



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente -PUIRNA-
Programa universitario de investigación Digi

Acumulación multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar, Las Lisas-La
Barrona en el Pacífico de Guatemala
Proyecto de investigación

4.8.26.4.71.0.022

Partida presupuestaria

Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas -IIH-, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura

Unidad académica avaladora

M.Sc. Irene Franco Arenales, Msc. Daniel Esteban Manzo Barrientos, Tec. Acuicultura Daniel
Paiz Gonzáles

Coordinadora del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Guatemala 29 de febrero de 2024

Lugar y fecha de presentación del informe final



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Contraportada (reverso de la portada)

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

M.Sc. Andrea Eunice Rodas
Coordinadora del Programa de Investigación

Autores

M.Sc. Irene Franco Arenales
Coordinadora del proyecto

M.Sc. Daniel Esteban Manzo Barrientos
Investigador

Técnico en Acuicultura Daniel Paiz Gonzáles
Auxiliar de investigación II

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2023. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.26.4.71.0.022 en el Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente -PUIRNA-.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Acumulación multitemporal de carbono azul en el dosel del bosque de manglar,
Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala
Centro de Estudios del Mar y Acuicultura
Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas -IIH-
2023

1	Resumen.....	6
2	Introducción	8
3	Antecedentes	10
4	Planteamiento del problema.....	11
5	Marco teórico	12
5.1	Importancia de los manglares	12
5.2	Carbono azul	14
5.3	Cuantificación del carbono azul en el componente aéreo por medio de parcelas permanentes	14
5.4	Principios de los sensores remotos de radar	16
5.5	Estimación de alturas y masa aérea en bosques de manglar usando imágenes de radar	19
6	Estado del arte.....	23
7	Objetivos.....	26
8	Hipótesis	26
9	Materiales y métodos	27
9.1	Delimitación en tiempo.....	27
9.2	Delimitación espacial.....	27
9.3	Enfoque de la investigación.....	28
9.4	Método	29
9.4.1	Método por parcelas permanentes de medición forestal (PPMF):.....	29



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

9.4.2	Recolección de información en PPMF	30
9.4.3	Técnicas e instrumentos en PPMF	31
9.4.4	Procesamiento y análisis de la información en PPMF	32
9.4.5	Mapeo y monitoreo de bosques de manglar usando Sensores Remotos (SR).33	
9.4.6	Recolección de información para monitoreo de bosques de manglar con SR.34	
9.4.7	Técnicas e instrumentos para monitoreo de bosques de manglar con SR.	34
9.4.8	Procesamiento y análisis de la información usando SR.....	35
9.5	Operacionalización de las variables o unidades de análisis.....	38
10	Resultados y discusión.....	41
10.1	Resultados.....	41
10.1.1	Estimación del crecimiento interanual del bosque de manglar.....	41
10.2	Discusión de resultados.....	48
11	Conclusiones.....	51
12	Recomendaciones	52
13	Referencias.....	53
14	Apéndices.....	57
15	Vinculación.....	60
16	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual	61
17	Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).61	



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Índice de Figuras

Figura 1. Imagen de radar se genera ya sea desde una plataforma aérea o espacial a través de un pulso de microonda que rebota según las estructuras terrestres.	17
Figura 2. Mecanismo de dispersión. En bosques de manglar con raíces aéreas, la señal de microonda es atenuada disminuyendo la dispersión en biomasa alta.	17
Figura 3. Mapa de ubicación del proyecto de investigación y cobertura actual de mangle ...	28
Figura 4. Ubicación de PPMF para la cuantificación de C en el componente forestal.....	42
Figura 5. Distribución espacial de Mg C·ha ⁻¹ en total y por estrato en el ecosistema de manglar.	43
Figura 6. Comportamiento del C y tendencias por PPMF, 2017-2023.....	44
Figura 7. Comparación de reservas de carbono Mg C·ha ⁻¹ , usando sensores remotos tipo radar.	46
Figura 8. Comparación estadística entre metodológicas SAR, para usar estimar C, en bosques de manglar.....	47
Tabla 1. Designación de las bandas de microondas. Frecuencias de bandas X, C, S, L, P. Típicamente operadas en plataforma espacial de SAR.....	18
Tabla 2. Ecuaciones alométricas para calcular biomasa de árboles sobre el suelo por especie.	32
Tabla 3. Ecuaciones alométricas de biomasa de raíz por especie.	33
Tabla 4. Densidad básica de la madera de especies de mangle para cálculos de biomasa bajo el suelo	33
Tabla 5. Estadísticos de la cuantificación de Mg C·ha ⁻¹ , estimado a partir de PPMF.....	42



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

1 Resumen

El ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona, en el Pacífico sur oriente de Guatemala, es de sumo valor en la mitigación ante el cambio climático, siendo importante el monitoreo en la captura de carbono (C) azul y su dinámica en la acumulación y liberación. Estimar el almacenamiento de C en el componente aéreo y crecimiento multianual por medio de Parcelas Permanentes de Monitoreo Forestal (PPMF) y compararlo con datos de imágenes de radar, promueve buscar alternativas eficientes en el análisis multianual del componente raíces y arbóreo superior. En complemento, la toma de muestras de suelo permite cuantificar las reservas de C en este componente.

A nivel de campo, se implementaron siete PPMF aplicando la metodología desarrollada por el Instituto Nacional de Bosques (INAB) y colaboradores, conteniendo en la parte de raíces y arbóreo superior 205,128 Mg C. En la toma de muestras de suelo a cinco profundidades en quince lugares, se reportan 468,528.24 Mg C, en las 1698 ha de bosque de manglar.

Utilizando metodologías aplicadas a imágenes tipo radar, se obtuvieron datos de almacenamiento de C en la parte arbórea superior, para el sensor Sentinel 1 de 10 m de resolución, de 68479.54 Mg y para Alos Palsar 2, 68969.1 Mg, en comparación con los 148764.5 Mg C estimados con las PPMF.

La dinámica forestal del mangle disminuyó 52 ha entre el año 2017 y 2023, emitiéndose 6301 Mg C solo en el componente arbóreo. Considerando cuatro PPMF de 500 m² cada una, establecidas en el 2017 por INAB, se observó en dos un aumento de 100 Mg a 130 y 275 Mg por acumulación de carbono en 6 años y disminución en las dos restantes de 260 a 115 Mg y de 175 a 100 Mg, respectivamente, cambios negativos principalmente por la pérdida de árboles.

Palabras clave: Reservas de carbono azul, parcelas permanentes de monitoreo forestal, imágenes tipo radar, muestreo de suelo, ecuaciones alométricas.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Abstract

Las Lisas-La Barrona mangrove ecosystem, in the south-eastern Pacific of Guatemala, is of great value in mitigating climate change, being important in the monitoring of blue carbon (C) capture and its dynamics in accumulations and releases. Estimating C storage in the aerial component and multi-year growth through Permanent Forest Monitoring Plots (PPMF) and comparing it with data from radar images, promotes the search for efficient alternatives in the multi-year analysis in the roots and upper tree component. In addition, getting soil samples allows to quantify the C reserves in this component.

At field level, seven PPMF were implemented, applying the methodology developed by the Instituto Nacional de Bosques (INAB) and collaborators, containing in the roots and upper tree component 205128 Mg C. In soil samples at five depths in fifteen places, were reported 468528.24 Mg C, in the 1698 hectares of mangrove forest.

Using methodologies applied to radar-type images, C storage data obtained in the upper tree part, for the Sentinel 1 sensor with 10 m resolution, were 68479.54 Mg and for Alos Palsar 2, 68969.1 Mg, compared to the 148764.5 Mg C estimated with PPMF methodology.

The mangrove forest dynamics decreased by 52 ha between 2017 and 2023, emitting 6301 Mg C only in the tree upper component. Of the four PPMFs of 500 m² each one, established in 2017 by INAB, an increase was established in two plots, from 100 Mg to 130 and 275 Mg due to carbon accumulation in 6 years, and a decrease in the remaining two plots were from 260 to 115 Mg and from 175 to 100 Mg, respectively, changes mainly due to the loss of trees.

Keywords: Blue carbon reserves, permanent forest monitoring plots, radar-type images, soil sampling, allometric equations.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

2 Introducción

Desde el año 2018, se presentó la iniciativa de ley para establecer como área protegida en categoría de Usos Múltiples la zona marino-costera Las Lisas, sin embargo, hasta la fecha no ha sido aprobada por parte del Congreso de la República. Se propuso una extensión total de 104,059 hectáreas (ha), de las cuales 101,848 serán marinas y 2,212 terrestres. Esta área protegida marino costera tiene como fin, conservar el patrimonio natural considerando una zona de adyacencia, desde un enfoque ecosistémico por medio del manejo y uso sostenible de los recursos, para el bienestar y el mantenimiento de la calidad de vida de las poblaciones humanas como parte integral de todo el ecosistema incluyendo las poblaciones de mangle. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2018)

Los ecosistemas de manglar de las zonas marino-costeras juegan un rol importante como proveedores de bienes y servicios ecosistémicos, siendo estos la producción de oxígeno, absorción de gases de efecto de invernadero (GEI), la protección de las costas, la belleza paisajista, la regulación hídrica, así como beneficios culturales y formativos. (Costanza, d'Arge, de Groot, & et al, The value of the world's ecosystem services and natural capital, 1997). Estos y otros servicios ecosistémicos pueden representar valores monetarios y culturales de magnitud considerable, como el reportado en la valoración económica y cultural del ecosistema manglar en el Área de Uso Múltiple Río Sarstún, en atlántico de Guatemala, en cual identifico la cadena de valor de las pesquerías de robalo y camarón, reportando utilidades de Q. 639,504. Además, que a partir de visitas a sitios turísticos con presencia de mangle dejo utilidades de más de un millón de quetzales (Gálvez, Pacheco, & Ramírez, 2017).

Los precios del carbono en la Unión Europea (UE) se duplicaron para noviembre 15 del 2021 en comparación con inicios del mismo año, alcanzando los 66 €/ton, y para el 8 de diciembre 2021 el precio de referencia de las emisiones de carbono alcanzó un récord de 90.75 €. (Centro Interamericano de Administraciones Tributarias, 2022). En consideración de lo anterior, la importancia de conocer las potencialidades del precio de CO₂ para sus mercados monetarios y



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

de compensaciones, hacen necesario la estimación de las absorciones de carbón atmosférico a través de los procesos fotosintéticos, así como establecer las reservas acumuladas en el tiempo.

La investigación del 2021 sobre la cuantificación de carbono azul en suelos del ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala (García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), tuvo como uno de sus objetivos, establecer las reservas de carbono orgánico en el componente suelo a profundidades entre 0 a más de 1 m, siendo de 675,392.16 Mg en 2,236 ha.

El presente proyecto de investigación establece las reservas de carbono del ecosistema de manglar de Las Lisas y La Barrona, en el componente aéreo. En complemento, en el componente del suelo se realizaron muestreos de suelo, aumentando la distribución de los muestreos realizados por García y colaboradores en el 2021, y contar así con estimaciones de C más precisas en la parte edáfica y una cuantificación más completa en todo el ecosistema.

Las estimaciones de las reservas acumuladas de carbono en el dosel se realizaron a través de metodologías preestablecidas para Guatemala por el Instituto Nacional de Bosques -INAB- y otros autores, por medio de Parcelas Permanentes de Medición Forestal (PPMF), (Insituro Nacional de Bosques , Instituto de Cambio Climático, Conserjo Nacional de Áreas Protegidas, 2018), en donde se hicieron mediciones in situ. En complemento el comportamiento multitemporal del carbono azul del año 2017 al 2023, por medio de datos de INAB de PPMF.

Por aparte se realizaron estimaciones de reservas de C usando imágenes de radar, Sentinel 1 y Alos Palsar 2. De los resultados en las estimaciones por radar y PPMF, se hicieron comparaciones para establecer si es posible realizar monitoreos por medio de percepción remota, pudiendo repercutir en metodologías alternas, reduciendo recursos y ser más eficientes en el monitoreo de las dinámicas del ecosistema de manglar, especialmente a lo referente al carbono azul del componente aéreo.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

3 Antecedentes

El área de estudio está situada en los municipios de Chiquimulilla y Pasaco, departamentos de Santa Rosa y Jutiapa, respectivamente; comprende los límites al noroeste con la desembocadura del río Los Esclavos y caserío El Chapetón, y al sureste con la denominada La Barrona, y 3 km de áreas de reservas territoriales del Estado, en la faja terrestre a partir de la línea superior de las mareas (Oficina de Control de Áreas de Reserva del Estado, MAGA, 1997). Dicho espacio concuerda con el Estudio Técnico de importancia de conservación para declararla como área protegida, siendo de importancia natural, socioeconómica y que a través de un estatus de protección, pueda contribuir a la conservación y uso sostenible de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que la zona marino costera provee a las poblaciones asentadas y su zona de influencia con otros ecosistemas. (PNUD, 2018).

Por su parte el ecosistema de manglar Las Lisas – La Barrona, juega un rol importante de conectividad de aves, en donde su componente estructural de Análisis del Patrón Espacial Morfológico clasifica tipos de parches por su forma y porcentaje de cobertura: núcleo (80.94%); borde (11.66%); perforaciones inmersas en los núcleos (3.59%); conectores entre parches como los tipos rama (1.49%), lazo (0.99%) y puente (0.81%); y los parches isla (0.52%). (Dávila, 2019). Dicho estudio estableció que las localidades El Jiote y La Barrona, se encuentran los principales parches de conectividad funcional del manglar, así mismo se determinó que en los parches Las Lisas y El Ahumado, forman un cuello de botella, por ser la parte más amenazada por los cambios de uso del suelo, y esto a su vez repercute en otros efectos como lo es la liberación de CO_{2-eq}, lo cual sustenta la necesidad intervenciones para su recuperación tanto estructural como funcional.

(García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), reporta que para el área del ecosistema Las Lisas – La Barrona, los reservorios de C en suelo mantiene relación reducida con las especies de mangle, las propiedades del suelo y la dinámica vegetativa y mareal. *Rhizophora* mangle en el sitio La Barrona, captura más carbono orgánico, 490.36 Mg ha⁻¹, lo cual es considerado dentro de las escalas como muy alto. Así mismo en el sitio Los Macizos *Avicenia geminans* reporta



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

271.40 Mg ha⁻¹, en *Laguncularia racemosa* se reportan 142.88 Mg ha⁻¹ en estado de regeneración, con alta densidad aparente y presencia de arenas de playa.

4 Planteamiento del problema

Los ecosistemas marino-costeros son reconocidos por su rol en el secuestro de C y por su potencial como emisores de CO₂-eq cuando se degradan o cambia a otros usos del suelo. Como parte de estos ecosistemas, los manglares son de suma importancia para el mantenimiento de la biodiversidad, estableciendo nichos ecológicos para especies terrestres, aéreas, acuáticas y anfibias que intervienen en los procesos ecológicos que suceden en ellos (Instituto Nacional de Bosques [INAB], & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2018). Los manglares intervienen de forma significativa en la regulación del ciclo biogeoquímico del C y otros nutrientes en los ecosistemas costeros, considerando que su funcionalidad depende del grado de desarrollo y conservación de los bosques, lo que a su vez influye en la composición y en las propiedades edáficas (Otero, X.L., Méndez, A., Nóbrega, G.N. et al, 2017).

El Consejo Nacional de Cambio Climático (CNCC) 2017, estableció líneas de investigación para dar cumplimiento al Artículo 7 de la Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático y la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero.

En el marco del documento Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional de Guatemala (NDC), establece en su objetivo principal, el Identificar temas relevantes de investigación en cambio climático orientando a la generación de información y asegurando que responda a las necesidades y circunstancias del país, y los compromisos de coadyuvar a la mitigación al cambio climático (CC) en el sector de silvicultura y otros usos de la tierra, dentro del eje de humedales y manglares, considera así el estudio de emisiones y principalmente absorciones de GEI. (Consejo Nacional de Cambio Climático, 2017).



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Siendo los ecosistemas de manglar de suma importancia relacionado a la mitigación de GEI, han sido poco investigados en Guatemala es su función de captura, almacenamiento y acumulación de C, proceso que es afectado por el cambio climático. En este sentido si bien existen iniciativas de investigación referente a la cuantificación de carbono azul, estas no se presentan en forma continua tanto temporal como espacial, habiendo vacíos de información en los lugares de cobertura por mangle.

5 Marco teórico

5.1 Importancia de los manglares

Los bosques de manglares se encuentran en las zonas costeras de los trópicos, en donde Guatemala no es la excepción teniendo para el año 2012 una cobertura de 17,670 ha en el Pacífico de Guatemala y de 1,169 ha sobre las costas del atlántico (Ministerio de Ambiente y Recursos Naurales [MARN], 2013). Por su parte en el año 2021 se realizó un mapa de uso cobertura en una zona de 3 km de la línea de costa del Pacífico de Guatemala para establecer la cobertura y uso del suelo, reportándose un cobertura de bosque de mangle de 24,116 ha (Instituto de Cambio Climático [ICC], 2021). Los datos anteriores para los últimos años podrían indicar un incremento o al menos no pérdida de las coberturas, debido a las diferencias en las metodologías de mapeo utilizadas y su escala.

Los bosques de manglar brindan bienes y servicios ecosistémicos entre los que está la producción de pesquerías y recirculación de nutrientes y carbono. Un estudio realizado en la región Indo-pacífico, indicó que el mangle está dentro de los bosques más ricos en almacenamiento de carbono, contenido en promedio $1,023 \text{ Mg C ha}^{-1}$, siendo un 65% mayor que en bosques boreales, bosques templados y bosques tropicales tierra adentro (Donato, Kauffman, Murdiyarsa, & Kurnianto, 2011).



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

(Mitsch & Gosselink 2007) citado por (Conservación Internacional [CI], COI-UNESCO, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2015) pag. 68 se establece que en los ecosistemas de manglares pueden albergar árboles, arbustos y otras plantas que toleran altas concentraciones de sal, creciendo en aguas salobres a salinas, afectadas por las mareas, en las regiones costeras tropicales y subtropicales. Se encuentran generalmente en la zona intermareal, desde el nivel medio del mar hasta la línea máxima de marea alta, y también en áreas deltaicas. Los manglares se dividen en cuatro tipos principales según la estructura de su vegetación, la cual está influenciada por las características físicas, climáticas e hidrológicas de su entorno: (1) manglares de borde que se ubican en costas oceánicas, (2) manglares ribereños o de estuarios, (3) manglares de cuencas, y (4) manglares enanos, arbustivos o chaparros., como lo cita (CI, COI-UNESCO, UICN, 2015, pag 68) en (Cintrón et al. 1978; Mitsch & Gosselink 2007) en. Las clasificaciones corresponden a biomasa del componente aéreo que varían de $500 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ en manglares de ribera y de borde como en zonas del pacífico asiático, hasta 8 Mg C ha^{-1} para manglares achaparrados (Kauffman & Cole 2010; Kauffman et al. 2011) citado por (CI, COI-UNESCO, UICN, 2015, pag. 68).

Las inundaciones por agua de mar a las que están sometidos los bosques del manglar propician la formación de humedales costeros salinos o salobres regularmente están formados por sedimentos con niveles bajos de oxígeno u anóxicos. Estas condiciones han hecho que las especies de mangle tengan capacidad de adaptación permitiendo su supervivencia en estos ambientes especiales, mostrándose en sus características fisionómicas como raíces aéreas (raíces fulcreas y neumatóforos), que permiten el intercambio de gases en los tejidos radiculares subterráneos. La estructura vegetal, también difiere en gran medida en la altura de árboles (como vegetación arbustiva de menos de 1 m de altura, hasta grandes árboles con fustes >1 m de diámetro), densidad y diversidad de especies, y aunado a esto, las variables climáticas como temperatura, precipitación, la hidrología y el sustrato, influyen en su funcionamiento (Saenger & Snedaker, 1993)..



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

5.2 Carbono azul

Se considera como carbono azul (CA) aquel C acumulado en el suelo, la biomasa aérea viviente, la biomasa subterránea viviente (raíces) y la masa no viviente (hojarasca y madera seca) de las especies que conforman los manglares, marismas y pastos marinos (McLeod, et al., 2011).

La clasificación del CA se puede catalogar de acuerdo a su origen, siendo estos el autóctono, el cual se produce y se deposita en el mismo lugar a través del proceso fotosintético, absorbiendo las plantas el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico u oceánico siendo este considerado como producción primaria y convertido en biomasa que es distribuido en sus distintas partes desde las raíces, troncos, hojas, flores; y la degradación de estos en proceso bastante lento por las condiciones anaeróbicas influenciado por las áreas indudables dando lugar al almacenamiento en el suelo. Por su parte el carbono alóctono, es el que se produce en un lugar y se deposita en otro, siendo el caso de los ambientes hidrodinámicamente muy activos, influenciados por las mareas y corrientes costeras transportando los sedimentos con contenido de carbono a otros ecosistemas contiguos. (Middelburg et al. 1997, Kennedy et al. 2010 como se citó en CI, COI-UNESCO, UICN, 2015, pag. 19).

5.3 Cuantificación del carbono azul en el componente aéreo por medio de parcelas permanentes

Para la medición del carbono azul, es importante definir el propósito de la cuantificación de carbono, considerando la temporalidad de los datos a levantar y su transformación en información para su uso pragmático, principalmente lo relacionado a su manejo y las acciones a considerar en programas de mitigación y adaptación al cambio climático establecidos por Guatemala y ajustados a una agenda internacional.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Las generalidades en levantamiento de datos in situ, conlleva una serie de pasos los cuales se enlistan a continuación: (Cifuentes, Romero, Brenes , & Velasquez, 2018):

- Delimitar espacial y temporalmente el proyecto para ayudar a establecer los objetivos y el ámbito de las inferencias.
- Establecer la estratificación del área para monitorear la variabilidad de los datos recopilados. La resolución y el detalle de la estratificación son relativos a la escala y los objetivos de la investigación.
- Decidir cuáles reservorios de carbono del ecosistema deben ser medidos y monitoreados.
- Diseñar un inventario que defina el tipo, número y ubicación de las unidades de muestreo.
- Determinar la frecuencia de la toma de datos.
- Realizar el trabajo de campo.
- Cuantificar las reservas de carbono y realizar inferencias espaciales y temporales.

Es muy probable encontrar en el campo variabilidad en los tipos de vegetación por lo que la cuantificación de la biomasa aérea requiere considerar distintos procedimientos de muestreo considerando las diferencias en las formas de desarrollo fenológico.

Cifuentes et.al, (2018), continúa indicando que los sumideros de carbono en los ecosistemas de manglar están dominados por árboles, La presencia y el estado de los manglares son indicadores clave de cambios en el uso del suelo y su condición ecológica. Es esencial medir los árboles con precisión y de manera exhaustiva. Los datos fundamentales para registrar en cada parcela en mangle incluyen:

- Especie (pueden coexistir pocas especies, las especies pueden identificarse habitualmente con capacitación en el campo).
- Diámetro a la altura del pecho (DAP) del tallo principal.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Altura de árbol
- Geo ubicación e identificación.

Se sugiere tomar muestras y registrar todos los árboles vivos en toda el área de la PPMF, donde se monitorean las tendencias de carbono. Los árboles más pequeños no se incluyen en los cálculos de carbono, ya que suelen representar una parte relativamente pequeña de la cantidad total de carbono en el bosque de tierras altas. (Cummings, Boone Kauffman, Perry, & Flint Hughes, 2022). No obstante en las parcelas los árboles de diámetros pequeños pueden dominar la composición del rodal y, por consiguiente se deben incluir (Kauffman & Cole, 2010). Un árbol se incluye en el muestreo si al menos el 50 % del tallo principal está enraizado dentro del perímetro de la parcela de muestreo.

En presencia de una cantidad considerable de árboles con diámetros menores pueden medirse en subparcelas para reducir el número total de mediciones necesarias. Kauffman y Cole (2010) midieron todos los árboles con un DAP superior a 5 cm en el área de la parcela, mientras que los árboles con un DAP inferior a 5 cm se midieron en áreas secundarias más pequeñas de tamaño conocido. Se puede estimar el número total de estos árboles pequeños asumiendo que tienen una densidad constante en toda el área muestreada.

5.4 Principios de los sensores remotos de radar

Un instrumento de radar genera su propia señal electromagnética mediante la transmisión de un pulso de microondas que permite la observación de la superficie de la tierra u otros cuerpos celestes, no importando si es de día o de noche. Para generar una imagen, el pulso se enfoca en una dirección con un ángulo diferente al nadir (Figura 1). Cuando el pulso es transmitido en el nadir, el instrumento se llama radar altímetro. El pulso de microondas típicamente ilumina áreas terrestres de decenas de kilómetros, y sólo la porción de energía reflejada hacia el radar es medida. El patrón de reflexión angular depende de las propiedades del objetivo, como la rugosidad (diferente entre las plantas, la superficie del agua, las estructuras urbanas y otras) y



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

la geometría. La geometría está determinada por el ángulo de vista y la pendiente del terreno. Por lo tanto, la geometría es el ángulo subtendido por la línea de visión entre el radar y un objetivo en el suelo, variando en gran medida a través de una imagen. El ángulo de mirada y la pendiente del terreno se pueden combinar en la incidencia o la proyección del ángulo. Estos ángulos se utilizan a menudo para realizar correcciones radiométricas del terreno (a veces llamadas "aplanamiento del terreno"), que tiene por objeto eliminar artefactos de la imagen debido a la geometría. En los manglares los efectos topográficos generalmente son despreciados debido a su entorno único de zonas muy llanas. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019).

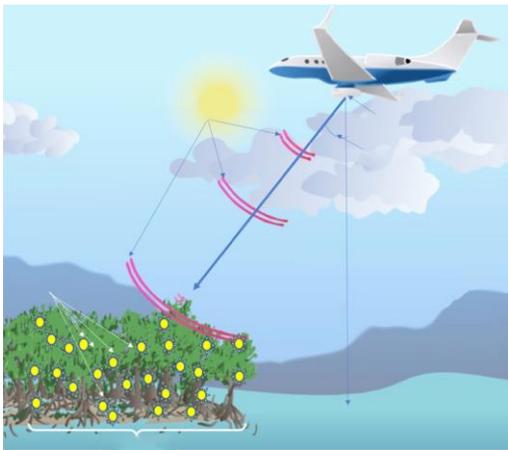


Figura 2.

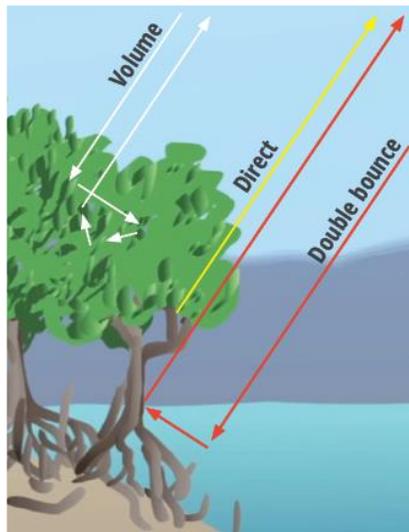


Figura 3.

Figura 1. Imagen de radar se genera ya sea desde una plataforma aérea o espacial a través de un pulso de microonda que rebota según las estructuras terrestres.

Figura 2. Mecanismo de dispersión. En bosques de manglar con raíces aéreas, la señal de microonda es atenuada disminuyendo la dispersión en biomasa alta.

Nota. Imágenes tomadas de The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)

Hay tres tipos de mecanismos de dispersión: 1) directo o simple rebote, 2) doble rebote y 3) dispersión de volumen, Figura 2. En los bosques de manglar el doble rebote que fuertemente impacta el canal HH (polarización, rebote sobre el mismo plano de la onda electromagnética,



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

horizontal-horizontal), puede ser reducido por la presencia de raíces aéreas a microondas dispersadas y atenuadas. El mecanismo de dispersión en mangles depende fuertemente de la estructura del dosel. La dirección en volumen y las firmas de doble rebote varían mucho más que en otro tipo de bosques. En particular, en mangle la dispersión decrece y la dispersión de doble rebote incrementa en copas cerradas y abiertas, respectivamente. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)

Los radares son instrumentos activos con una ventaja sobre los sensores ópticos: las señales electromagnéticas pueden atravesar las nubes y ser usados tanto de día como de noche. Esto es un atributo ventajoso para las zonas tropicales y de costas con mucha nubosidad, además de ser de acceso libre y de continuo crecimiento. La medida de retorno de la onda electromagnética es llamada “retrodispersión” y es generalmente presentada en decibeles (dB) ($10 \log_{10}(\text{de intensidad})$). Algunos instrumentos de radar se presentan en distintos “colores” (ej. Bandas de longitudes de onda), siendo estos: bandas Ka y Ku, X-, C-, L- y P-. Tabla 1. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)

Tabla 1. Designación de las bandas de microondas. Frecuencias de bandas X, C, S, L, P. Típicamente operadas en plataforma espacial de SAR.

Banda	Frecuencia Ghz	Longitud de onda cm	Usos y aplicaciones
ka	27 - 40	1.1 – 0.8	Raramente usada por SAR (vigilancia en aeropuertos)
K	18 – 27	1.7 – 1.1	Raramente usada (absorción de agua)
Ku	12 – 18	2.4 – 1.7	Raramente usada (altimetría satelital)
X	8 – 12	3.8 – 2.4	Alta resolución SAR (monitoreo urbano, hielo y nieve, poca penetración en cobertura vegetal)
C	4 – 8	7.5 – 3.8	Caballo de trabajo de SAR (mapeo global, detección de cambios, monitoreo en áreas de poca o moderada vegetación, navegación marina.
S	2 – 4	15 – 7.5	Poco usado pero creciente uso en SAR basado en observación de la tierra, monitoreo agrícola
L	1 – 2	30 – 15	Resolución media de SAR (monitoreo geofísico, mapeo de vegetación y biomasa, alta penetración, InSar
P	0.3 – 1	100 – 30	Biomasa, mapeo y evaluación de la vegetación

Nota: Adaptado de: The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

La polarización de una onda electromagnética o polimetría se refiere a la orientación de un campo eléctrico relativo a la dirección de viaje de la onda. Cuando todas las ondas de radar tienen la misma orientación, la radiación se dice que es polarizada. La mayoría de los sistemas de radar envían y reciben energía de microondas que puede ser polarizadas horizontalmente (H) o verticalmente (V). algunos sistemas de radar pueden transmitir o recibir ambas. Así, puede haber cuatro combinaciones de transmisión y recepción: HH (transmite y recibe horizontal), VV (transmite y recibe vertical), HV (transmite horizontal y recibe vertical), VH (transmite vertical y recibe horizontal). HH y VV se dice que son igual polarizado, mientras que HV y VH se dice que son polarizado cruzado. Diferencias en las propiedades físicas y eléctricas de las características de las superficies afectan la forma en que son depolarizadas las señales de radar. (Aronoff, 2005)

La Interferometría de Apertura Sintética de Radar (InSAR, por sus siglas en ingles), es una técnica para mapear la deformación del suelo utilizando imágenes de radar de la superficie de la tierra que se recopilan de los satélites en órbita. A diferencia de la luz visible o infrarroja, las ondas de radar penetran la mayoría de las nubes meteorológicas y son igualmente efectivas en la oscuridad. Entonces, con InSAR es posible rastrear la deformación del suelo incluso con mal tiempo y de noche, siendo dos grandes ventajas por ejemplo durante una crisis volcánica. (United State Geological Service, 2022). Los desplazamientos verticales pueden ser medidos con una precisión en el orden de pocos centímetros. (Aronoff, 2005).

5.5 Estimación de alturas y masa aérea en bosques de manglar usando imágenes de radar

La medición de las características estructurales del bosque de manglar es importante para el monitoreo de sus condiciones de crecimiento, salud, estabilidad y manejo. Una de las características en particular es la altura en pie de los bosques indicando su edad, indicativo de



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

hábitat para otros organismos codependientes y la cantidad de biomasa área y por ende estimar las reservas de carbono. (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)

Uno de los métodos para abarcar una mayor área es usando tecnología de radar de apertura sintética (SAR), montado sobre plataformas satelitales, especialmente con la banda-L de pasos repetidos por la InSAR.

La sensibilidad SAR para la medición de la altura del bosque en pie (ABP), está basado en tres principios fundamentales: (Flores, Herndon, Thapa, & Cherrington, 2019)

1) A medida que aumenta el número de dispersores dentro de una celda de resolución SAR, también lo hace el reflejo de energía. Esta tendencia es moderada por el efecto de atenuación de las señales cuando pasan a través del dosel del bosque, y está directamente relacionado con el efecto de saturación observado en la retrodispersión a la relación de biomasa. A medida que aumenta el número de dispersores con ABP y densidad forestal, se puede utilizar la potencia de retrodispersión del radar como una medida indirecta de ABP. Esta relación a menudo se obtiene a través de un empírico entre las dos variables.

Cabe señalar que los datos SAR pueden tener un número de diferentes combinaciones de polarización, siendo el más simple un copolarizado de retorno, como HH o VV seguido de doble polarizado, que es una combinación de uno de los retornos copolarizados con su contraparte polarizada cruzada (HH con HV, o VV con VH); y finalmente, el quad-polarizado firma, que es la más complicada ya que tiene los cuatro componentes (HH, HV, VV y VH) de la matriz de dispersión polarimétrica. Los canales de polarización cruzada de la potencia de retrodispersión a menudo son los más usados para caracterizar la estructura del bosque, esto debido a la sensibilidad de la firma polarizada cruzada hacia la dispersión múltiple que se produce en ambientes con vegetación.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

2) Además de las medidas de potencia de la retrodispersión de una imagen SAR, el SAR también puede medir con precisión la distancia de los objetos. Cuando la altura de los objetivos no es conocido con precisión, existe una ambigüedad en la relación geométrica entre el objetivo y el sensor SAR, principalmente a través del ángulo de visado, el cual es definido como el ángulo entre la dirección del nadir del SAR y el punto vector desde el objetivo del SAR.

Cuando dos observaciones de SAR son echas, el ángulo puede ser determinado muy precisamente aplicando principios trigonométricos y por lo tanto puede ser usado para medir la topografía de la tierra a través del proceso llamado InSAR. Si la medida de la altura del InSAR puede modelar la superficie del suelo, y si la topografía de la superficie puede ser determinada por otros medios, entonces la estimación de la altura de la vegetación se puede determinada por la diferencia entre la altura del InSAR y la superficie del suelo de un modelo de elevación digital (DEM).

En lugares donde la altura de la topografía no está bien definida, una signatura interferometrica única sobresale, en la cual las alturas detectadas desde el interferómetro se muestran como un numero aleatorio. Eso significa que hay una extinción del peso promedio de la señal de radar penetrando el dosel. El término “extinción del peso promedio”, se refiere a la perdida de la fuerza (extinción) de la onda electromagnética, como la señal que penetra las copas en los bosques. Por lo tanto, parte de las copas contribuirán más a la signatura de la retrodispersión que a las partes inferiores de las copas. Esta penetración de profundidad es proporcional a la señal de onda (24 cm para la banda L y 5 cm para la banda C) y la densidad de dispersión. Para las aplicaciones interferometricas, la distribución vertical de la dispersión juega un rol en la signatura general, y por lo tanto es usado el termino extinción. La magnitud de la extinción del peso promedio es conocido como “coherencia interferometrica” y normalizado con valores en un rango de 0 a 1.

3) Para InSAR, el trabajar bien sobre superficies con vegetación en la manera descrita con anterioridad, acrecienta la importancia de hacer que las observaciones de SAR sean



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

simultaneas, o lo más cercanas posibles en el tiempo. Esto es porque las observaciones son echas en tiempos distintos, y porque los objetos con una resolución de celda SAR pueden ser movidos. Estos movimientos pueden causar error en las mediciones trigonométricas del ángulo de visado lo que creara una reducción de la coherencia interferometrica. Este proceso es conocido como “decorrelación temporal”, lo que significa, que más cambios en un objeto entre observaciones, menor será la coherencia.

Cuando un sistema InSAR hace ambas observaciones al mismo tiempo (típicamente requiriendo dos satélites o una plataforma aerotransportada con dos antenas), lo que es conocida como “paso único InSAR”. Por el contrario, si la observación de la escena es echa en diferente tiempo, es llamada “paso repetido InSAR”.

Una forma para estimar el ABP por el paso repetido InSAR, es medir la cantidad de decorrelación temporal que ocurre entre pasadas y hacer el supuesto general que el más alto es el bosque, entre más movimiento puedan ocurrir entre pasadas del satélite. Por la tanto, cuando la coherencia interferometrica es medida, puede indirectamente ser usado para estimar de ABP.

Como en el caso de dispersión relacionada con la biomasa, el canal de polarización cruzada (HV), la coherencia interferometrica es más sensible al ABP que el canal copolarizado (HH y VV). Basado en estos principios, un paquete de algoritmos ha sido creados para estimar la ABP a partir de las observaciones InSAR.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

6 Estado del arte

Estimaciones a nivel mundial han demostrado que los bosques de mangle tienen el más alto almacenamiento de carbón por ha. Las medias de almacenamiento en los ecosistemas de manglar se estiman en 3131 tCO₂-eq ha⁻¹. (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC] Working Group III, 2022). Estudios recientes enfatizan la variabilidad del stock de carbón por cada tipo de humedad, basado en las especies, el clima y la condición adaptativa, teniendo almacenamientos de carbono total en el ecosistema entre 79 - 2,208 Mg C ha⁻¹, con medias de 856 Mg C ha⁻¹, de los cuales se estima que el 15 % se encuentra en la biomasa aérea y el 85 % en el suelo. Considerando la disponibilidad y vulnerabilidad de carbono a una profundidad de 1 m de suelo, se reportan para centro américa un stock de 949 Mg C ha⁻¹ y de 72 Mg C ha⁻¹ en la masa aérea. (KAUFFMAN, et al., 2020). El nivel del mar influencia directamente la distribución de los humedales en las costas, así como productividad y la sedimentación; por lo tanto, el incremento del nivel del mar impactará la acumulación y la persistencia de las reservas de carbono. Macreadie et al. 2019 citado por (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 2022, pag 1219).

(Rodríguez, 2017), en su estudio sobre la Existencias de carbono azul y la dinámica temporal de la cobertura del bosque de manglar en el área conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, reportó que a nivel de ecosistema la cuantificación de carbono aéreo fue de 66.08 ± 3.39 Mg C · ha⁻¹, en tanto que la existencia en el suelo hasta 200 cm de profundidad fue de 422.1 ± 68.51 Mg C · ha⁻¹.

El proyecto de investigación, Estimación de carbono azul del componente suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona, (García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), cuantificó que las reservas de carbono en el componente suelo mayor a 1 m de profundidad, se sitúan en promedio 302 Mg · ha⁻¹. Según el mapa de clasificación de cobertura por mangle, se estimó que existían 675,392.16 Mg de Carbono Orgánico en Suelos (COS), de los cuales en la cobertura con *Rizophora mangle* existían 569,220.60 Mg, en *Avicennia germinans* fue de 104,081.84 Mg y en la cobertura con *Laguncularia racemosa* de 2,089.72 Mg de COS.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

En Guatemala se tienen identificadas cinco especies de mangle: *Avicennia germinans* (mangle negro), *Conocarpus erectus* (botoncillo), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Rhizophora mangle* (Spalding, Kainuma, & Collins, 2011), y *Rhizophora racemosa* citado en la Flora Mesoamericana por Véliz Pérez (2015); estando presentes en los ecosistemas de manglar de los litorales del Pacífico y Atlántico; siendo las especies ratificadas por CONAP e INAB.

En el litoral del pacífico de Guatemala, el carbono en bosque manglar para el año 2012, fue estimado en 2,058,7 Mg, siendo su distribución en porcentaje por especie así como su cuantificación por ha de: *Rhizophora mangle* 65.7 %, 123.77 Mg C·ha⁻¹; *Laguncularia racemosa* 32.66 %, 109.09 Mg C·ha⁻¹; *Avicennia germinans* 1.82 %, 64.13 Mg C·ha⁻¹; y *Conocarpus erectus* 0.25 %, 84.72 Mg C·ha⁻¹. (Aceituno, Cifuentes, Cojom, & Bosarreyes, 2016).

La cuantificación del carbono aéreo en los bosques de manglar usando parcelas permanentes se estandarizó para Guatemala a partir del año 2018, lo cual ha permitido al 2022 el establecimiento y monitoreo de 45 parcelas en el pacífico de Guatemala y 5 en el Atlántico, concentrándose 7 en el área las Lizas – La Barrona. (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2022). Estas parcelas permanentes disponen de datos dasométricos, como diámetros, alturas, área basal, individuos por ha, y volumen por ha, que aplicando ecuaciones alométricas permiten cuantificar las reservas en Mg C· ha⁻¹.

La altura del dosel sirve como parámetro en la cuantificación de carbono. Una alta decorrelación de los productos de interferometría Sentinel 1 permite que los datos sean de acceso libre para las áreas tropicales. Un estudio en Odisha, India, demostró que la estimación de las alturas arbóreas se puede realizar usando imágenes de radar a través de modelos de aprendizaje automatizado en bosque de manglar, como bosques aleatorios (BA) y regresión simbólica (RS). El potencial de los sensores Sentinel-1 y Sentinel-2 para establecer parámetros



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

biofísicos posibilitan estimar la altura de los bosques y compararlos con datos levantados en campo. La coherencia interferométrica y las variables biofísicas, como el índice de área de hoja (LAI) y la fracción de cobertura vegetal (FVC), tienen una correlación razonable con la altura del dosel. Los modelos BA han mostrado un error medio cuadrático (RMSE, por sus siglas en inglés) de 1.57 m y una desviación estándar de 0.6 m entre las alturas del dosel observadas y las predictivas, mientras que los modelos SR a través de los programas genéticos demuestran un mejor RMSE y desviación estándar con valores de 1.48 m y 0.62 m, respectivamente. La RS permite establecer un modelo interpretativo, que no es posible por otro algoritmo de modelo interpretativo automatizado. EL FVC es una variable esencial para predecir la altura en mangles, demostrando la efectividad para los datos Sentinel en la cuantificación indirecta de almacenamiento de carbono. (Ghosh, Behera, & Paramanik, 2020).

Los bosques de manglar están dispersos en las costas de Sri Lanka, con una extensión de 82 km². La estimación de la biomasa aérea (BAr) en toda una extensión de territorio se convierte en un reto mayor si se deben de tomar datos en campo. Para sobrepasar las distintas limitaciones, en la última década se ha hecho popular el uso de datos SAR para la estimación de BAr, siendo uno de los insumos los productos del sensor ALOS-PALSAR. El DAP y las aturas tomadas en las parcelas en sitio, y la aplicación de ecuaciones alométricas permiten estimar la BAr, pero los coeficientes de dispersión de los valores de polarización HH y HV, también permiten estimar la biomasa aérea en manglares usando un modelo derivado previamente. En este sentido, los estudios en Sri Lanka compararon estimaciones de BAr, con datos de campo y usando datos PALSAR. De acuerdo con los resultados, el promedio de biomasa con datos de sitio fue 65 Mg·ha⁻¹ con un rango entre 28 y 135 Mg·ha⁻¹, mientras que los datos con datos SAR fue en promedio de 76 Mg·ha⁻¹, estando el rango entre 33 y 135 Mg·ha⁻¹, con una sobreestimación del 17 % usando sensores remotes. Esta sobreestimación significativa se presenta en árboles con una altura mayor a 5 m, siendo una aproximación poderosa para entender la distribución de BAr en manglares en donde los muestreos en campo se convierten en un reto. (Gunawardena, Nissanka, Dayawansa, & Fernando, 2016).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

7 Objetivos

Objetivo General

Cuantificar los cambios de reserva de carbono azul almacenado en el componente aéreo del ecosistema de manglar por medio de datos de parcelas permanentes y compararlos con datos de sensores remotos de radar.

Objetivos Específicos:

- Estimar el crecimiento multianual y almacenamiento de carbono del componente aéreo de los bosques de manglar por medio del monitoreo permanente in situ.
- Establecer el crecimiento arbóreo multitemporal y almacenamiento de carbono de los bosques de manglar utilizando imágenes de radar.
- Comparar los cambios de masa en el dosel a partir de datos de parcelas permanentes de muestreo y los datos de radar para el monitoreo de reservas de carbono.
- Cuantificar la reserva de carbono considerando el componente suelo y biomasa aérea del ecosistema de manglar en el área de estudio como medida de carbono azul.

8 Hipótesis

H1: La utilización de datos radar y la aplicación de algoritmos, permiten estimar las reservas de carbono azul en bosques de manglar de forma aceptable comparado con la cuantificación proveniente de datos de parcelas permanentes de muestreo.

Ho: La cantidad de carbono azul estimada en biomasa en bosques de manglar, por medio del monitoreo de parcelas en campo, difieren significativamente con los algoritmos aplicados a los datos de radar para estimar la biomasa.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

9 Materiales y métodos

9.1 Delimitación en tiempo

El proyecto de investigación de la cuantificación de la acumulación de carbono en manglares conllevó un proceso de siete años retrospectivos considerando datos del Sistema de Monitoreo Forestal en Ecosistemas de Manglar (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2022), de las Parcelas Permanentes de Muestreo Forestal (PPMF) de los años 2017, 2018, 2022 y 2023, complementando con 4 PPMF implementados por CEMA durante el año 2023.

Para el año 2023 se usaron datos radar del sensor Sentinel-1 (European Space Agency, 2022), para estimación de biomasa, que se compararon con los datos PPMF. De forma similar, para el año 2022 se usaron datos de mosaico de imágenes de radar Alos Palsar 2. (Japanes Aereo Space Agency, 2023)

9.2 Delimitación espacial

El proyecto de investigación se desarrolló en el área de conservación Las Lisas-La Barrona, en el Pacífico sur oriental de Guatemala, con una extensión de 5500 ha, de las cuales el 37 % está cubierta por bosques de mangle. Esta área está ubicada entre el municipio de Chiquimulilla, en el departamento de Santa Rosa y el municipio de Pasaco, del departamento de Jutiapa. Es un humedal costero que se encuentra localizado en la parte baja entre las desembocaduras de la cuenca del río Los Esclavos y del río Paz, en el litoral del Pacífico (Figura 3).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

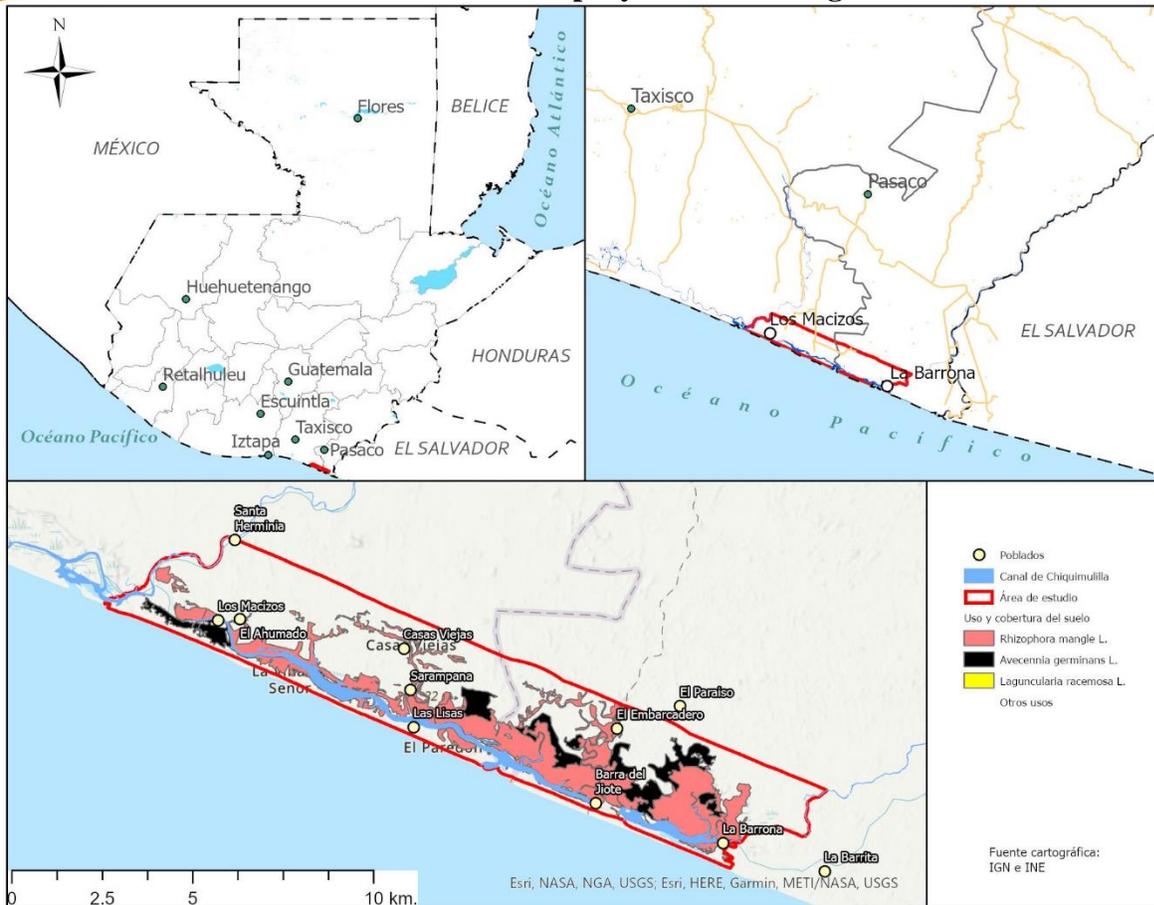


Figura 3. Mapa de ubicación del proyecto de investigación y cobertura actual de mangle

9.3 Enfoque de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y explicativo debido a que se analiza el comportamiento de la cantidad de carbono orgánico acumulado y liberado durante 7 años en el bosque de mangle del área denominada las Lisas – La Barrona, el cual corresponde a 4 años de datos (2017, 2018, 2022 y 2023) en el componente aéreo vivo del bosque del ecosistema de manglar a través de las PPMF preestablecidas por INAB y las establecidas en el presente proyecto. En complemento, se procedió a realizar muestreos en suelo para estimar la cantidad de carbono en este componente.

Se Establecieron los diámetros a la altura del pecho y las alturas en parcelas permanentes para extrapolarlo a los bosques según las especies.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Por otra parte, se usaron datos de radar para cuantificar la masa aérea de los bosques de manglar y compararlos con los datos tomados en campo provenientes de las PPMF, usando para esto estadísticos y tecnologías de soporte como los manejadores de datos geográficos o Sistemas de Información Geográfica (SIG).

9.4 Método

Para estimar las reservas de carbono en el tiempo, se usaron dos métodos a comparar, siendo uno in situ a través de la “Metodología para el Establecimiento y Mantenimiento de Parcelas Permanentes de Medición Forestal, INAB, CONAP e ICC y consensuada por el gremio forestal aplicada a bosque natural del ecosistema de manglar.

El segundo método fue a través de la metodología para el monitoreo y estimación de biomasa en bosques usando la apertura sintética de radar (SAR), del sensor Sentinel 1 y los subproductos de modelo de elevación digital (DEM). Así mismo se usaron los datos de retrodispersión del Alos Palsar 2.

Para la cuantificación del carbono de suelo, se aplicó la estratificación y sondeo de perfiles a profundidad preestablecidas para estimar el almacenamiento de C azul en suelos con cobertura de mangle, realizándose por medio nucleadores (barrenas tubo tipo Hoffer). A nivel de laboratorio, para establecer el carbono orgánico del suelo (COS), se aplicó el método analítico de combustión seca total.

9.4.1 Método por parcelas permanentes de medición forestal (PPMF):

- Considerando la investigación sobre la Estimación de carbono azul en el suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala del 2021 (García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), se hicieron muestreos de suelo en 5 sitios,



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

siendo estos en donde se procedió a establecer las PPMF para coincidir así con la cuantificación total del carbono en esas áreas de manglar.

- Tamaño y forma de las parcelas permanentes: área de parcela 500 m, de forma rectangular, con dimensiones de 25 m x 20 m. Su orientación se estableció de sur a norte, realizando mediciones de todos los árboles con DAP igual o mayor a 5 cm. Se delimitaron subparcelas con un tamaño de 5 x 5 m, de forma cuadrada, siendo ubicadas en las esquinas suroeste y noreste de la PPMF. En las subparcelas se realizó el conteo y clasificación correspondientes a la regeneración natural.
- Se delimitaron los linderos de las parcelas, marcando 4 esquineros utilizando tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro por 2 m de largo, los cuales se enterraron a una profundidad de al menos 50 cm.
- El geoposicionamiento o de la parcela se realizó con un receptor de señal GPS en el esquinero suroeste.

9.4.2 Recolección de información en PPMF

Debido a los tiempos de asignación presupuestal para realizar los trabajos de campo, se realizaron los trabajos de campo en los meses de agosto y septiembre consistente en el establecimiento y la toma de datos en las cuatro PPMF.

Para la recolección de los datos en campo por cada parcela se procedió al marcado permanente de árboles dentro de las parcelas siendo la secuencia: marcación de un anillo con pintura permanente a la altura del DAP o del diámetro normalizado, enumeración de todos los árboles en orden ascendente dentro de la parcela. La numeración se realizó de sur a norte y regresos de norte a sur haciendo repeticiones en una forma de zigzag. En *Rhizophora sp.*, el anillo diamétrico, se marcó y se tomó el diámetro a 30 cm por arriba de la última raíz aérea anclada del fuste principal.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Con respecto a las subparcelas de regeneración natural, se procedió en los dos esquinero, suroeste y noreste, para cuantificar el número de individuos menores a 5 cm de DAP que estaban contenidos en estas dos subáreas.

9.4.3 Técnicas e instrumentos en PPMF

En cada PPMF se generó un archivo individual de registro de las características y variables dasométricas y ambientales, incluyendo los análisis y otras observaciones complementarias. En cada parcela se registraron los datos en 5 distintos formularios, siendo estos:

- i. Formulario 1. Es un documento que contiene un registro detallado de todos los eventos y actividades que han tenido lugar en la parcela desde su establecimiento. Este informe puede tomar la forma de un "reporte de visita", una "bitácora" o un "diario", y puede basarse en fuentes primarias o secundarias. El historial incluye información sobre todo lo ocurrido desde el inicio hasta la última revisión, abarcando detalles como eventos dañinos (por ejemplo, plagas o incendios), experiencias exitosas, cambios en fuentes de agua cercanas y actividades humanas que impactan la parcela, entre otros.
- ii. Formulario 2. Descripción general de la parcela: considera información de la parcela generada durante su establecimiento, teniendo como fin el recolectar datos descriptivos del sitio, así como elaborar un croquis de ubicación.
- iii. Formulario 3. Medición de variables dasométricos por árbol: en este se registran datos como: DAP, altura de árboles y coordenadas, estado de salud, forma del fuste, entre otras. Para esto se utilizó cintas diamétricas, hipsómetro, cintas métricas, pintura, y aparato receptor GPS.
- iv. Formulario 4. Medición de árboles de regeneración: Se registró los datos de las plántulas de regeneración de las especies presentes.
- v. Formulario 5. Croquis de ubicación de los árboles: Permite contar con una ubicación precisa de cada individuo medido dentro de la parcela. La información es indispensable para analizar y establecer densidades de las especies de interés.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

9.4.4 Procesamiento y análisis de la información en PPMF

Para la estimación de las reservas de carbono se usó información recolectada en campo proveniente de las parcelas permanentes, lo que permitió estimar la biomasa de los árboles a partir de los diámetros establecidos. (Aceituno, Cifuentes, Cojom, & Bosarreyes, 2016).

Las variables recopiladas en las PPMF útiles para calcular la biomasa aérea son:

- Diámetro DAP (DBH)
- Especie del árbol
- Área de la parcela (m²)

A partir de los datos de las variables de campo, se aplicaron las ecuaciones alométricas establecidas por el Grupo Interinstitucional de Mapeo de Bosque y Uso de la Tierra (GIMBUT), y que se consideran en otros procesos a nivel nacional como las líneas de referencia para la Estrategia Nacional REDD+. (Aceituno, Cifuentes, Cojom, & Bosarreyes, 2016). Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 2. Ecuaciones alométricas para calcular biomasa de árboles sobre el suelo por especie.

Especie	Ecuación de biomasa arbórea sobre el suelo	R ²	Dmax	Fuente
Rhizophora mangle L (rojo)	Biomasa = 0.1781DBH ^{2.47}	0.98		Fromard et al. (1998)
Laguncularia racemosa (L.) Gaertn.f. (blanco)	Biomasa = 0.1023 x DBH ^{2.50}	0.97	10	Fromard et al. (1998)
Avicennia germinans (L.)L. (Madre sal o mangle negro)	Biomasa = 0.14 x DBH ^{2.4}	0.97	42	Fromard et al. (1998)
Conocarpus erectus L. (botoncillo)	*Biomasa = 0.1023 x DBH ^{2.50}	0.97	10	Fromard et al. (1998)

¹ Esta ecuación corresponde originalmente a Laguncularia, pero se utiliza también para Conocarpus sp. por características similares de crecimiento



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Nota: Adaptado de: Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo del ecosistema manglar en el pacífico de Guatemala. (Aceituno, Cifuentes, Cojom, & Bosarreyes, 2016).

Tabla 3. Ecuaciones alométricas de biomasa de raíz por especie.

Especie	Ecuación de biomasa arbórea bajo el suelo	Fuente
<i>Rhizophora mangle L (rojo)</i>	Biomasa = $0.199 * (\rho 0.899) * (DBH 2.22)$	Komiyama et al. (2005)
<i>Laguncularia racemosa (L.) Gaertn.f. (blanco)</i>	Biomasa = $0.199 * (\rho 0.899) * (DBH 2.22)$	Komiyama et al. (2005)
<i>Avicennia germinans (L.)L. (Madre sal o mangle negro)</i>	Biomasa = $0.199 * (\rho 0.899) * (DBH 2.22)$	Komiyama et al. (2005)
<i>Conocarpus erectus L. (botoncillo)</i>	Biomasa = $0.199 * (\rho 0.899) * (DBH 2.22)$	Komiyama et al. (2005)

ρ = densidad básica de la madera (gr/cm³)

Nota: Adaptado de: Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo del ecosistema manglar en el pacífico de Guatemala. (Aceituno, Cifuentes, Cojom, & Bosarreyes, 2016).

Tabla 4. Densidad básica de la madera de especies de mangle para cálculos de biomasa bajo el suelo

Densidad básica ρ	gr.cm ⁻³
<i>Rhizophora mangle L.</i>	0.86
<i>Laguncularia racemosa (L.) Gaertn.f.</i>	0.762
<i>Avicennia germinans (L.)L.</i>	0.759
<i>Conocarpus erectus L.</i>	0.762
<i>Chaperno</i>	0.759
spp	0.759

9.4.5 Mapeo y monitoreo de bosques de manglar usando Sensores Remotos (SR).

Se implementaron dos métodos para estimar la biomasa de los manglares. El primer es por el uso de las alturas del dosel derivado de los DEM. La altura del dosel es estimada usando un DEM derivado de los productos de radar, usando para este caso los modelos de Sentinel 1 de 10 y 30 m (European Space Agency, 2023), datos de descarga gratuita a los cuales se les aplicaron algunos procesos.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

El segundo método es el que considera las imágenes de retrodispersión por radar o SAR, estimándose la biomasa aplicando el modelo desarrollado por las imágenes preprocesadas de AlosPalsar-2, (Japanes Aereo Space Agency, 2023).

9.4.6 Recolección de información para monitoreo de bosques de manglar con SR.

La recolección de la información de los datos usados para cuantificar la biomasa aérea obedece a un espacio virtual debido a que se hicieron descargas de DEMs de 30 m de resolución espacial, a partir del sensor Sentinel 1 del año 2023. Así mismo del Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Las imágenes mosaico Alos Palsar 2, de la Agencia Aéreo Espacial Japonesa (JAXA) (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/index/index>).

9.4.7 Técnicas e instrumentos para monitoreo de bosques de manglar con SR.

Los Datos listos para ser utilizados y analizados se obtuvieron de las distintas fuentes web descritas con anterioridad, tanto las descargas DEM 30 m de Sentinel 1 como las imágenes AlosPalsar-2 (imágenes y mosaicos).

Por su parte, también se usó el software SNAP del programa Coopernicus, para el tratamiento y procesamiento de las imágenes, descargado a través del enlace <http://step.esa.int/main/download/>.

En complemento se utilizó el software de SIG, QGIS, el cual tiene la ventaja de ser un manejador de bases de datos geográfico de acceso libre, sobre el cual se corrieron algunos de los procesos de análisis utilizando la calculadora ráster y otras herramientas específicas para geoprocésamiento de datos.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

9.4.8 Procesamiento y análisis de la información usando SR

Se generó dos mapas de cobertura de manglar con temporalidades 2017 y 2023 para establecer la dinámica forestal del área de estudio, comprendida de los caseríos Los Macizos hacia el Caserío La Barrona, Las Lisas, proceso que contemplo:

- Consulta de imágenes recientes de alta resolución de las fechas indicadas. La opción considerada fue imágenes de satélite Planet de 5 metros de resolución espacial.
- Actualización del mapa de cobertura 2017 a 2023, modificando las unidades de mapeo, e identificando los tipos de mangle.
- Chequeo de campo para confirmar las unidades de mapeo echas en la fase de gabinete.
- Afinamiento de las unidades de mapeo producto del chequeo de campo.
- Obtención de la capa vectorial de cobertura de las fechas indicadas.

Cargar imágenes ráster DEM-Sentinel 1.

Se usó el programa de SIG QGIS, para visualizar las imágenes DEM obtenidos de los sitios de descarga en línea, realizando para esto el corte de los ráster DEM. Para el corte se consideró la capa detallada de las coberturas de mangle 2023 del área de Los Macizos a La Barrona.

Aplicación de las alturas de DEM basado en ecuaciones alométricas genéricas

Se estimó la biomasa del manglar usando la altura del dosel de los subproductos Sentinel 1. Se aplico ecuaciones alométricas directamente al DEM. Existen varias ecuaciones genéricas que se aplicaron a los modelos de elevación digital para estimar las alturas y la biomasa aérea, siendo estas:



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Altura ponderada del área basal: $H_{ba} = 1.08 * (\text{DEM-Sentinel 1}, 30 \text{ m})$
- Máxima altura del dosel: $H_{max} = 0.93 * 1.7 * (\text{DEM-Sentinel 1}, 30 \text{ m})$
- Biomasa aérea: $B = 3.25 * H_{ba}^{-1.53}$

Aplicación de la retrodispersión de SAR basado en ecuaciones alométricas genéricas

Si bien para estimar la biomasa de mangle por medio de la retrodispersión de radar según pruebas no se compara con la exactitud de las estimaciones con datos en campo, sirvió como complemento para comparar la biomasa estimada con radar y las PPMF. Para esto se aplicaron ecuaciones alométricas para obtener la biomasa aérea (B) en $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, considerando los decibeles de la retrodispersión (dB), siendo las ecuaciones:

$$S^{\circ}_{\text{HV}}(\text{dB}) = -22.5 + 3.0 * \ln(B)$$

$$S^{\circ}_{\text{HV}}(\text{linear}) = a \cdot B a' (1 - e^{-B \cdot b}) + c,$$

Donde: $a=0.013682$, $a'=0.21116$, $b=0.051846$, $c=0.02192$.

Para simplificar la cuantificación de la biomasa (B), se recomienda usar la siguiente ecuación

$$B(\text{t/ha}) = 0.5 \times 10^{(40.2 \times S)} \text{ con } S^{\circ}_{\text{HV}} \text{ en unidades lineares } (\text{m}^2/\text{m}^2)$$

Los datos descargados de las imágenes de satélite Alos Palsar 2, se obtuvieron en formato de números digitales (DN), los cuales se convirtieron a Db usando la siguiente formula:

$$S^{\circ}_{\text{HV}}(\text{dB}) = 20 * \log_{10}(\text{DN}) - 83$$

Después de obtener las imágenes de radar en un formato dB, se aplicó la ecuación alométrica para la obtención de la biomasa usando la calculadora ráster del software QSIG, como se muestra en la siguiente ecuación:



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

$$B = 0.5 * 10 * (40.2 * 10^{(RasterImage/10)})$$

Complemento en muestreo de cuantificación de carbono azul en suelos

La zona de estudio contempla 1698.4 ha de bosque de manglar, dentro de las cuales existen 7 parcelas permanentes de muestreo manejadas por INAB, las cuales no tienen análisis de carbono en suelos. De los 7 sitios se tomaron 4, aprovechando la coyuntura de los trabajos de campo. Se procedió a realizar muestreo de suelo como se indica:

- Priorización de los 4 sitios de muestreo para la medición por estrato de profundidad del suelo y densidad de campo y aparente, así como carbono orgánico.
- Estimación de la muestra: para cada sitio de muestreo se tomó 1 núcleo de submuestras, es decir, muestras de 3 cm de alto, 5 cm de diámetro. Coincidentes con las dimensiones del nucleador tipo Hoffer, a una profundidad mínima de 1 m y en algunos casos mayor, donde fue posible.
- Cada núcleo consistió en al menos 5 submuestras, haciendo un total de 35 muestras.

Para la toma de muestra del suelo, se utilizará la técnica de muestreo propuesta por (Donato, Kauffman, Murdiyarto, & Kurnianto, 2011), en la cual se obtienen muestras de 5 cm de diámetro y 3 de altura, a profundidades de 0 a 15 cm, 15 a 30 cm, 30 a 50 cm, 50 a 100 cm y mayor a 100 cm en donde fuese posible por temas por la estructura del suelo o no presencia. Cada muestra y submuestra contemplo una etiqueta que identifica el sitio de muestreo, la parcela, el núcleo y las profundidades de las muestras. Las muestras se conservaron en frío durante su traslado al laboratorio para los análisis respectivos.

Para determinar la densidad real del suelo en el campo, se toma una muestra cilíndrica de altura y diámetro constante, de 3 y 5 cm respectivamente, considerándose así un volumen de 21.21 cc en cada intervalo de profundidad, y se taro con una balanza portátil de precisión. El material



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

se homogeniza y se llevó como muestra al laboratorio para realizar los análisis correspondientes, consistentes en calcular la densidad aparente, materia y carbono orgánicos por el método de Walkley y Blackel. (Cifuentes, Romero, Brenes , & Velasquez, 2018).

9.5 Operacionalización de las variables o unidades de análisis

Las variables dosimétricas que se registran en la parcela consignadas en el formulario No. 3, siendo la forma de medición:

- a. **Árbol con un solo fuste:** El dato DAP se registra a una altura 1.30 metros desde el nivel del suelo.
- b. **Árbol bifurcado:** árboles con más de un fuste principal.
 - b.1. Si el árbol se bifurca por encima de la altura normal de DAP, 1.30 m, se miden como un solo fuste.
 - b.2. Si el árbol está bifurcado por debajo de 1.30 m, se mide cada eje como un solo árbol.
- c. **Árboles con deformación a la altura de DAP,** se mide el diámetro al menos 30 cm por arriba de deformación.
- d. **Altura total:** Con la ayuda de un hipsómetro se mide la altura de cada árbol. La altura es se considera desde la base del árbol hasta el ápice de la copa. Si la medición se hace en tiempo de marea de inundación, se mide la profundidad de la película de agua y se suma a la altura total del árbol.
- e. **Altura de raíces:** Para el árbol con raíces fulcreas, se toma la altura de raíces desde el suelo hasta el anillo de medición del árbol. El instrumento usado fue la cinta métrica.
- f. **Mortalidad:** si algún individuo murió durante el periodo transcurrido desde la última medición, se anota la causa probable de mortalidad. Codificación: 01 Talado; 02 Muerte por incendio; 03 Derribado por el viento; 04 Muerte por rayo; 05 Muerte por plagas; 06 Otro.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- g. Estado físico del fuste del árbol: Se clasifican las características físicas de los individuos de la parcela. Codificación: R Fuste recto; B Fuste bifurcado; Q Fuste incompleto o quebrado; Y Fuste inclinado; T Fuste torcido.
- h. Estado sanitario: Determinación por observación directa. Codificación: 10 Sano; 20 Enfermo; 30 Plagado.

El formulario 3. B relacionado la medición de neumatóforos se contemplan lo siguiente:

- a. Altura de neumatóforos: se identifica el árbol con el diámetro mayor dentro de la PPMF y con presencia de neumatóforos, se establece un radio de 0.5 metros con cinta métrica, se miden los neumatóforos presentes. La lectura se realizará desde el piso hasta el ápice de cada uno de ellos. Se identificará el número de árbol al cual se le realiza la medición de neumatóforos en el futuro. En el caso de que el árbol ya no existiera, se considera el mismo criterio para elegir otro árbol.

La medición de los árboles de regeneración natural se consigna los datos en el formulario 4, operacionalizando como sigue:

- a. Medición en *Rhizophora sp.* En las subparcelas, se deben tener en cuenta variables relacionadas con la regeneración natural, centrándose únicamente en el conteo de individuos. De acuerdo con la clasificación propuesta para esta especie, se registra la presencia por categorías: Tipo A, plántulas con hojas; Tipo B, plántulas con hojas y primeras ramas; Tipo C, plántulas con hojas, ramas y raíces aéreas.
- b. Medición en *Avicennia germinans*, *Conocarpus erectus*, *Laguncularia racemosa*. Se contabilizan todas las plántulas con diámetros menores a 5 cm y se mide la altura para posteriormente obtener un promedio de altura en toda la parcela.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

VARIABLES DEL SITIO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BOSQUE A CONSIGNARSE EN EL FORMULARIO 1:

- a. Es indispensable la descripción de las características generales del bosque, considerando aspectos fisicoquímicos de aguas y del suelo o sustrato², empleando la codificación preestablecida: 1R, Ribereño; 2B, Borde; 3C, Cuenca; 4S, Sobrelavado o barra; 5M, Matorral o achaparrado.

Fuente de inundación: M, Mareas; R, Ríos; C, Canales; Ot, Otro (especificar)

- b. Hidro periodo: hacer referencia a la dinámicas de las mareas asociadas al área de la PPMF. La información se obtiene a través de consultas con las personas que conocen el área y que viven en las cercanías.

b.1. Frecuencia de la inundación: a, Una vez al día; b, Dos veces al día; c, Inundación solo en los marciales; d, Otras (especificar).

b.2. Altura de lámina de agua a, altura máxima de inundación

b.3. Duración (Tiempo tarda la inundación en el área): a, 12 horas; b, 24 horas; c, 1 semana; d, 1 mes; e, Se mantiene inundado todo el tiempo; f, Otros (especificar).

- c. Salinidad intersticial: Se toma el dato con un conductímetro o sonda multiparamétrica el cual se consigna en el formulario número 01. La lectura se realiza en el centro de la parcela en donde se introduce un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro por 1.5 metros de altura, el mismo se entierra 20 cm bajo la superficie del suelo; éste previamente debe de perforarse para que permita el intercambio de fluidos del área externa a lo interno del tubo.

² Para la presente investigación no se considera los aspectos de suelo para las parcelas permanentes, debido a que se complementará con el trabajo del 2021 sobre Estimación de carbono azul del componente suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala. Si se hará muestreo de suelos como complemento en las parcelas permanentes de muestreo preestablecidas por INAB, las cuales no cuentan con la información de carbono en suelo.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

10 Resultados y discusión

10.1 Resultados

10.1.1 Estimación del crecimiento interanual del bosque de manglar

Para cuantificar la biomasa forestal y a partir de esta la cantidad C en el ecosistema de manglar en los componentes raíces, fuste y el dosel, se usaron los datos sistematizados de ocho PPMF, siendo cuatro establecidas en los mismos lugares de muestreos del estudio sobre la Estimación de Carbono Azul en Componente Suelo, Las Lisas (García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), así como cuatro parcelas de monitoreo preestablecidas desde el 2017 por INAB, CONAP y CECON en el mismo ecosistema de Las Lisas – La Barrona.

Para mantener la homogeneidad a nivel de país, se usó la misma metodología (Insituro Nacional de Bosques, Instituto de Cambio Climático, Conserjo Nacional de Áreas Protegidas, 2018). En donde se identificaron las especies dentro de cada parcela de 500 m², tomando datos de DAP, alturas de raíces fulcreas, así como alturas de los árboles.

De la toma de variables dasométricos de campo del año 2023 de las 8 PPMF, se sistematizaron los datos, a los cuales se les aplicaron las ecuaciones alométricas por especie de las tablas 2, 3 y 4 para estimar la biomasa por parcela y la fracción de C en 500 m², así como su equivalente de C·ha⁻¹, en la parte de raíces, arbórea y el total de ambos componentes. Se procedió a interpolar los valores de C·ha⁻¹, por cada componente obteniéndose una representación espacial y sus estadísticos. *Tabla 5, Figura 4 y Error! Reference source not found.*

Para el componente suelo, en el año 2023 se muestreo 10 lugares, 4 coincidentes con las parcelas INAB/CONAP/CECON, y 6 en otros lugares para tener mejor representación espacial. Por aparte se utilizaron los datos de C del suelo del año 2021 de 5 sitios, elaborado por García y colaboradores. Con los 15 lugares muestreados, se especializo por medio de



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

técnicas interpolación, obteniéndose de el C almacenado en un metro de profundidad. *Tabla 5*
y **Error! Reference source not found.**

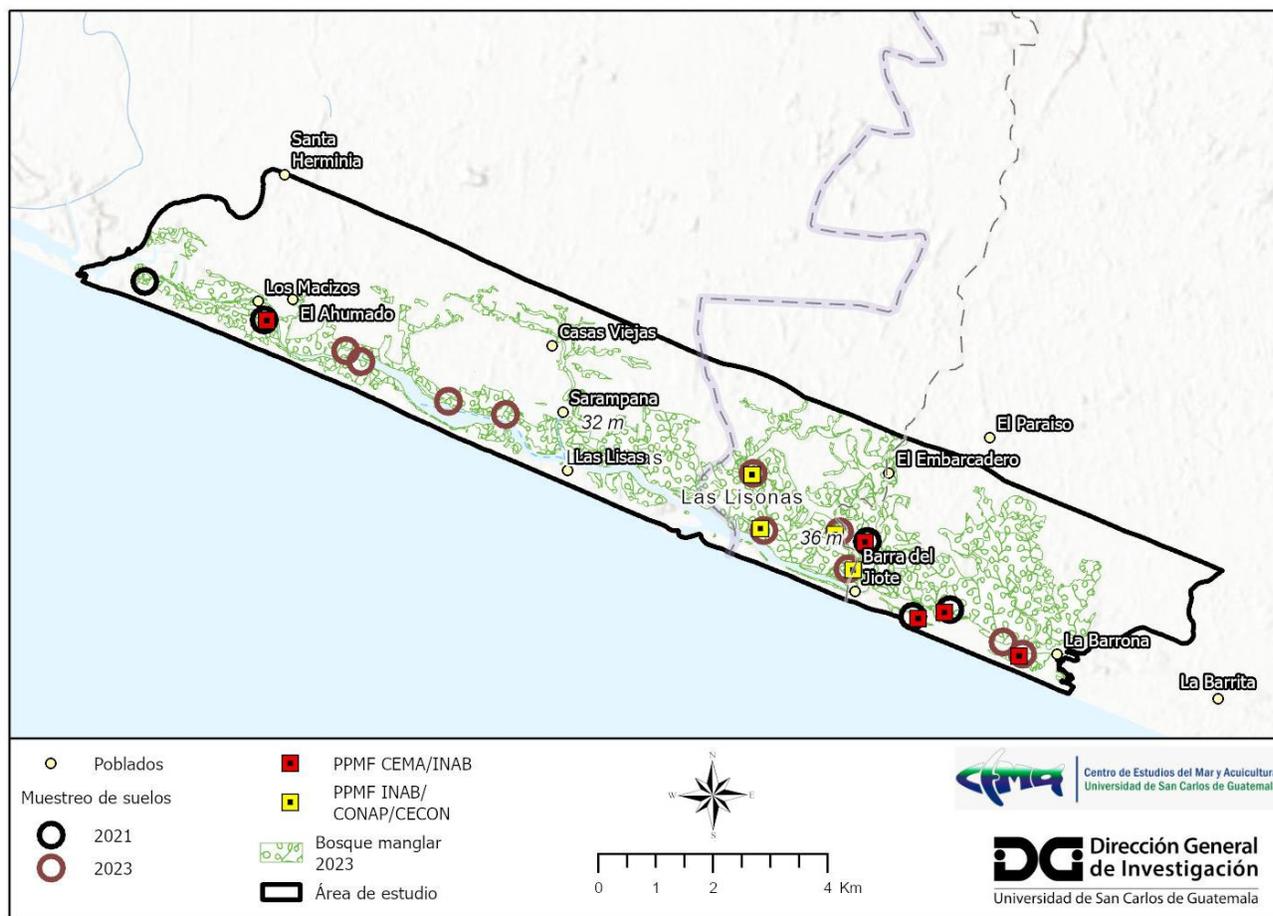


Figura 4. Ubicación de PPMF para la cuantificación de C en el componente forestal.

Tabla 5. Estadísticos de la cuantificación de Mg C ·ha⁻¹, estimado a partir de PPMF.

Mg C ha-1	Min	Max	Media	Des. Std.	C total.
Raíces	15.85	63.44	33.47	7.82	56898.40
Arbóreo superior	34.90	196.56	87.21	27.02	148229.72
Raíces y arbóreo	50.20	260.00	124.90	62.40	205128.11
Suelo 1 m prof.	38.69	541.83	281.28	71.11	418,284.06



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Total ecosistema	160.05	641.84	397.74	86.34	623,412.17
------------------	--------	--------	--------	-------	------------

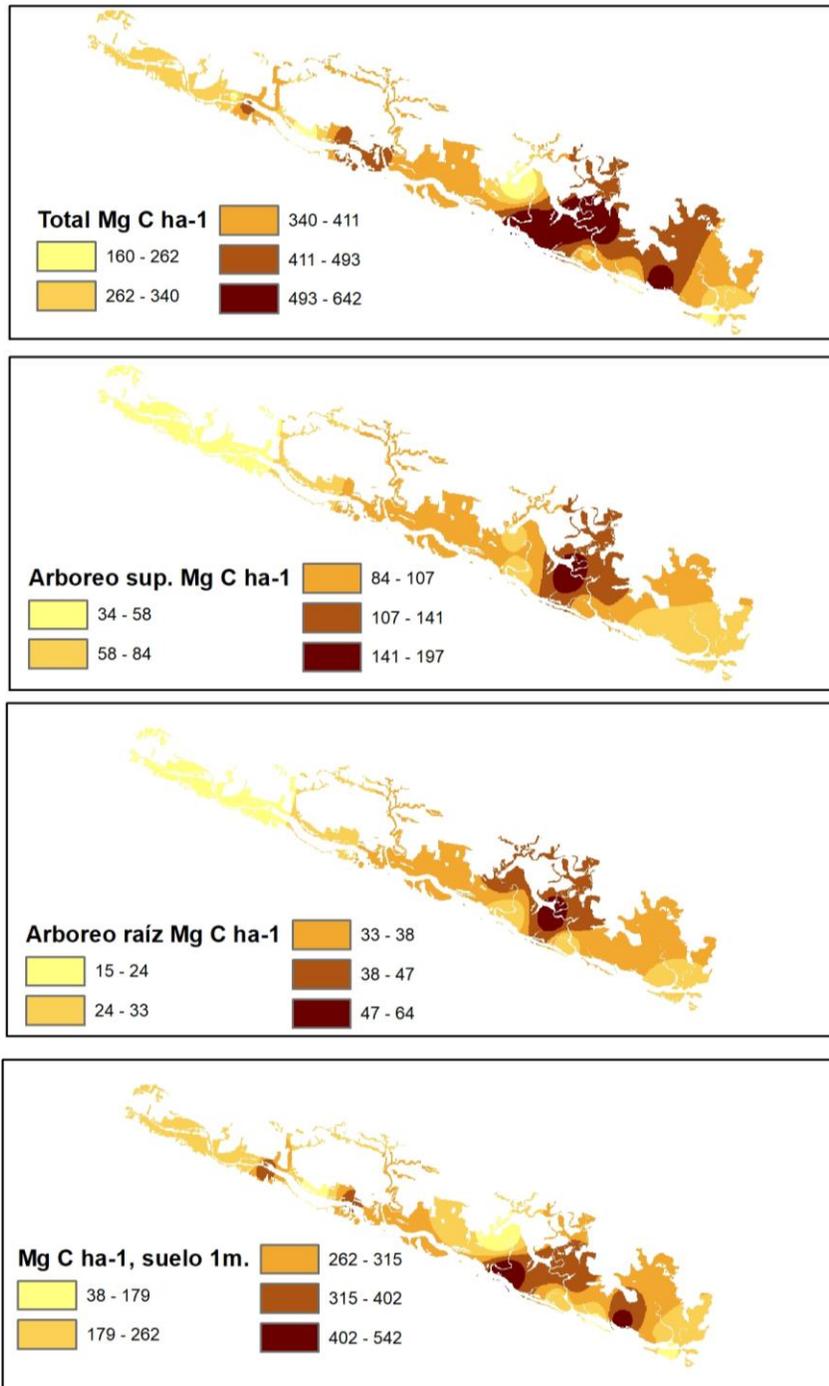


Figura 5. Distribución espacial de Mg C ha⁻¹ en total y por estrato en el ecosistema de manglar.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Error! Reference source not found. En relación con el comportamiento multitemporal del almacenamiento de carbono, considerando datos PPMF implementadas por INAB/CONAP/CECON en el año 2017, y con datos 2018, 2022 y 2023, se observó la dinámica acumulación y pérdida de C por parcela, pudiendo ser un indicativo de la tendencia en todo el ecosistema de manglar en el área de estudio. *Figura 6.*

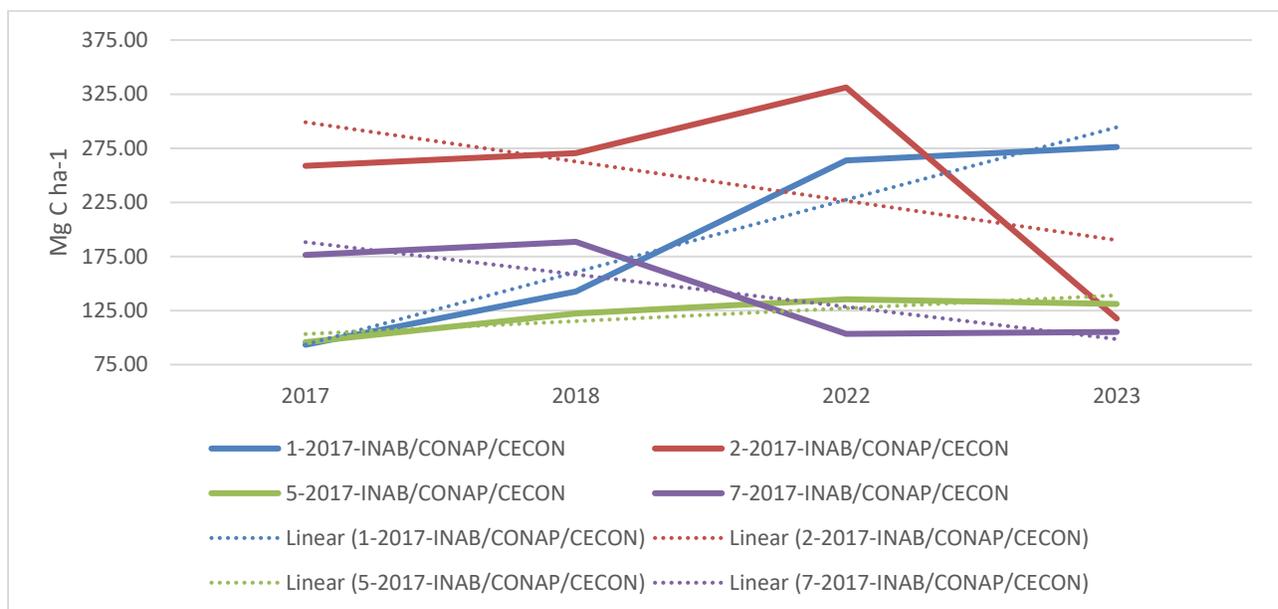


Figura 6. Comportamiento del C y tendencias por PPMF, 2017-2023.

En base al mapa y cobertura del suelo del año 2017, se estableció que la cobertura del mangle era de 1750.3 ha, y la cobertura para el 2023 fue de 1698.4 ha, teniendo una pérdida de 52 ha. La cobertura se calculó usando imágenes del sensor Planet, de 4 m de resolución espacial, consultados desde el geportal de INAB. (*Instituto Nacional de Bosques, 2023*). De los cambios de usos de mangle a otros usos, se estimó que las pérdidas de carbono fueron 19,087.04 Mg C en 52 ha, y en relación con emisiones de gases de efecto invernadero de 70,049.44 Mg CO₂-eq.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Establecer las reservas de carbono en los bosques de manglar utilizando imágenes de radar, y las masa establecidas a partir de datos de PPMF, se usaron 2 fuentes principales de datos, siendo estos: el Sensor Sentinel 1 con imágenes de 10 y 30 m de resolución espacial, en donde se generaron modelos de elevación digital (DEM), a los cuales se aplicaron las ecuaciones genéricas para estimación de biomasa, $B = 3.25 * (1.08 * DEM)^{-1.53}$, del resultado de biomasa se lo aplico la constante de 0.47, correspondiente a su fracción de carbono, establecida por IPCC y adoptado por INAB para Guatemala. Las estimaciones del carbono total en el ecosistema de manglar para los productos de Sentinel 1, fueron de 67658 Mg, (Figura 7).

En complemento para evaluar resultados usando otra metodología y distinto sensor, se aplicó la ecuación para estimar biomasa a partir de datos de decibeles (db) de las imágenes del sensor Alos Palsar 2, $0.5 * 10 * (40.2 * 10^{(RasterImage/10)})$, y aplicando el factor de conversión de 0.47 para estimar carbono en el ecosistema de manglar, se estimó las reservas de C en 68167 Mg, (Figura 7).



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*"La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable"*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

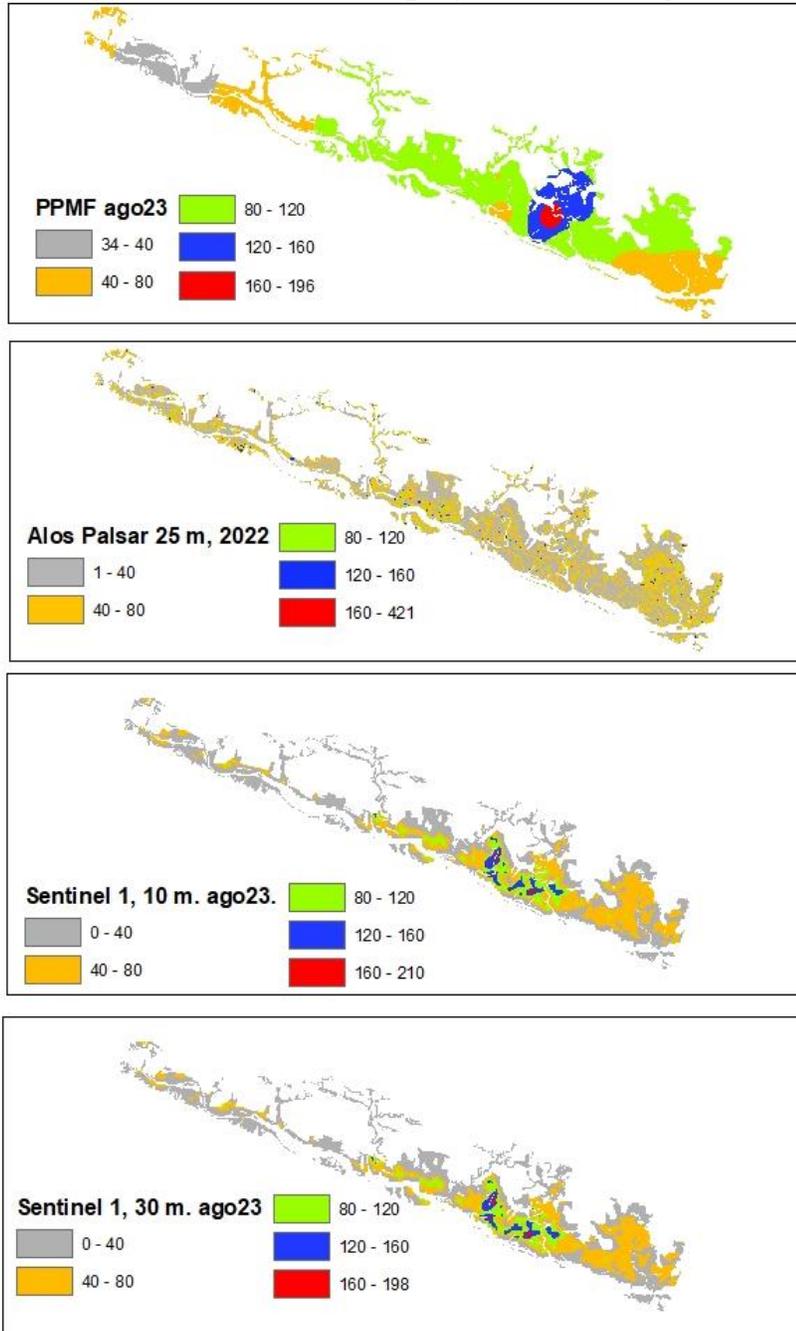


Figura 7. Comparación de reservas de carbono $Mg\ C\ ha^{-1}$, usando sensores remotos tipo radar.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Se realizaron los análisis estadísticos comparativo entre las metodologías para estimar carbono, usando sensores tipo radar, Sentinel 1 de 10 m de resolución espacial, Sentinel 1 de 30 m, y Alos Palsar 2 de 25 m, tomando de referencia el carbono estimado a través de las PPMF, evidenciado en la *Figura 8*.

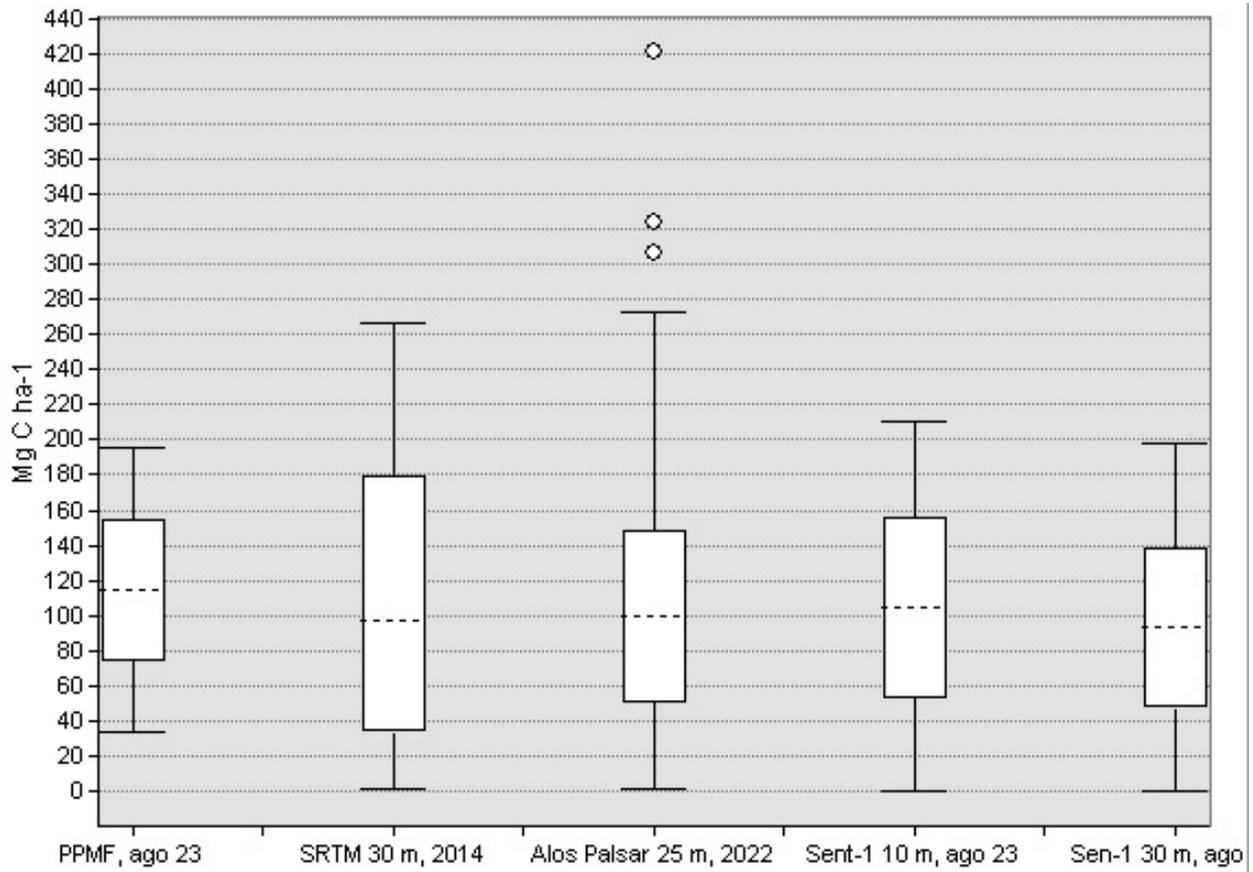


Figura 8. Comparación estadística entre metodológicas SAR, para usar estimar C, en bosques de manglar.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

10.2 Discusión de resultados

La metodología para establecer y monitorear Parcelas Permanentes de Medición Forestal en ecosistemas de manglar se implementó para homogenizar los procedimientos técnicos a nivel de país y que aportan en la investigación forestal de la dinámica para cuantificar biomasa, carbono, emisiones y absorciones de gases de efecto de invernadero. Los resultados contribuyen a la red de PPMF y fortalecer la base de datos que brinda información y conocimiento para la gestión de los ecosistemas.

A partir de los datos dasométricos tomados en campo, DAP, alturas de árboles, en las 4 especies encontradas en las parcelas, así como las alturas de raíces fulcreas en las especies de *Rhizophora sp.*, y a partir de estos datos, se aplicaron las ecuaciones alométricas específicas para cada especie, cuantificándose así la biomasa forestal en cada parcela de 500 m², considerándose 0.47 de fracción de C. Se realizó la especialización utilizando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), bajo el principio que los elementos cercanos entre sí son más parecidos que los que están más alejados, obteniéndose así valores mínimos en raíces de 16 a máximos 63 Mg C ha⁻¹, con un total de 56,689.40 Mg C en 1698 ha.

En la parte arbórea superior se cuantificaron valores entre 35 a 197 Mg C ha⁻¹, con una totalidad de 148229 Mg. Del total del área en el componente arbóreo, la parte radicular representa el 28 % y el resto corresponde al fuste, ramas y hojas. Las mayores concentraciones se observaron espacialmente en el área de Barra del Jote con valores para raíces entre 38 a 64 y arbóreo superior entre 107 a 197 Mg·C ha⁻¹. Por su parte las menores densidades por ha de acumulación de C, se presentaron en el noroeste, en las comunidades de Los Macizos y El Ahumado, con valores entre 15 a 24 Mg C·ha⁻¹ para raíces y entre 34 y 58 Mg C·ha⁻¹ en su parte superior.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Con respecto al componente suelo, se recopilaron muestras en 10 lugares a profundidades en centímetros de 0 a 15, 15 a 30, 30 a 50, 50 a 100, y donde fue posible mayor a 100 cm. En complemento, se tomaron los datos con las mismas profundidades de la investigación sobre carbono azul en la misma área, realizada por (García, Franco, Morales, & Paiz, 2021), esto con el fin de complementar la representatividad espacial. De los resultados de laboratorio, se obtuvo el % de Carbono Orgánico (CO), densidad aparente en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, y la profundidad en cm, calculando así el contenido en Mg de C por estrato.

A una profundidad de 100 cm, la acumulación en todo el ecosistema se estimó en 418284 Mg C en 1698 ha, siendo entre 0 a 15 cm 6735 Mg C, entre 15 a 30 cm 74579 Mg C, entre 30 a 50 102743 Mg C. Los primeros 50 cm de profundidad representan el 52 % del total de 100 cm.

Es importante resaltar que no se consideró profundidades mayores a 100 cm, debido a que no en todos los sitios fue posible obtener muestras, y en las pocas en las que se obtuvieron, las profundidades variaron entre 105 a no mayor de 130 cm.

El ecosistema de manglar desde Los Macizos hasta La Barrona, para el año 2023, almacena 623412 Mg C, de los cuales el suelo es el componente con mayor captura, 67 %, seguido por el arbóreo superior con 24 % y un 9 % en raíces.

Con respecto al comportamiento temporal del bosque de manglar, se consideraron los datos de cuatro parcelas establecidas por INAB/CONAP/CECON en el 2017, para analizar el comportamiento de la acumulación o pérdida de carbono en cada lugar. Dos de las cuatro PPMF mostraron una acumulación de C en 6 años, siendo para la 1-2017-INAB/CONAP/CECON 183 Mg C ha^{-1} , para la 5-2017-INAB-CONAP/CECON, un aumento de 35 Mg C $\cdot\text{ha}^{-1}$. Considerando las pérdidas en las restantes parcelas, la 2-2017-INAB/CONAP/CECON, mostro un aumento entre el año 2017 a 2022 de 72 Mg C, con una disminución drástica para el 2023 de 214 Mg C, esto debido a que hubo una pérdida de 15 de 20 árboles en dicha parcela. De forma similar, la parcela 7-2017-INAB/CONAP/CECON, se



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

reportaron pérdidas de 7 de 12 árboles entre el 2018 y el 2022, equivalente a 85 Mg C, con una estabilización para el año 2023.

Buscando alternativas indirectas de para estimar biomasa en bosques de manglar, se usaron los datos tipo radar de dos sensores de acceso libre, siendo Alos Palsar 2, en su versión de mosaico procesado hasta el año 2022, y Sentinel 1, descarga de datos a disponibilidad cada 6 días, con datos a procesar.

Los resultados con Alos Palsar 2, usando los datos convertidos en decibles, se obtuvieron valores de biomasa por ha, y para obtener $C \cdot ha^{-1}$, se aplicó el factor 0.47, obteniéndose valores entre 1 a 421 Mg C ha^{-1} , sumando cada píxel con su valor, se multiplico por 0.0625, que es el equivalente a su fracción de ha, dando un resultado de 68167 Mg C en todo el ecosistema de manglar, 80062 Mg menos que el calculado usando la metodología de PPMF.

A partir de datos Sentinel 1, con fecha cercana al trabajo de campo de la toma de datos en las PPMF, siendo agosto 2023, se generó un DEM 10 m de resolución para estimar la altura del dosel, y a partir de este estimo las reservas biomasa y carbono. A partir del DEM de 10 m, se comparó con el DEM de 30 m de resolución de descarga directa de la página Web de Copernicus, considerando además como elemento comparativo el DEM SRTM 2014 de 30 m. Los resultados demostraron que no hay diferencia en la estimación de la C entre 10 y 30 m de resolución de Sentinel 1, con datos mínimos de 0, máximos 210 y 198, medias 41.11 y 41.16, desviaciones estándar de 32.54 y 32.53, y C total en el componente arbóreo superior de 67658 y 676641 Mg, respectivamente.

De la misma forma, en comparación con los datos de PPMF y Sentinel 1, se obtuvo una diferencia entre de 80572 Mg para estimar C aéreo, datos que establecen que los actuales DEM a partir de la banda C, no es la óptima para establecer biomasa en ecosistemas de manglar.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

11 Conclusiones

La cuantificación de biomasa por medio de datos dasométricos en mangle, hasta la fecha, es la forma más exacta de medir la cantidad de carbono almacenado por árbol y especie dentro de una PPMF, así como ver el comportamiento de crecimiento en diámetro y altura por individuo, y por consiguiente la acumulación de carbono anual. No obstante, también permite cuantificar la pérdida de carbono por la no presencia o ausencia de individuos ya sea por tala, enfermedad o muerte.

Se considerando los ecosistemas de mangle en la zona La Lisas – La Barrona, como un sistema de acumulación de C en donde no hay degradación, evidenciado en una de las PPMF, en la que se cuantifico que de el 2017 al 2023, una tasa de acumulación anual de $30 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Las ecuaciones genéricas para la cuantificación de biomasa y carbono usando datos SAR de Sentinel 1 y su banda C, y los datos de retrodispersión de Alos Palsar 2 y su banda L, en el bosque de manglar de Las Lisas – La Barrona, no fueron suficientemente buenas para reemplazar el monitoreo de la masa forestal superior en comparación con las PPMF, ya que hubo diferencias de más de 80000 Mg C en todo el ecosistema estudiado para el año 2023. Al haber tanta diferencia, no se realizó el análisis multitemporal de acumulación por medio de metodología por datos de radar.

El componente suelo almacena el 67 % de los 623412 Mg C de reservas de carbono de ecosistema de manglar, con valores que van desde 39 a 542 $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$. De aquí la importancia de considerar a los bosques de manglar como sumideros de C, que contribuyen a la mitigación ante el cambio climático y por consiguiente lo imperante de establecer las medidas y acciones para la conservación, restauración y gestión integral del ecosistema Las Lisas – La Barrona.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

12 Recomendaciones

Si bien con las PPMF establecidas en el ecosistema Las Lisas – La Barrona ya suman 8, 4 establecidas y monitoreadas por INAB/CONAP/CECON del año 2017 a la fecha, y las 4 restantes establecidas por la presente investigación, es necesario la implementación de más parcelas de monitoreo para que la cuantificación de las variables de biomasa y carbono, tengan mayor representatividad espacial y datos más precisos. En este sentido es importante fortalecer las capacidades locales para un monitoreo anual en coordinación interinstitucional, para empoderar a las comunidades en la toma de datos y en gestión de los ecosistemas.

Si bien las metodologías aplicadas para estimar biomasa y carbono usando datos SAR y las ecuaciones genéricas no fueron suficientemente aceptables para reemplazar o reducir las cuantificaciones por PPMF, abre la oportunidad de estudiar y aplicar otras formas para obtener mejores modelos de elevación por medio técnicas de interferometría de radar o InSar, con lo que se esperaría tener datos de reserva de C aceptables y comparables con los de parcelas de monitoreo.

Para el año 2024 se han pospuesto dos misiones de lanzamiento de satélites SAR de acceso libre, una BIOMASS, con la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), con una banda L de 30 a 15 cm de longitud de onda, con capacidades de mapeo de vegetación y biomasa. La segunda misión NISAR, en asocio entre NASA y la Agencia Aeroespacial de India, conteniendo una banda P de 100 a 30 cm de longitud de onda, con aplicaciones de monitoreo de biomasa, mapeo y evaluación de la vegetación. Con estas misiones se espera contar con datos InSAR para el año 2025 y por consiguiente aplicar modelos más precisos para la cuantificación de masa forestal y carbono en los ecosistemas de manglar.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

13 Referencias

- Aceituno, M., Cifuentes, C. A., Cojom, J. I., & Bosarreyes, A. R. (2016). Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo del ecosistema manglar en el pacífico de Guatemala. Guatemala, Guatemala.
- Aronoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS mANAGERS* (Primera ed.). Readlands, California, USA: ESRI.
- Centro Interamericano de Administraciones Tributarias. (13 de Mayo de 2022). *Los precios del carbono en la Unión Europea alcanzan un récord tras la COP26*. Obtenido de <https://www.ciat.org/los-precios-del-carbono-en-la-union-europea-alcanzan-un-record-tras-la-cop26/>
- Cifuentes, M., Romero, T., Brenes, C. P., & Velasquez, S. (Enero de 2018). Manual Centroamericano para la medición de carbono azul en manglaes. 95. doi:10.13140/RG.2.2.27873.61282
- Consejo Nacional de Cambio Climático. (Julio de 2017). Líneas de Investigación en Cambio Climático. Guatemala, Guatemala. Obtenido de <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2018/01/Lineas-de-investigacio%CC%81n-en-Cambio-Climatico.pdf>
- Conservación Internacional [CI], COI-UNESCO, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN]. (2015). Carbono azul, Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., & et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Natural*, 387, 253–260. doi:10.1038/387253a0
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., . . . Van den Belt, M. (2015). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pages253–260. doi:10.1038/387253a0
- Cummings, D., Boone Kauffman, J., Perry, D., & Flint Hughes, R. (Junio de 2022). Aboveground biomass and structure of rainforests in the Southwestern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 16. doi:10.1016/S0378-1127(01)00587-4
- Dávila, V. (2019). Conectividad del Ecosistema Manglar para las Aves del Humedal Costero Las Lisas-La Barrona. Guatemala.
- Donato, D., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., & Kurnianto, S. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 6. doi:10.1038/ngeo1123
- European Space Agency. (Abril de 2022). *Sentinel Online*. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- European Space Agency. (Enero de 2023). *Coopernicus*. Obtenido de <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>
- Flores, A. I., Herndon, K., Thapa, R., & Cherrington, E. (Abril de 2019). The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. Huntsville, Estados Unidos. doi:10.25966/nr2c-s697
- Gálvez, G., Pacheco, G., & Ramírez, S. (2017). Valoración económica y cultural del ecosistema. 68.
- García, P. J., Franco, I., Morales, J. A., & Paiz, D. (2021). *Estimación de carbono azul del componente suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala*. Guatemala. Obtenido de <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puidi/INF-2021-60.pdf>
- Ghosh, S. M., Behera, M. D., & Paramanik, S. (Mayo de 2020). Canopy Height Estimation Using Sentinel Series Images through Machine Learning Models in a Mangrove Forest. *Remote Sensing*, 22. doi:10.3390/rs12091519
- Gunawardena, A., Nissanka, S., Dayawansa, N., & Fernando, T. (2016). Above Ground Biomass Estimation of Mangroves Located in Negombo - Muthurajawela Wetland in Sri Lanka using ALOS PALSAR Images. *Tropical Agricultural Research*, 10. doi:10.4038/tar.v27i2.8162
- Instituto Nacional de Bosques, Instituto de Cambio Climático, Conserjo Nacional de Áreas Protegidas. (2018). Metodología para el establecimiento y mantenimiento de Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF- en Bosque Natural del Ecosistema Manglar. *Metodología establecimiento PPMF*. Guatemala, Guatemala.
- Instituto de Cambio Climático [ICC]. (2021). Análisis SIG para la identificación del uso y actual del suelo en zonas ribereñas en costa pacífica de Guatemala. Escuintla, Escuintla, Guatemala.
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (Abril de 2022). *Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF-*. Obtenido de <https://mangomap.com/desarrollo-forestal/maps/103965/parcelas-permanentes-de-medicion-forestal-ppmf-?preview=true#>
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (Mayo de 2022). *Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF-*. Obtenido de <https://mangomap.com/desarrollo-forestal/maps/103965/parcelas-permanentes-de-medicion-forestal-ppmf-?preview=true#>
- Instituto Nacional de Bosques [INAB], & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2018). Sistematización de prácticas de restauración y lineamientos técnicos para el uso sostenible del ecosistema manglar .



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Instituto Nacional de Bosques. (Diciembre de 2023). *Mapa de Imágenes de Mosaico Planet*.
Obtenido de <https://sig.inab.gob.gt/portal/apps/webappviewer/index.html?id=c5be331eae734f6d8d6e5dc8008a67da>
- Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC] Working Group III. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Sixth Assessment Report*. Obtenido de https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf
- Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC]. (2022). *The Working Group III (WG III) contribution to the IPCC's Sixth Assessment Report*. Obtenido de https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf
- Japanes Aereo Space Agency. (Enero de 2023). *Global Palsar-2/Palsar/Jers-1*. Obtenido de https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/data/index.htm
- Mosaic and Forest / non Forest Map:
- Kauffman, B., & Cole, T. (2010). Micronesian Mangrove Forest Structure and Tree Responses to a Severe Typhoon. *Wetlands*, 8. doi:10.1007/s13157-010-0114-y
- KAUFFMAN, J., ADAME, M. F., ARIFANTI, V. B., SCHILE-BEERS, L., BERNARDINO, A., BHOMIA, R., & DONATO, D. (24 de Enero de 2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monograph*, 18. doi:doi.org/10.1002/ecm.1405
- Mcleod, E., Chmura, G., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C., . . . Silliman, B. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ*, 9. doi:10.1890/110004
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2013). *Ley Marco para la Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático y la Mitigación de Gases de Efecto de Invernadero*. 16. Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naurales [MARN]. (2013). *Informe técnico: Estudio de la cobertura del mangle en la Republica de Guatemala*. Guatemala.
- Naciones Unidas. (03 de 2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>
- NASA, UCLA, Carbon Silva. (Septiembre de 2023). *Global Mangrove Mapping including, mangrove Extent Height and Biomass*. Antigua Guatemala, Sacatepequez, Guatemala.
- Oficina de Control de Áreas de Reserva del Estado, MAGA. (1997). Decreto No. 126-97, *Ley Reguladora de las Áreas de Reservas Territoriales del Estado de Guatemala*. Guatemala, Guatemala.
- Otero, X.L., Méndez, A., Nóbrega, G.N. et al. (2017). High heterogeneity in soil composition and quality in different mangrove. *Environ Monit Assess*, 189, 511. doi:doi.org/10.1007/s10661-017-6228-4



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- PNUD. (2018). Propuesta de Iniciativa de Ley Área de Uso Múltiple Marino Costera Las Lisas. *Proyecto Conservación y Uso Sostenible de la Biodiversidad en Áreas Protegidas Marino-Costeras (APM). (MARN-CONAP/PNUD-GEF) – Asociación de Rescate y Conservación de Vida Silve*, 16.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2018). Plan de Manejo para el Área de Uso Múltiple Marino-Costera Las Lisas. *Proyecto Conservación y Uso Sostenible*, 156.
- Rodriguez, C. H. (2017). Existencias de carbono azul y la dinámica histórica de la cobertura del bosque manglar en el área conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica. 71. Turrialba, Costa Rica.
- Saenger, P., & Snedaker, S. (1993). Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall. *Oecologia*, 15. doi:10.1007/BF00317496
- Spalding, M., Kainuma, M., & Collins, L. (2011). *Atlas Mundial de los Manglares*. International Society for Mangrove Ecosystems and International Tropical Timber Organization.
- Tojin, E. L. (2022). *Generación de mapas del proyecto de investigación: Estimación de carbono azul del componente suelo en el ecosistema de manglar Las Lisas-La Barrona en el Pacífico de Guatemala*. Servicios de consultoría, Guatemala.
- United State Geological Service. (5 de Mayo de 2022). *InSAR—Satellite-based technique captures overall deformation*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/programs/VHP/insar-satellite-based-technique-captures-overall-deformation-picture>



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

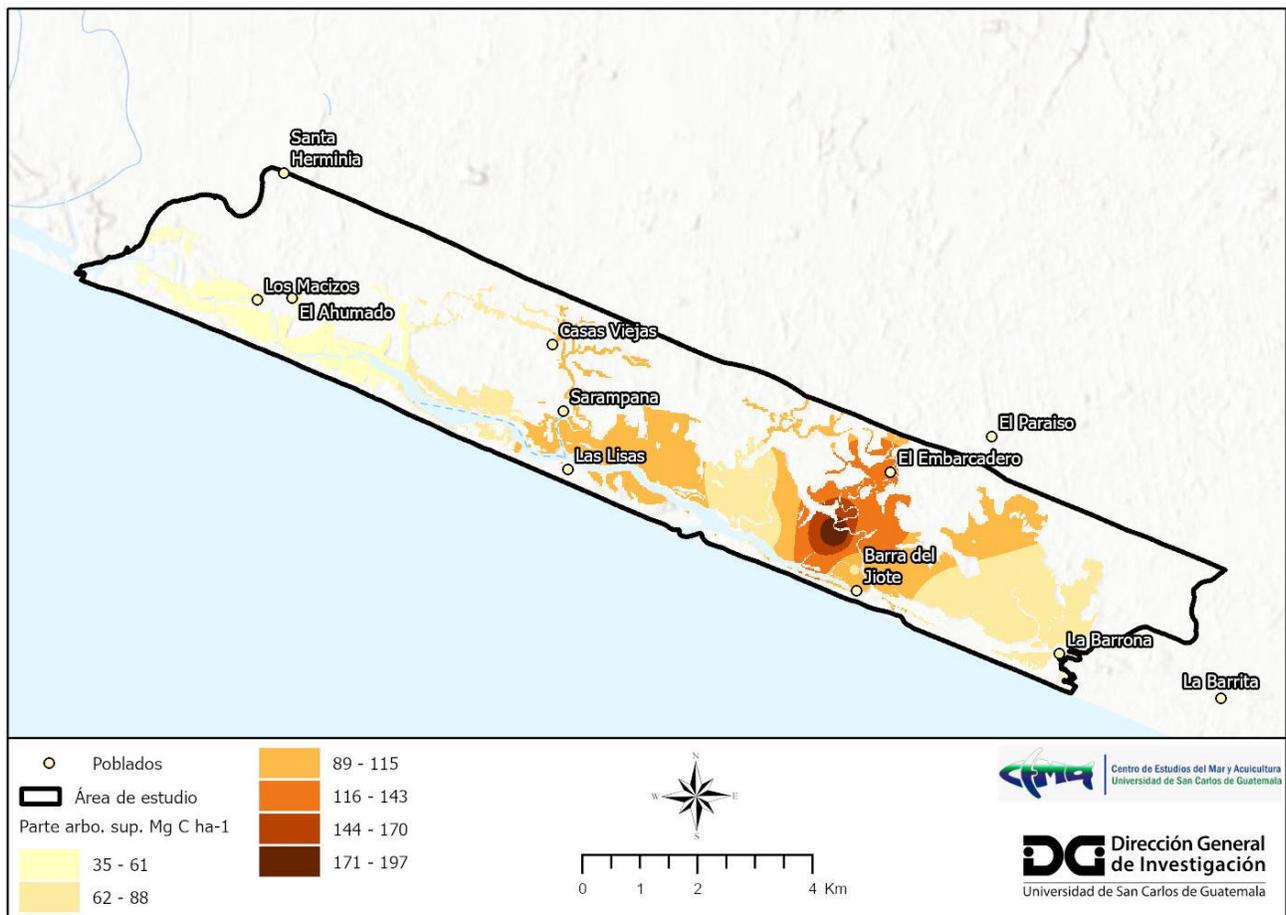
DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*"La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable"*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

14 Apéndices

Apéndice 1. Distribución espacial de $Mg\ C\ ha^{-1}$ en la parte arbórea superior del ecosistema de manglar.





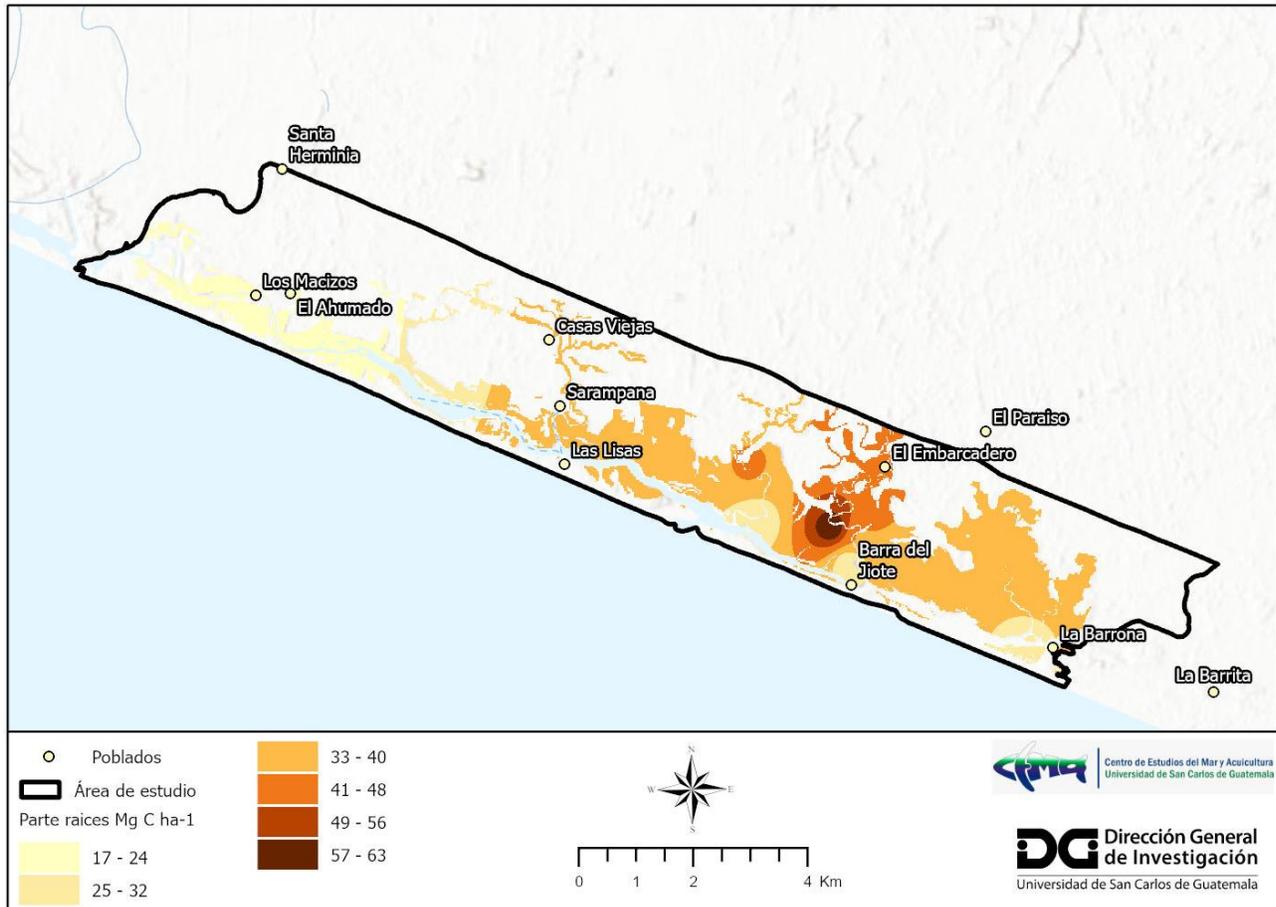
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*"La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable"*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

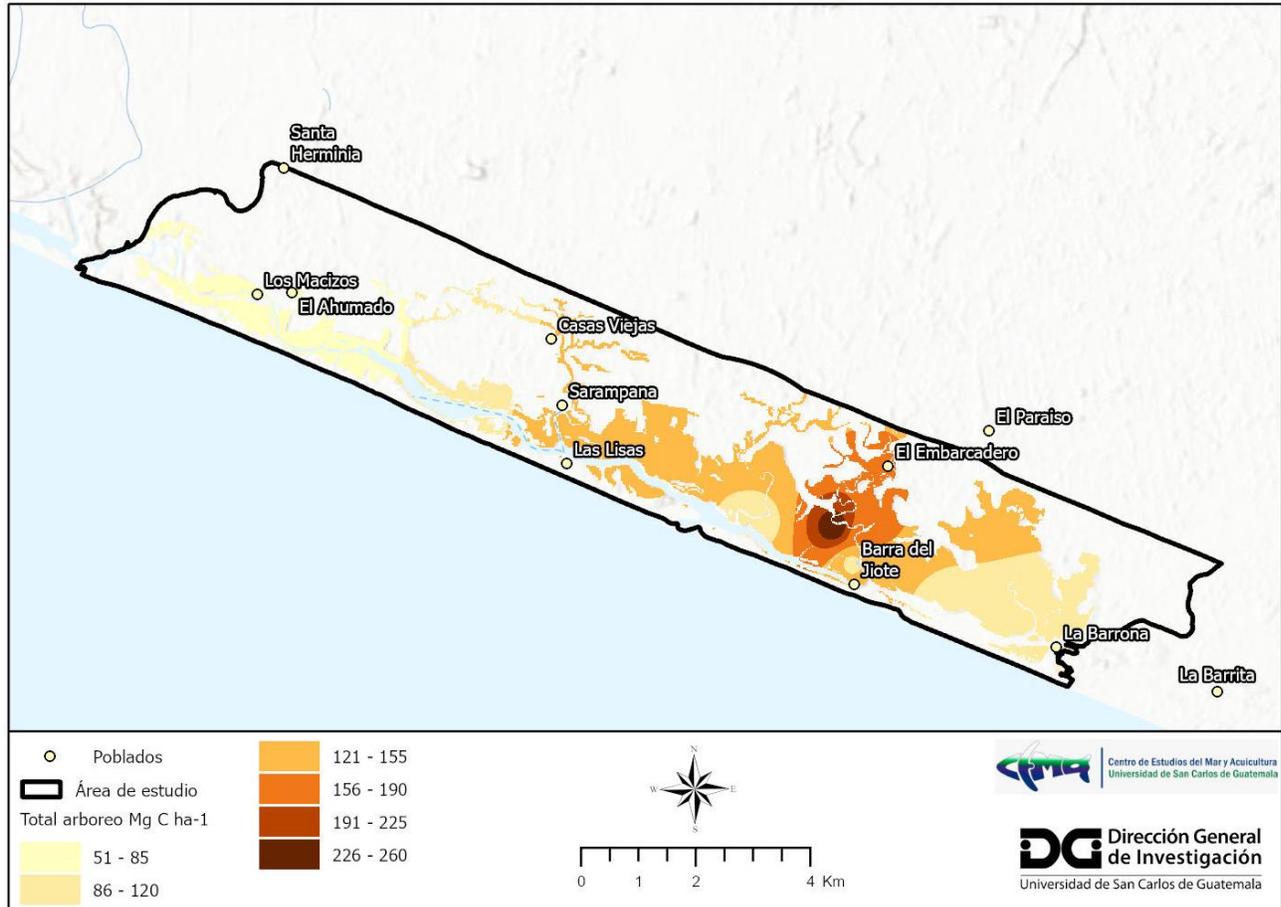
Apéndice 2. Distribución espacial de Mg C ha⁻¹ en la parte radicular del ecosistema de manglar.





Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Apéndice 3. Distribución espacial de Mg C ha⁻¹ en la parte arbórea total del ecosistema de manglar.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

15 Vinculación

La presente investigación contempla la vinculación con varios sectores gubernamentales a nivel institucional y local, además de la relación con proyectos de los que se puedan disponer de fondos para el manejo del área de estudio y alrededores desde un enfoque ecosistémico. En la parte gubernamental institucional, se considera como parte integral al INAB, como ente rector de los bosques en Guatemala, por tener ya presencia en el área como implementador y monitor de PPMF desde el año 2017, de donde se obtienen datos para fortalecer monitoreo de las reservas de carbono, factor que interviene en posibles cooperaciones a futuro.

El Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), por coordinar las iniciativas para convertir a Las Lisas – La Barrona, como un área protegida bajo la categoría de zona de usos múltiples, por lo cual el conocimiento de la situación del carbono azul coadyuvara como elemento de planificación.

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), como punto focal ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), para impulsar gestión de fondos a invertir en la gestión del área. A nivel local con las municipalidades de Chiquimulilla, Pasaco y Moyuta; en generar información científica y de sustento para dirigir los fondos de inversión municipal, inversión pública e integración en sus planes de ordenamiento territorial en el desarrollo sustentable del área y el manejo integrado de cuencas que se deben de considerar como desembocaduras de tipo estuarino. En relación con el sector académico con la Facultad de Agronomía de la USAC, como soporte en el análisis de las muestras de suelo para la estimación del carbono almacenado en este componente del bosque de manglar. A nivel comunitario los Consejos de Desarrollo (COCODE) de las comunidades desde Los Macizos - Las Lisas – La Barrona.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

16 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

La difusión y divulgación del proyecto de investigación, se hará aprovechando el espacio de radio de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través del mapa de consultas de las investigaciones que posee el CEMA en su página WEB, así como en sus redes sociales y otros medios a considerar. Se estarán brindando copias del informe a las instituciones gubernamental mencionadas en el inciso de “vinculación”, para que tengan el conocimiento y se propicien los acercamientos. A nivel comunitario con los COCODES de las Aldeas de Las Lisas y La Barrona y otras, para establecer la importancia de su manejo, bajo un enfoque de los beneficios de los servicios y bienes ecosistémicos.

Se estará presentando en congresos nacionales e internacionales vinculados a la investigación y monitoreo de carbono azul en la región mesoamericana y otros espacios geográficos pertinentes.

En complemento se presentarán los resultados de las PPMF en el geoportal de INAB, en donde se publica toda la red de PPMF, de forma anual y la dinámica del carbono azul.

17 Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).

Esta investigación generará información para dar sustento a la toma de decisiones y establecer medidas efectivas de conservación y restauración de este ecosistema que es estratégico para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en las zonas marino-costeras, contribuyendo al Objetivo 14 de los ODS, relacionado a conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible y aumentar los conocimientos científicos, así como desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina. (Naciones Unidas, 2022).

En complemento aporta a las PND, en la valoración económica y gestión de los recursos naturales, la disponibilidad y acceso al agua, siendo:



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

*“La Usac investiga para el
bienestar de las personas
y el desarrollo sustentable”*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Meta 14.2: gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos nocivos importantes, mediante el fortalecimiento de su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la probidad de los océanos.
- 14.a.1: Porcentaje del presupuesto total de investigación asignada a la investigación en el campo de la tecnología marina.
- 14.2.1: Número de países que aplican enfoques basados en los ecosistemas para gestionar las zonas marinas.
- Meta 14.5 Conservar por lo menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible.