude and elevation. *American Journal of Botany*, 94(3), 451–459.  
<https://doi.org/10.3732/ajb.94.3.451>
- Takahashi, K., Sakabe, A., Azuma, W. A., Itoh, M., Imai, T., Matsumura, Y., Tateishi, M., & Kosugi, Y. (2022). Insights into the mechanism of diurnal variations in methane emission from the stem surfaces of *Alnus japonica*. *New Phytologist*, 235(5), 1757–1766.  
<https://doi.org/10.1111/nph.18283>
- Teskey, R. O., Saveyn, A., Steppe, K., & McGuire, M. A. (2007). Origin, fate and significance of CO<sub>2</sub> in tree stems. *Tansley Review*. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02286.x>
- Teskey, R. O., Saveyn, A., Steppe, K., & McGuire, M. A. (2008). Origin, fate and significance of CO<sub>2</sub> in tree stems. *New Phytologist*, 177(1), 17–32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02286.x>
- Tippens, P. E. (2011). *Física conceptos y aplicaciones* (Séptima edición revisada).
- Topp, E., & Pattey, E. (1997). *Soils as sources and sinks for atmospheric methane*.
- Tosi, J. A. (1971). *Inventariación y demostraciones forestales, Panamá: Zonas de vida, una base ecológica para investigaciones silvícolas e inventariación forestal en la República de Panamá*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

- Turner, B. (2007). *Total soil phosphorus determination by ignition and acid extraction*.
- UICN. (2016). Resolución de la UICN WCC-2016-Res-069. En *Soluciones basadas en la naturaleza*.
- UNEP. (2014). *The importance of mangroves to people: a call of action*.  
<http://www.unep.org/resources/report/importance-mangroves-people-call-action-0>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Decades of mangrove forest change: what does it mean for Nature, People and the Climate?*  
<https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/42254>
- Vargas, R., & Barba, J. (2019). Greenhouse gas fluxes from tree stems. *Trends in Plant Science*, 24(4), 296–299. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.02.005>
- Wang, Z.-P., Gu, Q., Deng, F.-D., Huang, J.-H., Megonigal, J. P., Yu, Q., Lü, X.-T., Li, L.-H., Chang, S., Zhang, Y.-H., Feng, J.-C., & Han, X.-G. (2016). Methane emissions from the trunks of living trees on upland soils. *New Phytologist*, 211(2), 429–439. <https://doi.org/10.1111/nph.13909>
- Wang, Z.-P., Han, S.-J., Li, H.-L., Deng, F.-D., Zheng, Y.-H., Liu, H.-F., & Han, X.-G. (2017). Methane production explained largely by water content in the heartwood of living trees in upland forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(10), 2479–2489. <https://doi.org/10.1002/2017JG003991>
- World Meteorological Organization. (2024). *State of the global climate 2023*.  
<https://library.wmo.int/idurl/4/68835>
- Yamamoto, A., Hirota, M., Suzuki, S., Oe, Y., Zhang, P., & Mariko, S. (2009). Effects of tidal fluctuations on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in the littoral zone of a brackish-water lake. *Limnology*, 10(3), 229–237. <https://doi.org/10.1007/s10201-009-0284-6>

- Yang, Q., Xu, M., Chi, Y., & Zheng, Y. (2016). Relationship between stem CO<sub>2</sub> efflux and stem temperature at different measuring depths in *Pinus massoniana* trees. *Acta Ecologica Sinica*, 36(4), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.05.001>
- Yáñez-Espinosa, L., & Angeles, G. (2022). Does mangrove stem bark have an internal pathway for gas flow? *Trees*, 36(1), 361–377. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02210-y>
- Yong, Z.-J., Lin, W.-J., Lin, C.-W., & Lin, H.-J. L. (2024). Tidal influence on carbon dioxide and methane fluxes from tree stems and soils in mangrove forests. *EGUsphere*, 1–20. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-533>
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. En *Advances in Carbon Capture* (pp. 3–28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>
- Zeikus, J. G., & Ward, J. C. (1974). Methane formation in living trees: a microbial origin. *Science (New York, N.Y.)*, 184(4142), 1181–1183. <https://doi.org/10.1126/science.184.4142.1181>
- Zhang, C., Zhang, Y., Luo, M., Tan, J., Chen, X., Tan, F., & Huang, J. (2022). Massive methane emission from tree stems and pneumatophores in a subtropical mangrove wetland. *Plant and Soil*, 473(1–2), 489–505. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05300-z>

## CAPÍTULO VIII: ANEXOS

### Anexo 1. Definición de variables

Emisiones: Liberación de gases de efecto invernadero, como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano y el ozono, a la atmósfera en un área y tiempo determinado (Organización de Naciones Unidas, 1992).

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): Principal gas de efecto invernadero, incoloro e inodoro con peso molar de 44.010 g mol<sup>-1</sup>(Hatano, 2011). Su origen es natural, producto de la respiración y materia prima de plantas para generar glucosa. También, es resultado de la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo y actividades antropogénicas (IPCC, 2018).

Metano (CH<sub>4</sub>): Gas de efecto invernadero, incoloro e inodoro, con peso molar de 16.042 g mol<sup>-1</sup>(Hatano, 2011). Es el principal componente del gas natural y está asociado a combustibles hidrocarbonados. Se produce en procesos de digestión anaeróbicas (IPCC, 2018).

Marea: Ciclo en el que aumenta y disminuye el nivel del mar, determinado por las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol en la tierra (Parsons & Lalli, 2006). Las mareas producen corrientes en el océano que influyen en la distribución de sedimentos y en el clima (Stewart, 2008).

### Anexo 2. Población de *Avicennia bicolor*



**Figura 24.** Sitio de estudio. Coordenadas: 8.3073°N y 80.3138°O.



**Figura 25.** Saturación del suelo por marea alta.

### Anexo 3. Pruebas Post hoc Tuckey

**Tabla 6.** Análisis Post Hoc de Tuckey para las emisiones de CO<sub>2</sub> en suelo.

Comparación							
Categoría de marea		Categoría de marea	Diferencia de media	DE	df	t	P <sub>Tukey</sub>
Baja	-	Creciente	0.0272	0.0397	175	0.686	0.903
	-	Alta	-0.0980	0.0316	175	3.104	<0.05
	-	Decreciente	0.0900	0.0419	175	2.148	0.142
Creciente	-	Alta	-0.1252	0.0349	175	3.582	<0.05
	-	Decreciente	0.0628	0.0445	175	1.411	0.494
Alta	-	Decreciente	0.1879	0.0374	175	5.021	<0.05



**Tabla 7.** Análisis Post Hoc de Tuckey para las emisiones de CO<sub>2</sub> en árboles.

Comparación							
Categoría de marea		Categoría de marea	Diferencia de la media	DE	df	t	P <sub>Tukey</sub>
Baja	-	Creciente	0.18075	0.0330	131	5.4713	<0.05
	-	Alta	0.00748	0.0309	131	0.2421	0.995
	-	Decreciente	0.00986	0.0460	131	0.2142	0.997
Creciente	-	Alta	-0.17327	0.0317	131	-5.4741	<0.05
	-	Decreciente	-0.17089	0.0465	131	-3.6732	<0.05
Alta	-	Decreciente	0.00238	0.0450	131	0.0528	1.000

**Tabla 8.** Análisis Post Hoc de Tuckey para la emisiones de CH<sub>4</sub> en árboles.

Comparación							
Categoría de marea		Categoría de marea	Diferencia de la media	DE	df	t	P <sub>Tukey</sub>
Baja	-	Creciente	0.0429	0.0436	116	0.984	0.759
	-	Alta	-0.0808	0.0405	116	-1.993	0.197
	-	Decreciente	0.0240	0.0618	116	0.388	0.980
Creciente	-	Alta	-0.1237	0.0422	116	-2.928	<0.05
	-	Decreciente	-0.0189	0.0629	116	-0.301	0.990
Alta	-	Decreciente	0.1047	0.0608	116	1.723	0.317