

*“Servicios de Consultoría para la determinación de los almacenes de carbono en Manglares y Pastos marinos como mitigación al cambio climático y protección de sumideros de Carbono Azul en Yum Balam: Fase de Análisis”.*

# **INFORME TÉCNICO FINAL: ALMACENES DE CARBONO EN MANGLAR Y PASTOS MARINOS DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA RESERVA DE YUM BALAM**

Agosto 2018



**Coordinadores del Proyecto:** Dr. Jorge A. Herrera Silveira, Juan E. Mendoza-Martínez, Oscar Pérez-Martínez, Minerva Rosette Perezvargas.

**Participantes:** Sergio Solís Gamboa, Ángel García Trasviña, Eunice Pech, Juan Caamal Sosa, Alejandra Nieto Ortega, Eduardo Pacheco Cetina, Francisco Javier Cab Ku, José Anteale Marcial.

**Como citar documento:**

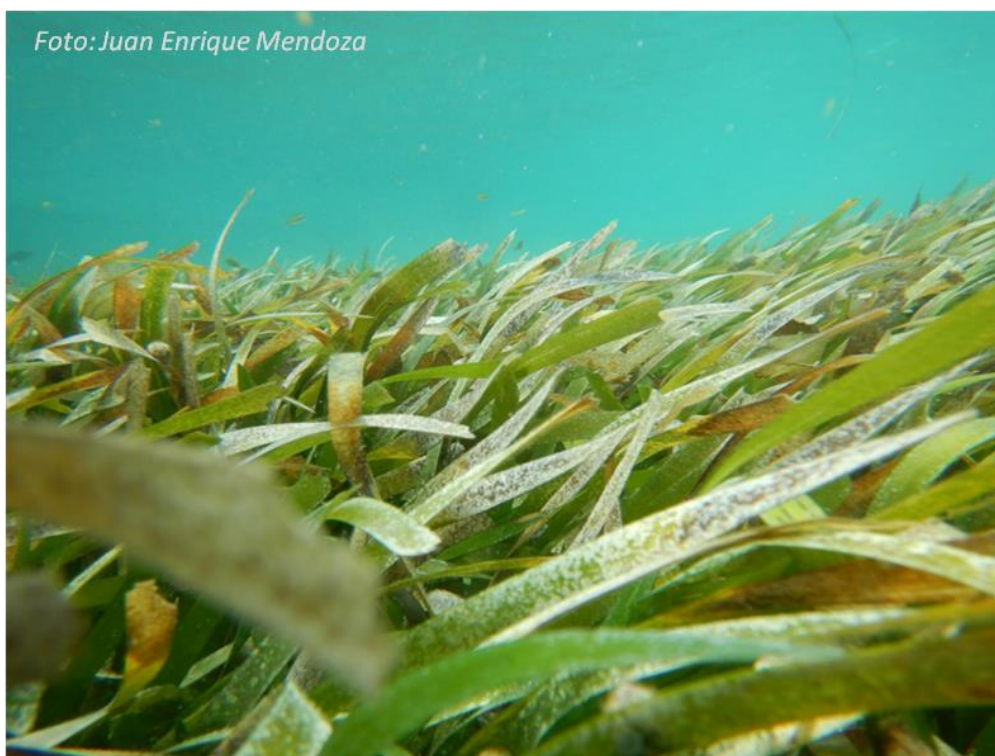
Jorge A. Herrera Silveira, Juan E. Mendoza-Martínez, Oscar Pérez-Martínez, Sergio Solís Gamboa, Ángel García Trasviña, Eunice Pech, Juan Caamal, Minerva Rosette. 2018. ALMACENES DE CARBONO EN MANGLAR Y PASTOS MARINOS DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA RESERVA DE YUM BALAM. Informe Técnico Final. PMC-CINVESTAV-CEMDA.

*Evaluación de las reservas de carbono azul en ecosistemas de Manglar y pastos marinos del Área de Protección de Flora y Fauna de la Reserva de Yum Balam*

El presente informe fue elaborado por Jorge A. Herrera Silveira, Juan E. Mendoza-Martínez, Oscar Pérez-Martínez, Sergio Solís Gamboa, Ángel García Trasviña, Eunice Pech, Juan Caamal, Minerva Rosette como parte del Proyecto “Mitigación al cambio climático y protección de sumideros de Carbono Azul en Yum Balam: Fase de Análisis” implementado de junio de julio de 2017 a agosto de 2018 con el apoyo de MarFund, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C., la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y socios locales.



*Foto: Andrea Camacho Rico*



*Foto: Juan Enrique Mendoza*

**Ecosistemas de Carbono Azul: Manglar y Pastos Marinos**

## Índice de Contenido

I.	INTRODUCCIÓN .....	7
II.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA (APFF) RESERVA DE YUM BALAM .....	8
III.	RELEVANCIA DE LOS HUMEDALES DEL APFF YUM BALAM .....	8
IV.	CAUSAS DE DEGRADACIÓN O AMENAZAS A SU CONSERVACIÓN.....	9
V.	METODOLOGÍA.....	11
I.1.	Diseño de unidades de muestreo general .....	11
I.2.	Zonificación para la obtención datos y muestras en zonas de Manglar .....	11
I.3.	Zonificación para la obtención de datos y muestras de Pastos Marinos .....	12
II.	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS CUBIERTAS POR MANGLARES Y PASTOS MARINOS .....	14
II.1.	Zonas cubiertas por Manglares.....	14
II.2.	Zonas cubiertas por Pastos Marinos .....	14
II.3.	Análisis de la cobertura de vegetación dominada por Manglares.....	14
II.4.	Análisis de la cobertura de fondos dominados por Pastos Marinos.....	15
II.5.	Procesamiento de imágenes para Manglares y Pastos Marinos .....	16
III.	TRABAJO DE CAMPO .....	18
III.1.	Zonas dominadas por Manglares .....	18
<i>Salinidad intersticial</i> .....	18	
<i>Biomasa arboles vivos</i> .....	19	
<i>Flujo vertical de carbono (caída de hojarasca)</i> .....	19	
<i>Sedimentos</i> .....	19	
<i>Determinación del hidroperiodo</i> .....	20	
III.2.	Zonas dominadas por Pastos Marinos .....	21
IV.	TRABAJO DE LABORATORIO Y GABINETE .....	22
IV.1.	Almacén de carbono aéreo en Manglares .....	22
<i>Árboles vivos</i> .....	22	
<i>Criterios para la selección de las ecuaciones alométricas</i> .....	22	
IV.2.	Almacén de carbono aéreo en Pastos Marinos .....	23
IV.3.	Almacén de carbono subterráneo en manglares y pastos marinos.....	24
V.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	26
V.1.	Criterios de agrupación para el análisis de los almacenes de carbono y cálculo de las reservas totales de carbono en Manglares y Pastos Marinos .....	26

VI.	RESULTADOS EN ECOSISTEMAS DE MANGLARES .....	28
VI.1.	Parámetros fisicoquímicos del agua intersticial en manglares del Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam. ....	28
	<i>Salinidad y temperatura intersticial</i> .....	28
	<i>Potencial redox (Eh) y Potencial de hidrógeno (pH) intersticial.</i> ....	29
VI.2.	Caracterización de las zonas de manglar en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam .....	29
	<i>Distribución espacial de los Manglares de la reserva de Yum Balam</i> .....	29
VI.3.	Carbono Azul de los manglares en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam	33
VI.4.	Vulnerabilidad espacial de los almacenes de carbono asociado a zonas de Manglar en la Reserva de Yum Balam .....	35
VI.5.	<i>Flujo vertical de captura de carbono por caída de hojarasca</i> .....	36
VI.6.	<i>Comportamiento del Hidroperiodo en zonas de manglar del APFFYB</i> .....	38
VII.	RESULTADOS EN ZONAS DOMINADAS POR PASTOS MARINOS .....	39
VII.1.	Parámetros fisicoquímicos de la columna de agua en el Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam. ....	39
VII.2.	Distribución espacial de praderas de Pastos Marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam .....	40
VII.3.	Carbono Azul de Pastos Marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam	42
VII.4.	Vulnerabilidad espacial de los almacenes de carbono asociado a zonas de pasto marinos en la Reserva de Yum Balam .....	44
VIII.	CONSIDERACIONES FINALES.....	46
IX.	REFERENCIAS.....	48

## Índice de Figuras

Figura 1.	Mapa de Vegetación y Uso de Suelo de la APFFYB. Fuente CONABIO, 2013.....	9
Figura 2.	Cambios de cobertura en los tipos de vegetación dominantes en la APFFYB. Fuente: CONABIO, 2009. ....	10
Figura 3.	Mapa de los sitios de muestreo y estaciones para el levantamiento de datos y muestras para la estimación de carbono en Manglares de Yum Balam. Transectos en a) Isla Chica, b) Interna este, c) y d) Interna sur. Autor: Mendoza-Martínez J.E.....	12
Figura 4.	Mapa de los sitios de muestreo y estaciones para la caracterización de fondos marinos para la estimación de carbono en pastos marinos. Autor: Mendoza-Martínez J.E. ....	13
Figura 5.	Zona de pastos marinos (a), medición de la cobertura de pastos marinos (b), caracterización (c), diagrama del transecto para medir la cobertura y caracterización de pastos marinos (d). ....	14
Figura 6.	Delimitación de los transectos de muestreo (a), medición del diámetro a la altura del pecho y medición de variables fisicoquímicas(b).....	18

Figura 7. Colocación de canastas para la recolección de hojarasca como medida de captura de carbono foliar.....	19
Figura 8. Nucleador metálico de 1m de largo con extensión a 2 m (a); extracción de muestras de sedimento (b); corte de cada sección y embolsado de la muestra (c) en la APFFYB.....	20
Figura 9. Instalación del tubo de PVC que sirve como soporte del sensor de nivel de agua.....	20
Figura 10. Obtención de la muestra de biomasa (a), registro de variables ambientales (b), extracción de la muestra de sedimento (c), núcleo de sedimento (d), preservación de la muestra (e), f) Instrumentos de campo para la toma de variables ambientales. F) equipo scuba de Buceo.....	21
Figura 11. Medición de variables morfométricas. a) Acomodo de las hojas para su medición; b) Medición del largo; c) y d) Separación de la muestra para contabilizar número de haces y número de hojas, Pesado de muestras e), Determinación de altura del dosel para f) <i>S. filiforme</i> <i>T. testudinum</i> .....	24
Figura 12. Muestras de biomasa de pastos marinos (a), mantillo (b), núcleo de sedimento (c), registro de peso seco de biomasa pastos marinos y mantillo (d), registro de peso seco para muestras de sedimento (e), autoanalizador elemental (f). .....	25
Figura 13. Zonas ambientalmente distintas definidas como criterios de agrupación en la APFFYB.....	26
Figura 14. Promedios de salinidad (A) y temperatura (B) del agua intersticial en zonas de manglar del APFF Yum Balam. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC).....	28
Figura 15. Promedios de potencial redox (A) y potencial de hidrógeno (B) del agua intersticial en zonas de manglar del APFF Yum Balam. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC).....	29
Figura 16. Distribución de manglar en el Área de Protección de Flora y Fauna Reserva de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E .....	31
Figura 17. Índice de valor de importancia por especie de manglar en las distintas zonas del APFFYB. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC). .....	32
Figura 18. Almacenes carbono en manglares de la APFFYB de acuerdo con las zonas geográficas. ....	33
Figura 19. Reservas de Carbono Azul ecosistémico almacenado en las zonas dominadas por manglares de la APFFYB. ....	35
Figura 20. Evaluación espacial de la condición de manglares (Cobertura %) con la presencia de centros urbanos (Distancia m). Manglares con mala condición en la parte continental cercanos a Chiquilá, (a) y (b); manglar perturbado cercano a Holbox (c). Autor: Mendoza-Martínez J.E. 36	
Figura 21. Caída de hojarasca (A) y flujo de carbono total (B) en tres distintos sitios de manglar en dos zonas diferentes del APFF Yum Balam. Autor: Oscar Pérez. ....	37
Figura 22. Comportamiento de los niveles de inundación en dos condiciones de manglares de APFFYB, conservado (arriba) y degradado (abajo). Autor: Oscar Pérez. ....	38
Figura 23. Distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna y zona marina del Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam. ....	39
Figura 24. Distribución de pastos marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E .....	40
Figura 25. Paisajes submarinos dominantes de las zonas de Boca (B01 y I01) y zona interna (I05) en la APFFYB. ....	41
Figura 26. Variación espacial de los almacenes de carbono vivo (aéreo/raíces), y sedimentos de pastos marinos del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam.....	42

Figura 27. Distribución espacial del Carbono Total/Carbono Ecosistémico asociado a zonas de pastos marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna Reserva de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E..... 44

Figura 28. Evaluación espacial de la condición de pastos marinos (Cobertura %) con la presencia de centros urbanos (Distancia m). Autor: Mendoza-Martínez J.E. .... 45

Figura 29. Zonas vulnerables de pastos marinos por cambios en la transparencia en la columna de agua. Autor: Mendoza-Martínez J.E..... 45

## Índice de Tablas

Tabla 1. Sitios de muestreo para la evaluación de los almacenes de carbono del manglar, área de la reserva involucrada, número de zonas por región de influencia hidrológica y número de transectos/parcelas..... 11

Tabla 2. Sitios de muestreo para la evaluación de los almacenes de carbono de pastos marinos, área de la porción marina, número de estaciones para caracterizar el fondo y para evaluar el carbono de este componente de Carbono Azul de Yum Balam. .... 13

Tabla 3. Grupos y clases seleccionadas para la elaboración de los mapas de Manglar..... 15

Tabla 4. Grupos y clases escogidas para la elaboración del mapa de Pastos Marinos. Se presenta la cobertura promedio en % y su desviación estándar (sdt)..... 16

Tabla 5. Selección de imágenes de satélite y bandas utilizadas para Manglares y Pastos Marinos. .... 16

Tabla 6. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en Manglares; b = biomasa (kg), d = diámetro a la altura del pecho (cm),  $D_{30}$  = diámetro del tronco a 30 cm del suelo (cm), Vol = volumen de la copa ( $\text{cm}^3$ )..... 23

Tabla 7. Distribución de las coberturas de diferentes zonas de manglar en el APFFYB. .... 30

Tabla 8. Características (promedio  $\pm$  DE) de la estructura de los manglares de APFF Yum Balam y el índice de valor de importancia (IVI) de las especies de cada zona..... 32

Tabla 9. Características morfométricas de las praderas de pastos marinos del APFFYB. Tt *Thalassia testudinum*; Sf *Syringodium filiforme*; Hw *Halodule wrightii*. Área foliar calculada del largo por ancho de cada hoja..... 41

Tabla 10. Resumen de los almacenes de carbono orgánico por ecosistema ( $\text{MgC ha}^{-1}$ ) y total (Mg C), así como las reservas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  con las que contribuye al APFF de Yum Balam a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. ....45

## I. INTRODUCCIÓN

La importancia de los ecosistemas de Manglar, Pastos marinos y Marismas (ecosistemas de Carbono Azul) en la mitigación de los efectos del cambio climático se ha incrementado en los últimos años. Esta creciente relevancia se relaciona con su contribución en la captura y almacén de dióxido de carbono y conversión en carbono orgánico en forma de biomasa (aérea y subterránea) y en sedimentos, donde este carbono se mantiene secuestrado incluso por milenios. De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en su Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en 2010 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) fueron alrededor de 748,252.2 Gg CO<sub>2</sub>eq., de las cuales el 65.9% fueron debidas al CO<sub>2</sub>, y de entre las actividades el autotransporte contribuyó con el 22.2%, mientras actividades relacionadas con la agricultura, ganadería y cambio de usos del suelo aportaron el 18.6%. Estos niveles históricos de CO<sub>2</sub> atmosférico ha convertido a ecosistemas como Manglares y Pastos marinos en importantes sumideros de carbono que por sus características ambientales secuestran tres veces más carbono por unidad de área que los ecosistemas terrestres (Pendleton et al., 2012; Howard et al., 2014).

México cuenta con áreas importantes de ecosistemas de Carbono Azul. La superficie de manglar es de 755,555 ha, colocando a México en el 4º lugar mundial (Giri et al., 2011; Valderrama-Landeros et al., 2017). En el caso de pastos marinos el único reporte con carácter oficial que ofrece una estimación de su cobertura es de la Comisión de Cooperación Ambiental (CCA, 2016), el cual reporta 919,300 ha cartografiadas, sin embargo, es probable que su extensión sea mayor. En contraste, los ecosistemas de humedales costeros de México, en particular los pastos marinos, los manglares y las marismas (estas últimas con muy baja superficie) prácticamente no han recibido atención con respecto al papel que juegan en los almacenes, captura y emisiones de GEIs. Los resultados de investigaciones alrededor del mundo sugieren que además de proveer hábitats para especies pesqueras, favorecer alta biodiversidad, protección a tormentas y otros servicios ambientales, también desempeñan un papel clave en la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático global a través de su capacidad para almacenar y capturar carbono de la atmósfera (McCleod et al., 2011).

El presente informe presenta la evaluación sobre las reservas de carbono almacenadas en los manglares y pastos marinos que se encuentran en el polígono del Área de Protección de Flora y Fauna Reserva de Yum Balam (APFFYB).



## II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA YUM BALAM

El Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam (APFFYB) se localiza en el estado de Quintana Roo, entre 21° 32' latitud Norte y 87° 01' longitud Oeste y 21° 6' latitud Norte y 87° 53' longitud Oeste. Comprende una superficie de 154,052 hectáreas por decreto en 1994 de las cuales aproximadamente 6,655 ha corresponden a ecosistemas de Manglar y reportes no publicados sobre extensión de pastos marinos de 17,287 ha. La porción marina de la reserva (Zona Marina y Laguna Yalahau) representan el 65.5% del área total de la reserva.

El paisaje lo dominan ecotonos y ecosistemas con una gran biodiversidad neotropical, que contienen especies endémicas, amenazadas y en peligro de extinción; en donde se encuentran selvas tropicales medianas, bajas y bajas inundables; bosques de manglar chaparro o mangle rojo (Fig. 1); esteros; grandes zonas inundables; lagunas como la de Conil y Chaak Mo Chuc; mares someros que la limitan al norte y al este, así como zonas de selva que tienen una influencia importante en los ecosistemas estuarinos del área natural protegida "Ría Lagartos", y que representan el hábitat de especies de flora y fauna algunas de ellas con categoría de riesgo dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Para el año 2003 esta área fue incluida dentro de la lista de humedales de importancia internacional para la Convención de los Humedales, firmada en Ramsar, Irán, en 1971 (RAMSAR) criterio adicional que contribuye a consolidar la idea de que el Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam está imbuida de una relevancia ecológica.

## III. RELEVANCIA DE LOS HUMEDALES DEL APFF YUM BALAM

Las características estructurales y funcionales de los ecosistemas controlan las poblaciones y comunidades y modulan el funcionamiento de estas. En este sentido, los humedales de Yum Balam proveen diversos servicios ambientales (Vázquez-Lule *et al.* 2009; INEGI, 1997), en su mayoría asociados con el flujo y almacén de carbono, entre los que se encuentran:

- Son zonas de crianza, alimentación y refugio de especies con relevancia comercial y de gran importancia biológica, como poblaciones de aves acuáticas migratorias. Además, representan un hábitat crítico de especies en peligro de extinción (tortugas y manatí).
- Son zonas receptoras de nutrimentos y contaminantes, además de que actúan como filtro natural de aguas residuales.
- Económicamente la región tiene gran relevancia en la pesquería local y de la Sonda de Campeche.
- Son ecosistemas que controlan la erosión y estabilizan la línea de costa, regulan inundaciones y modulan el impacto de eventos meteorológicos.
- La presencia de ecosistemas como manglares y pastos marinos representa importantes sumideros de carbono (C).

- Representa una fuente de alimentos para los pobladores locales.
- Los ecosistemas de pastos marinos que se encuentra en la laguna intervienen en la captura, estabilización y formación de sedimentos, evitando la erosión costera.

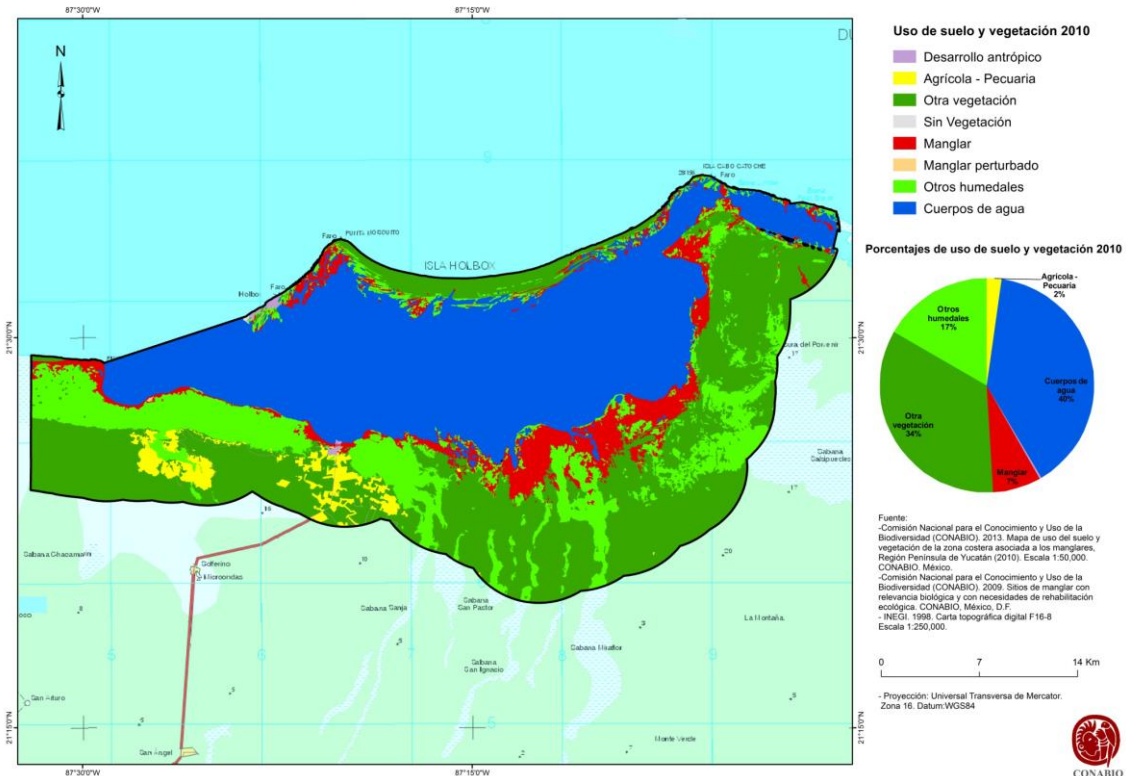


Figura 1. Mapa de Vegetación y Uso de Suelo de la APFFYB. Fuente CONABIO, 2013

#### IV. CAUSAS DE DEGRADACIÓN O AMENAZAS A SU CONSERVACIÓN

Los impactos directos identificados sobre los ecosistemas de carbono azul en la Reserva de Yum Balam son: la deforestación (tala de manglar), transformación del uso del suelo para actividades alternativas (Fig. 2), aumento en la tasa de sedimentación y alteraciones directas sobre la flora y la fauna de la región, así como aumento de la actividad turística. Otros impactos que tienen efectos de manera indirecta son cambios en los patrones hidrológicos, construcción de infraestructura carretera, contaminación de los cuerpos de agua, aguas residuales y desechos municipales; el crecimiento de los asentamientos humanos no planificados, etc. (Vázquez-Lule *et al.*, 2009).

Una de las principales amenazas identificadas para estos ecosistemas son las actividades de turismo que se realizan sobre la zona. Estas actividades se han incrementado en los últimos años, lo cual se traduce en crecimiento de la infraestructura turística y de sus

servicios asociados, con las consecuencias bien conocidas de deterioro generalizado del ambiente, poniendo en riesgo la sostenibilidad de esta actividad.

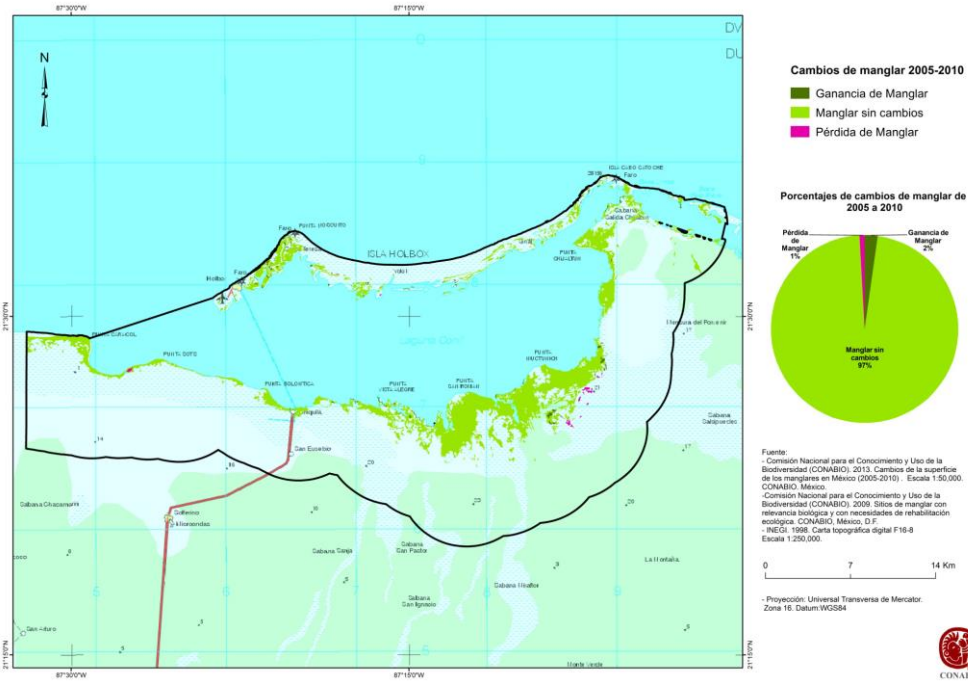


Figura 2. Cambios de cobertura en los tipos de vegetación dominantes en la APFFYB. Fuente: CONABIO, 2009.

## V. METODOLOGÍA

### I.1. Diseño de unidades de muestreo general

La selección de las parcelas de muestreo obedeció a un diseño espacialmente estratificado obtenido a partir de un muestreo no probabilístico utilizando como criterio de selección la distribución reportada e histórica de manglares y pastos marinos en la reserva. El análisis no supervisado de la cobertura de manglares y del fondo marino asociado a pastos marinos se realizó a partir de imágenes Sentinel2A con resolución de 10 metros. Se tomó como referencia el comportamiento espectral de cada pixel en las bandas del espectro visible que han demostrado tener mayor capacidad de penetración de la columna de agua (Bandas 1, 2 y 3) usando un algoritmo de agrupación k-medias, mientras que para los manglares adicionalmente se utilizó la región del infrarrojo cercano para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y adicionarlo como una banda más. Esta estrategia ha sido utilizada en otros estudios similares alrededor del mundo para facilitar la selección de sitios de muestreo, los cuales deben reflejar la variabilidad de cada localidad (Kovacset *al.*, 2005; Ruiz-Luna *et al.*, 2010; Alsaaidhet *al.*, 2013). La metodología del análisis de imágenes se detalla en el apartado correspondiente.

### I.2. Zonificación para la obtención datos y muestras en zonas de Manglar

El diseño de las unidades de muestreo se basó en las recomendaciones del Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares (Kauffman *et al.*, 2014). Se establecieron dos grandes regiones (marina e insular continental) donde se definieron las zonas de muestreo de acuerdo con la distribución geográfica de los manglares al interior de las zonas de interés. Para esta zonificación no se usaron variables específicas, sino el conocimiento empírico de los pobladores (zona de Isla Chica y de Isla Grande), así como la influencia hidrológica que es determinante en la heterogeneidad del paisaje (influencia de agua marina para la zona de la boca, y de aportes de agua dulce para las zonas interna sur e interna este), (Tabla 1).

Tabla 1. Sitios de muestreo para la evaluación de los almacenes de carbono del manglar, área de la reserva involucrada, número de zonas por región de influencia hidrológica y número de transectos/parcelas.

Influencia Hidrológica	Área (ha)	Número de zonas por sitio (Nombres).	Número de transectos/parcelas
<b>Marina</b>	11,227	2: (Isla Chica e Isla Grande)	19
<b>Insular Continental</b>	39,324.5	3: (Boca, Interna sur, Interna este)	45

Para el caso de zonas dominadas por Manglar se utilizó la información de 64 puntos de muestreo en 5 zonas geográficas (Fig. 3), las cuales reflejan en gran medida las respuestas en cobertura observadas en cada sitio.

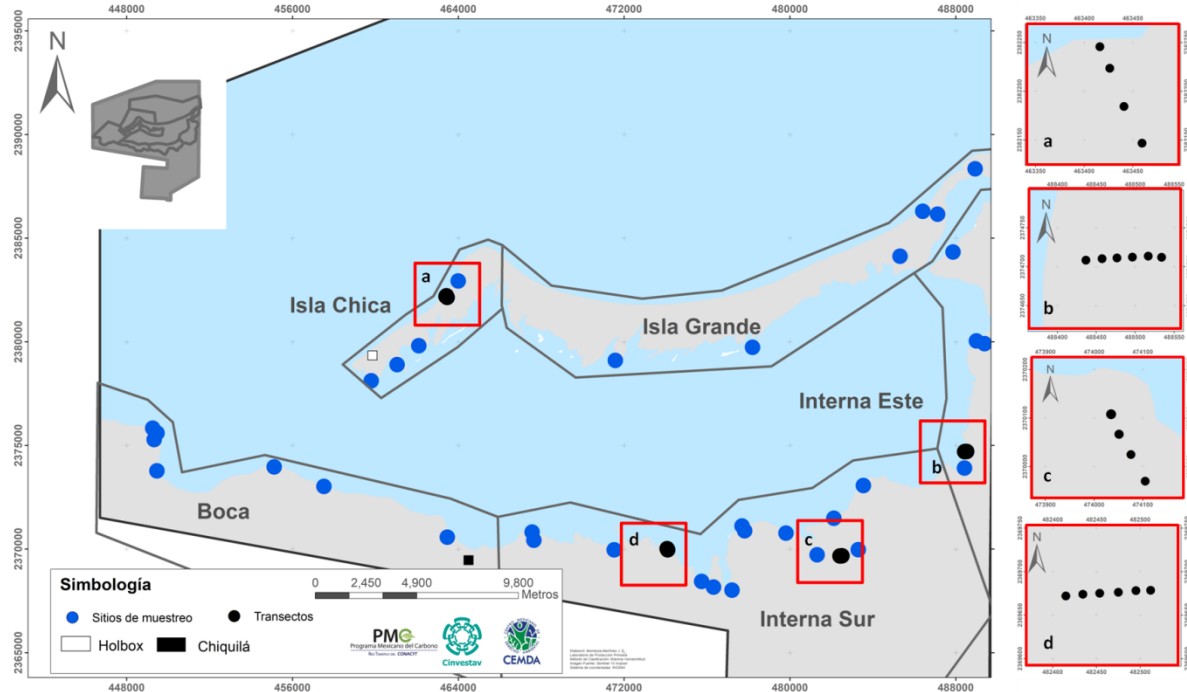


Figura 3. Mapa de los sitios de muestreo y estaciones para el levantamiento de datos y muestras para la estimación de carbono en Manglares de Yum Balam. Transectos en a) Isla Chica, b) Interna este, c) y d) Interna sur. Autor: Mendoza-Martínez J.E.

Isla Grande se ubica en la parte norte de la laguna Conil (Yum Balam) con influencia mayor de agua salada o hiperhalina por ubicarse en la porción interna de la laguna. Isla Chica, ubicada al poniente de la isla de barrera está influenciada por características marinas y es un área de transición entre la laguna Conil con el mar. La zona de la Boca se ubica en el macizo continental donde se presenta el intercambio de agua dulce con agua salada del mar. Las zonas Interna sur e Interna este contiene los humedales costeros que circundan al margen de la laguna Conil en su porción continental más extensa. En estas zonas se encuentran fallas geológicas formando largas fracturas con gran número de aguadas y cenotes, favoreciendo mayor diversidad de asociaciones vegetales, además de áreas degradadas por la interrupción del flujo de agua entre la laguna y humedal como resultado del asolvamiento en los márgenes de intercambio.

### I.3. Zonificación para la obtención de datos y muestras de Pastos Marinos

Del análisis no supervisado se eligieron un total de 78 estaciones de muestreo, las cuales sirvieron para generar el mapa temático de pastos marinos, y un total de 30 estaciones

para las estimaciones de carbono aéreo y subterráneo asociado con la vegetación acuática sumergida (Tabla 2). Estos puntos fueron distribuidos espacialmente (Fig. 4), para tener mejor representación del área histórica de distribución de pastos marinos de Yum Balam.

Tabla 2. Sitios de muestreo para la evaluación de los almacenes de carbono de pastos marinos, área de la porción marina, número de estaciones para caracterizar el fondo y para evaluar el carbono de este componente de Carbono Azul de Yum Balam.

Influencia Hidrológica	Área (ha)	Número de zonas por sitio.	Número de puntos de muestreo
Marina	11,227	2 (M01, M02)	31
Insular Continental	39,324.5	7 (B01, B02, I01, I02, I03, I04, I05)	47

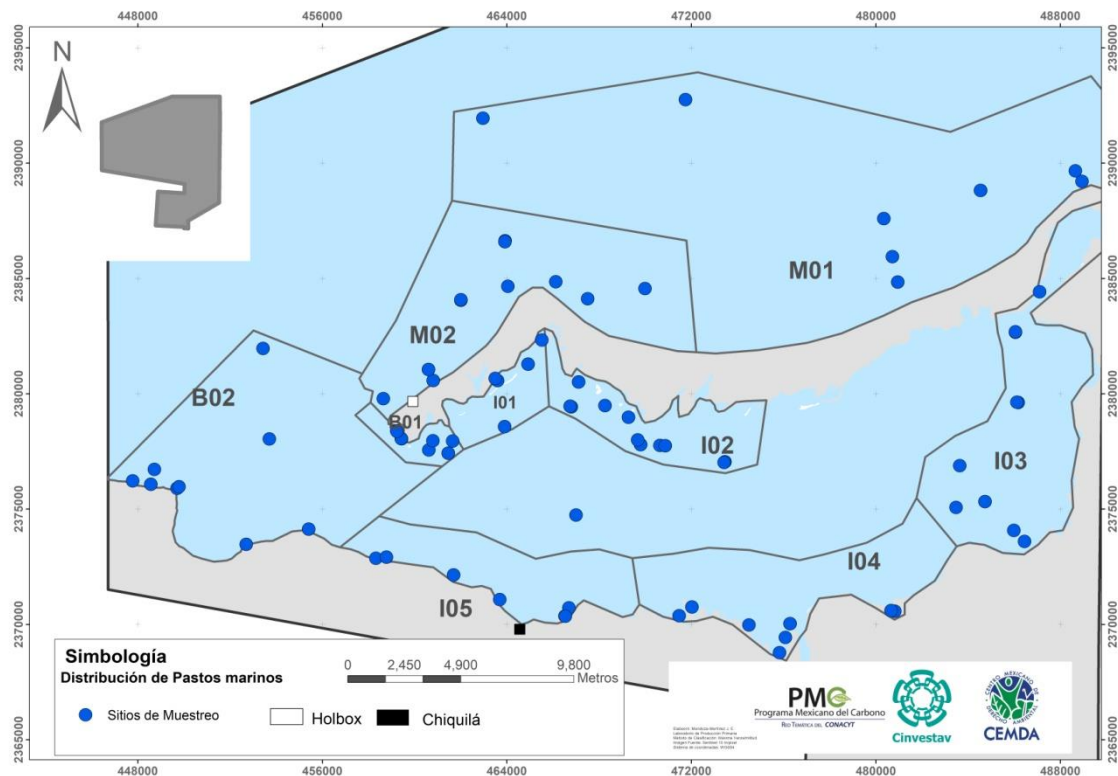


Figura 4. Mapa de los sitios de muestreo y estaciones para la caracterización de fondos marinos para la estimación de carbono en pastos marinos. Autor: Mendoza-Martínez J.E.

## II. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS CUBIERTAS POR MANGLARES Y PASTOS MARINOS

### II.1. Zonas cubiertas por Manglares

Las zonas cubiertas por manglar se determinaron a partir del análisis de variables de la estructura de la vegetación de manglar (alturas, densidad de individuos, cobertura del dosel) recabadas en campo. Esta información fue categorizada y sirvió como semilla para la clasificación supervisada. Dada la existencia de una cartografía oficial de zonas cubiertas por manglar (CONABIO, 2016), esta fue utilizada como zonas válidas de clasificación y poder ajustar la clasificación a límites ya establecidos, sin embargo, la distribución final se realizó para el total del área determinada como manglar según los resultados de los algoritmos de clasificación.

### II.2. Zonas cubiertas por Pastos Marinos

La caracterización de los fondos dominados por pastos marinos se realizó a partir de la cobertura de cuadrantes de 0.25 m<sup>2</sup> (por triplicado) obtenida por el método modificado de Braun-Blanquet (Fourqurean *et al.*, 2001) (Fig. 5). Con los datos colectados en campo se obtuvo la presencia/ausencia de zonas con pasto marino y la dominancia de especies en términos del porcentaje cubierto por vegetación submarina en un área conocida. Dada la resolución de las imágenes con las que se trabajó, el área de influencia cubierta fue de 15 metros alrededor del punto real para obtener un valor más certero al mostrado espectralmente por la imagen.

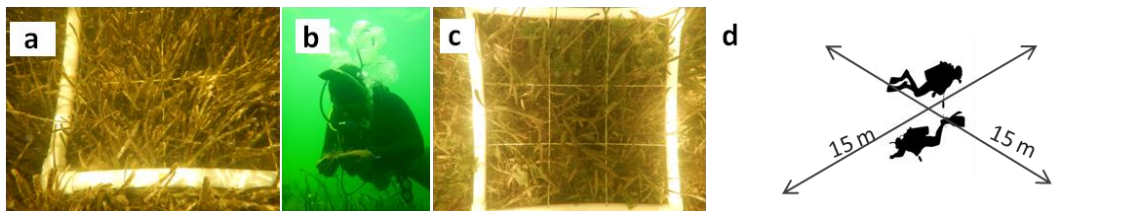


Figura 5. Zona de pastos marinos (a), medición de la cobertura de pastos marinos (b), caracterización (c), diagrama del transecto para medir la cobertura y caracterización de pastos marinos (d).

### II.3. Análisis de la cobertura de vegetación dominada por Manglares

Se realizaron 218 polígonos de entrenamiento a partir de la caracterización de los 31 puntos de muestreo tomando como primer criterio de selección la estructura del bosque del manglar, evaluando la variabilidad en las alturas, densidad de manglar y cobertura del dosel como criterio de condición mediante el índice de vegetación (NDVI) como “proxy” de la vigorosidad del dosel de vegetación (Tabla 3). Esta caracterización permitió

la agrupación de píxeles que responden espectralmente a la variabilidad en las alturas, densidades y coberturas del dosel de manglar medida en campo. Esta metodología ha demostrado tener resultados satisfactorios para el mapeo de zonas de manglar (Acosta-Velázquez y Ruíz-Luna, 2007).

Tabla 3. Grupos y clases seleccionadas para la elaboración de los mapas de Manglar

Semillas	Numero de Polígonos	Número de píxeles
Brillo 01	10	361
Brillo 02	49	9897
Brillo 03	49	10804
Brillo 04	31	3924
Brillo 05	8	556
Brillo 06	25	1191
Brillo 07	10	4274
Brillo 08	14	393

#### II.4. Análisis de la cobertura de fondos dominados por Pastos Marinos

Cada fotografía tomada en campo fue analizada de acuerdo con la guía rápida para el mapeo de hábitats de pastos marinos propuesta por McKenzie (2003). Se realizaron polígonos de entrenamiento como semillas a partir de la caracterización de 78 puntos de muestreo estableciendo como criterio de agrupación para la diferenciación de clases la presencia/ausencia/dominancia de pastos marinos y las características de la pradera. El número de estratos se eligió a partir del análisis de conglomerados (“clustering”) usando 78 puntos de verificación en campo considerando las variables de cobertura (%), profundidad (m) y coordenadas métricas (m) para determinar el número posible de clases (estratos) óptimos y zonas de entrenamiento para el proceso de clasificación supervisada. La distancia elegida fue de Bray-Curtis sin transformación. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 4. Se identificaron tres grupos con presencia de pastos marinos y dos con dominancia de arenas o sustrato desnudo con promedio de similitud del 90 – 95%.



Tabla 4. Grupos y clases escogidas para la elaboración del mapa de Pastos Marinos. Se presenta la cobertura promedio en % y su desviación estándar (sdt)

Tipo de fondo	Grupo	Cobertura (%)	Cobertura (sdt)	Profundidad (m)	Polígonos	Píxeles
Baja cobertura	2	39.4	17.2	3.25	41	11937
Media cobertura	1	56.1	32.8	0.96	102	44907
Alta cobertura	3	78.3	22.2	0.74	22	4876
Sustrato desnudo	4	-	-	0.80	74	173507

## II.5. Procesamiento de imágenes para Manglares y Pastos Marinos

Se utilizó una imagen Sentinel 2-A (Tabla 5) obtenida en línea del servidor gratuito “Servicio Geológico de los Estados Unidos” (USGS), estas imágenes fueron generadas a través del sistema LPGS (Level-1 ProductGenerationSystem) con calidad “1-C” lo que indica que posee una corrección geométrica sistemática a través de la incorporación de puntos de control en tierra y un modelo digital de elevación (DEM) de 90 m, siendo este dentro de los niveles de procesamiento que ofrece el servidor el más exacto. Adicionalmente fueron utilizadas las bandas del infrarrojo cercano (Banda 8) para la construcción de máscaras para una óptima clasificación.

Tabla 5. Selección de imágenes de satélite y bandas utilizadas para Manglares y Pastos Marinos.

Sensor	Sitio	Fecha	Datum
Sentinel 2A MSI	Yumbalm	2018-04-20	WGS84

Se realizaron correcciones radiométricas y atmosféricas completas. El proceso consiste en disminuir el ruido generado por la atmosfera y la columna de agua sobre los valores reales de radiancia del satélite. Para esto se corrigen las “Ganancias-Sesgos” (Gain-Bais) utilizando la metada de cada imagen, posteriormente se convirtieron dichos valores a reflectancia aparente para después corregir atmosféricamente cada pixel de la imagen mediante el método propuesto por Chaves (1988).

Posteriormente, sobre la imagen corregida se realizó una clasificación supervisada utilizando como método de agrupación el de máxima probabilidad, el cual determina las clases centrales y la variabilidad de cada banda analizada para cada clase, permitiendo determinar la probabilidad de que un pixel dado pertenezca a una clase en particular produciendo una asignación de clases más precisa que otros métodos de clasificación supervisada (Green et al., 2000). Para este trabajo, no se definió un umbral estadístico

para la asignación de clases con la finalidad de evitar sesgo en los cálculos al definir una probabilidad esperada (Zar, 1999). Todos los análisis se realizaron en el software Arcgis 10.5, Envi 5.3 y Qgis-3.03 Girona.

### III. TRABAJO DE CAMPO

#### III.1. Zonas dominadas por Manglares

Una vez asignadas las zonas de muestreo se establecieron 30 puntos de muestreo con 4 transectos y 6 parcelas circulares anidadas en cada zona bajo un gradiente del cuerpo de agua hacia tierra adentro (Kauffman y Donato 2012). Este diseño permite una buena estimación de la composición, la estructura y almacén de carbono (aéreo y subterráneo) de los manglares, incluye la variabilidad de la vegetación debido a la elevación topográfica y la frecuencia de inundación de la marea (Fig. 6). En cada parcela de cada transecto se tomaron datos auxiliares utilizados para la caracterización estructural como la especie, diámetro a la altura del pecho (DAP) la cual se usó para calcular el área basal, densidad, altura, índice de valor de importancia (Lugo y Snedaker, 1974; Schaeffer-Novelli y Cintrón 1990). Se midieron las características físico-químicas del agua intersticial como salinidad, pH, redox y temperatura.

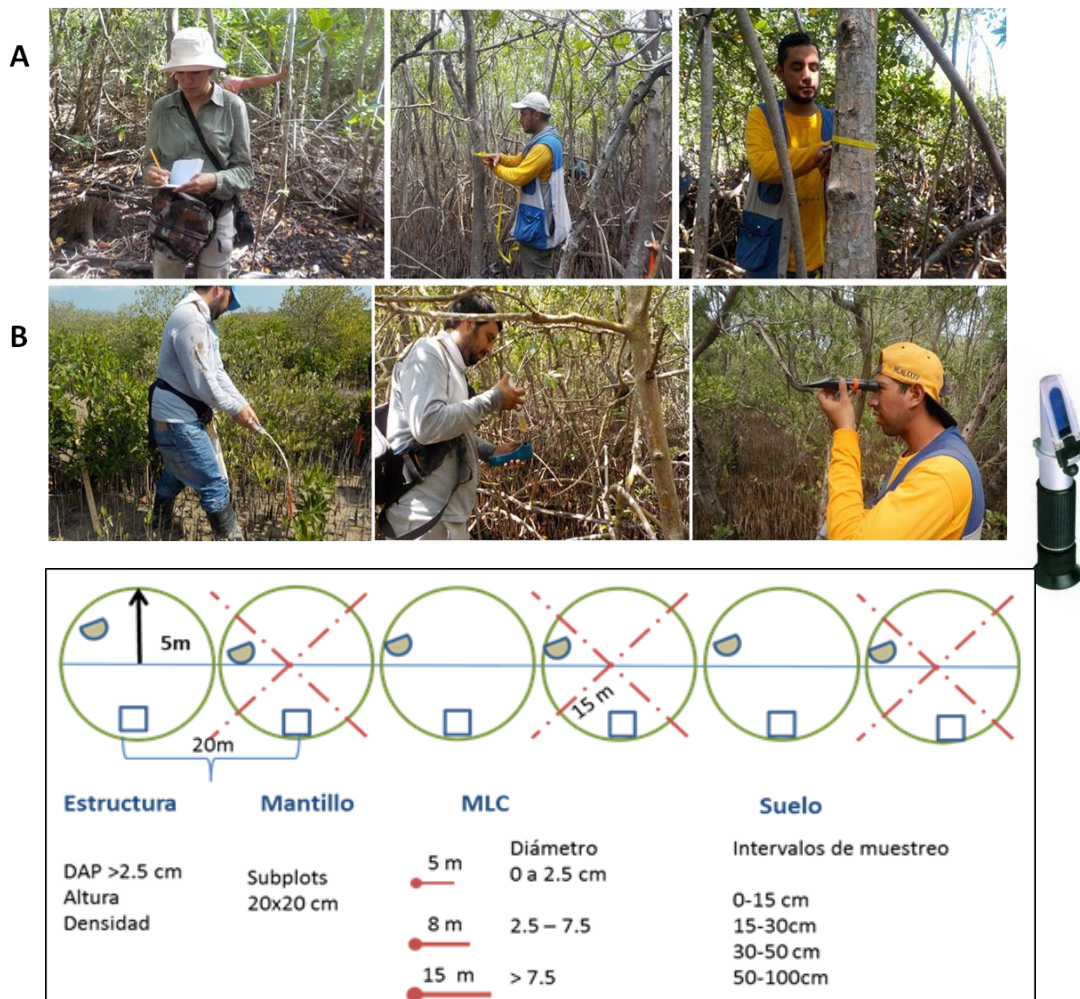


Figura 6. Delimitación de los transectos de muestreo (a), medición del diámetro a la altura del pecho y medición de variables físico-químicas(b).

#### *Salinidad intersticial*

En cada parcela se midió la salinidad intersticial extrayendo el agua a profundidad de 30 cm mediante una jeringa y un tubo de acrílico. Los primeros 20 ml extraídos fueron

desechados antes de obtener la muestra a la cual se midió la salinidad mediante un refractómetro. Este procedimiento se realizó por triplicado en cada parcela.

### ***Biomasa arboles vivos***

En cada parcela se midieron los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 2.5 cm (o diámetro por encima de la raíz más alta en el caso de *R. mangle*), siguiendo las recomendaciones de Lugo y Snedaker (1974). Se estimó la altura y diámetro promedio para cada especie de manglar.

### ***Flujo vertical de carbono (caída de hojarasca)***

Para la estimación de uno de los flujos de carbono se utilizó el “proxy” de la medición de la biomasa de hojarasca producida en un intervalo de tiempo y que se le conoce como caída de hojarasca. Esta medida ha sido usada frecuentemente para evaluaciones de productividad. En este estudio la caída de hojarasca es el “proxy” de captura de carbono foliar. En los sitios donde se garantizó la continuidad del monitoreo (menos probabilidad de vandalismo) se instalaron un total de 21 canastas de recolección de hojarasca (Fig. 7). Estos dispositivos (canastas de recolección) para la medición de la caída de hojarasca se distribuyeron de la siguiente manera: diez en el Transecto 1, seis en el Transecto 4 y cinco en el Punto 8. Se les dio seguimiento de colecta a intervalos de dos meses.



Figura 7. Colocación de canastas para la recolección de hojarasca como medida de captura de carbono foliar.

### ***Sedimentos***

En cada parcela se colectó un núcleo de sedimento mediante un nucleador metálico semi cilíndrico de 6.5 cm de diámetro y 1 m de longitud, la muestra de suelo se fraccionó en diferentes perfiles (Fig. 8).



Figura 8. Nucleador metálico de 1m de largo con extensión a 2 m (a); extracción de muestras de sedimento (b); corte de cada sección y embolsado de la muestra (c) en la APFFYB.

### *Determinación del hidropериодо*

El hidropериодо es de las variables hidrológicas más importantes para los procesos que ocurren en los manglares. Esta característica hidrológica se compone de la frecuencia de inundación, el nivel de inundación y el tiempo que permanece inundado (Mitsch y Gosselink, 2007). En gran medida esta característica determina la distribución de las especies de manglar, y junto con los nutrientes en el sedimento, son en gran parte responsables de la estructura forestal que se observa en cada sitio. Para registrar el hidropериодо se instalaron medidores automáticos de presión (Fig. 9) en una zona de manglar conservado (referencia) y en un manglar degradado. Cada instrumento se instaló dentro de un tubo de PVC de 3 pulgadas el cual se fijó dentro del sedimento a un 1m de profundidad. Se hicieron visitas bimestrales a los sitios para la descarga de los datos que almacena el instrumento.

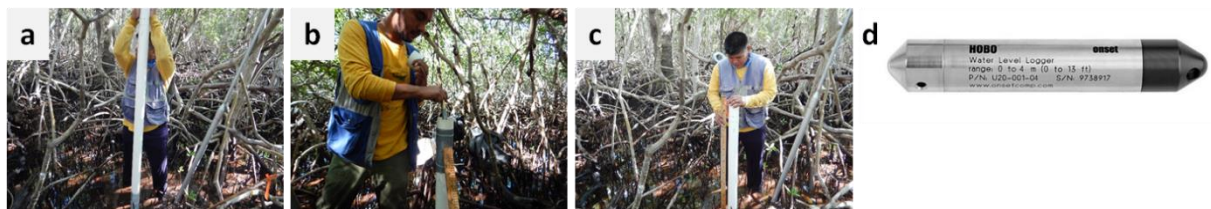


Figura 9. Instalación del tubo de PVC que sirve como soporte del sensor de nivel de agua.

Estos sensores de nivel de agua (“level-loggers”) registran datos cada determinado tiempo, dado que esta variable cambia con el tiempo por ser dependiente de la marea

y aportes de agua subterránea en el caso de la región de Yucatán, se programaron los sensores para que tomarán datos cada hora, esperando poder completar un año de muestreo y conocer la variación temporal de esta característica hidrológica.

### III.2. Zonas dominadas por Pastos Marinos

En cada estación las muestras para carbono aéreo y subterráneo fueron tomadas por un buzo con equipo autónomo (SCUBA). Adicionalmente se midieron variables asociadas a la presencia de pastos como la profundidad por la estrecha relación con la atenuación de la luz respecto a la columna de agua (Hemminga y Duarte, 2000); y la salinidad por el efecto que esta tiene sobre la distribución de especies (Phillips y Meñez, 1988). Para las estimaciones de carbono en la biomasa viva, las muestras de vegetación (aérea y subterránea) fueron colectadas mediante el método de cosecha en pie (“standing crop”) propuesto por Milner y Hughes (1968) utilizando un nucleador de PVC tipo Curer (CARICOMP, 2001) de 15 cm de diámetro. Las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico, selladas, etiquetadas y preservadas en refrigeración. En el caso del carbono subterráneo contenido en el sedimento marino, se colectaron núcleos de sedimento utilizando nucleadores de PVC de entre 60-80 cm de largo por 3-4 cm de diámetro. Las muestras de sedimento fueron etiquetadas y congeladas en posición vertical para evitar alterar la muestra. Previo al análisis de laboratorio los núcleos contenidos en los tubos de PVC fueron cortados longitudinalmente para su análisis en laboratorio (Fig. 10).

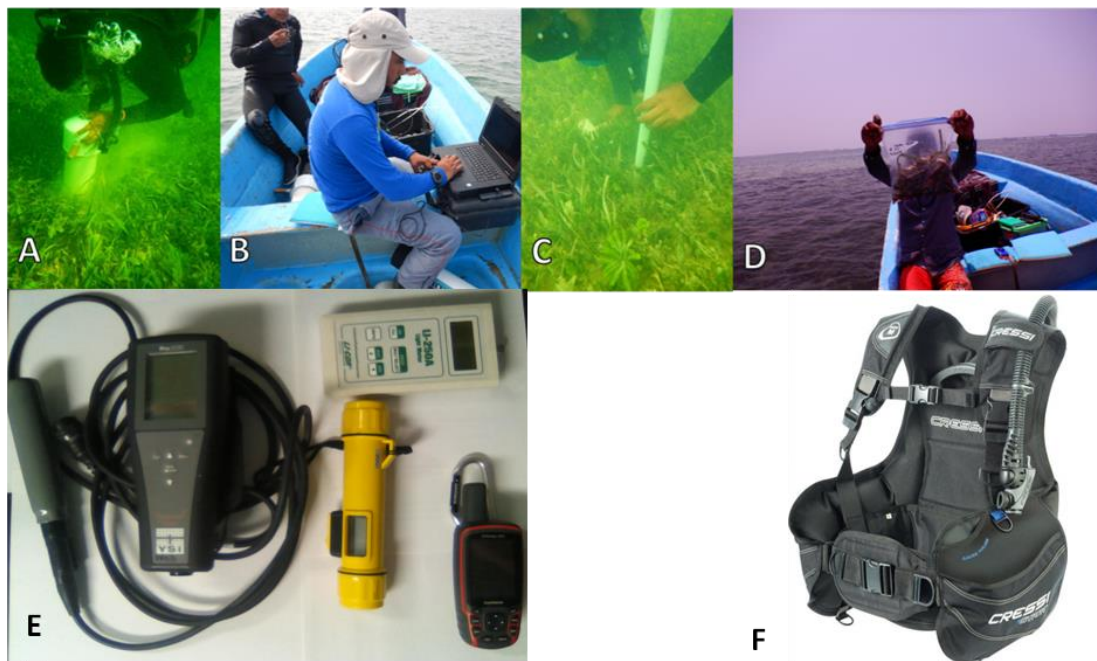


Figura 10. Obtención de la muestra de biomasa (a), registro de variables ambientales (b), extracción de la muestra de sedimento (c), núcleo de sedimento (d), preservación de la muestra (e), f) Instrumentos de campo para la toma de variables ambientales. F) equipo scuba de Buceo.

## IV. TRABAJO DE LABORATORIO Y GABINETE

### IV.1. Almacén de carbono aéreo en Manglares

La obtención del almacén de carbono aéreo se estimó mediante el factor de conversión propuesto por Kauffman y Donato (2012). Se obtiene multiplicando el peso seco de la biomasa estimada a unidades de carbono por hectárea ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ). El almacén de carbono aéreo total se estimó sumando la fracción de árboles vivos y muertos en la parcela:

$$\text{Carbono aéreo total} = \text{Carbono en árboles vivos} + \text{Carbono árboles muertos}$$

#### *Árboles vivos*

La biomasa de los árboles se determinó utilizando los parámetros obtenidos en el apartado 3 (DAP, altura y especie), y las ecuaciones alométricas correspondientes a la especie de manglar (Tabla 6).

#### *Criterios para la selección de las ecuaciones alométricas*

En la Reserva de Yum Balam se observaron árboles con diámetros de 2.5 hasta 72 cm, y alturas de 1.5 hasta 17 m, además de que se observó zonificación. Para algunas zonas se registraron árboles altos ( $>13$  m) y gruesos ( $>30$  cm DAP), mientras que en las otras zonas se registraron árboles de menor altura (2 a 13 m) y más delgados (2.5 a 28 cm DAP). Debido a que las características estructurales del sitio son heterogéneas, se escogieron diferentes ecuaciones alométricas. En la tabla 6 se presentan las ecuaciones evaluadas mediante la gráfica de DAP vs Biomasa para determinar una mejor estimación de la biomasa aérea. Las ecuaciones seleccionadas para las regiones en México fueron las de Fromard *et al.* (1998), Chave *et al.* (2005), Smith y Whelan (2006) y Day *et al.* (1987).

En la reserva de Yum Balam se utilizaron las ecuaciones específicas de especie de Fromard *et al.* (1998), usadas preferencialmente para árboles con alturas  $> 15$  m. Las ecuaciones de Smith y Whelan (2006) y Day *et al.* (1987) son para árboles como los observados en el sitio, sin embargo, se usó la ecuación de Smith por considerar un mayor rango de diámetros. En el caso de los manglares de tipo Chaparro se utilizó la ecuación de Ross *et al.* (2001). La falta de ecuaciones alométricas para los manglares de México inciden en un sesgo en las estimaciones de biomasa aérea y por ende de carbono. No obstante, se decidió usar ecuaciones que no sobre-estimaran la biomasa, por lo que los resultados son conservativos.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en Manglares; b = biomasa (kg), d = diámetro a la altura del pecho (cm), D<sub>30</sub> = diámetro del tronco a 30 cm del suelo (cm), Vol = volumen de la copa (cm<sup>3</sup>).

Grupo de especies	Clima	Localidad	Ecuación de Biomasa	R <sup>2</sup>
Ecuación general <sup>1</sup>		Américas	$b = 0.168 * \rho * (d)2.471$	0.99
<i>Avicennia germinans</i> <sup>3</sup>	Húmedo	French Guinea	$b = 0.14 * d^{2.4}$	0.97
<i>Laguncularia racemosa</i> <sup>3</sup>	Húmedo	French Guinea	$b = 103.3 * d^{2.5}$	0.97
<i>Rhizophora mangle</i> <sup>3</sup>	Húmedo	French Guinea	$b = 0.1282 * d^{2.6}$	0.92
<i>Avicennia germinans</i> <sup>2</sup>	Seco	Florida, USA	$b = 0.403 * d^{1.934}$	0.95
<i>Laguncularia racemosa</i> <sup>2</sup>	Seco	Florida, USA	$b = 0.362 * d^{1.930}$	0.98
<i>Rhizophora mangle</i> <sup>2</sup>	Seco	Florida, USA	$b = 0.722 * d^{1.731}$	0.94
<i>Avicennia germinans</i> <sup>4</sup>	Seco	Florida USA	$\ln b = 2,134 + (0.895 (\ln D_{30}^2) + (0,184 * \ln \text{Vol copa})$	0.99
<i>Rhizophora mangle</i> <sup>4</sup>	Seco	Florida USA	$\ln b = 2,528 + (1,129 (\ln D_{30}^2) + (0.156 * \ln \text{Vol copa}$	0.94

<sup>1</sup>Chave et al. (2005); <sup>2</sup>Smith & Whelan (2006); <sup>3</sup>Fromard et al. (1998); <sup>4</sup>Ross et al. (2001).

#### IV.2. Almacén de carbono aéreo en Pastos Marinos

Las muestras de pastos marinos fueron lavadas con agua corriente y separadas por especie, y por material vivo y muerto. El material vivo se separó en porción aérea (hojas, flores, frutos) y subterránea (raíces, rizomas y haces). Se retiraron las epifitas de las hojas (algas, diatomeas y organismos incrustados) mediante una navaja, y para obtener la biomasa se registró el peso seco de cada componente después de ser secado a 60 °C por 72 hrs (Fig. 11). El contenido de carbono orgánico en la planta se estimó de manera indirecta de acuerdo con lo propuesto por Duarte (1990) cuando no existe posibilidad de un análisis cuantitativo, por lo que se utilizó el factor de conversión sugerido para pastos marinos que es el 33.6 % DW ± 0.31 (Fourqurean et al., 2012). Por lo tanto, se multiplicó el peso seco aéreo y sumergido por 0.34 y expresado como Mega gramos de Carbono por hectárea (Mg C ha<sup>-1</sup>). El carbono aéreo total se obtuvo de la suma del componente aéreo (hojas) y necromasa (material muerto).

$$\text{Carbono aéreo total} = \text{Carbono en hojas} + \text{Carbono en necromasa}$$



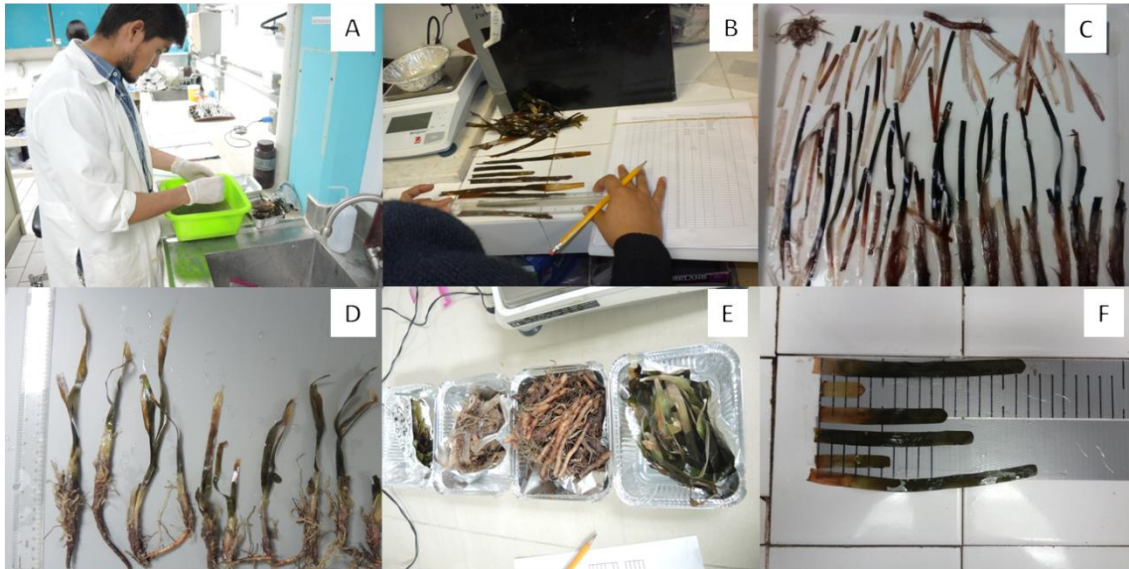


Figura 11. Medición de variables morfológicas. a) Acomodo de las hojas para su medición; b) Medición del largo; c) y d) Separación de la muestra para contabilizar número de haces y número de hojas, Pesado de muestras e), Determinación de altura del dosel para f) *S. filiforme* *T. testudinum*

### IV.3. Almacén de carbono subterráneo en manglares y pastos marinos

Las muestras de sedimento para ambos ecosistemas se fraccionaron en diferentes perfiles (0-15, 15-30, 30-50, 50-100 cm) para el caso de manglares, y para pastos marinos se seccionaron de acuerdo con las diferentes fracciones de color observadas. Cada fracción se secó en un horno a 70°C por un lapso de 72 horas y se obtuvo su peso seco con una balanza (Fig. 12). El volumen de la muestra se obtuvo mediante la fórmula del cilindro calculada a partir de las dimensiones de los nucleadores utilizados. El cálculo de la densidad aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) se obtuvo del cociente del peso de la muestra entre el volumen de la muestra analizada.

Para evaluar el contenido de carbono total (CT), las muestras de sedimento fueron analizadas mediante el método de combustión seca utilizando un autoanalizador elemental CHN ThermoQuest (Flash EA 1112). Debido a las características geológicas y sedimentológicas de los sedimentos, fue necesario hacer la corrección del carbono inorgánico (CI) para obtener el carbono orgánico (CO) almacenado por ecosistemas de manglar y pastos marinos. El contenido de CI se determinó mediante el método de pérdida por ignición (LOI= Loss on ignition) (Dean, 1974). Para algunos casos donde se sospechaba un alto contenido de carbonatos, se utilizó el método de acidificación con ácido clorhídrico (1 N) a la muestra (Van Iperen y Helder, 1985).

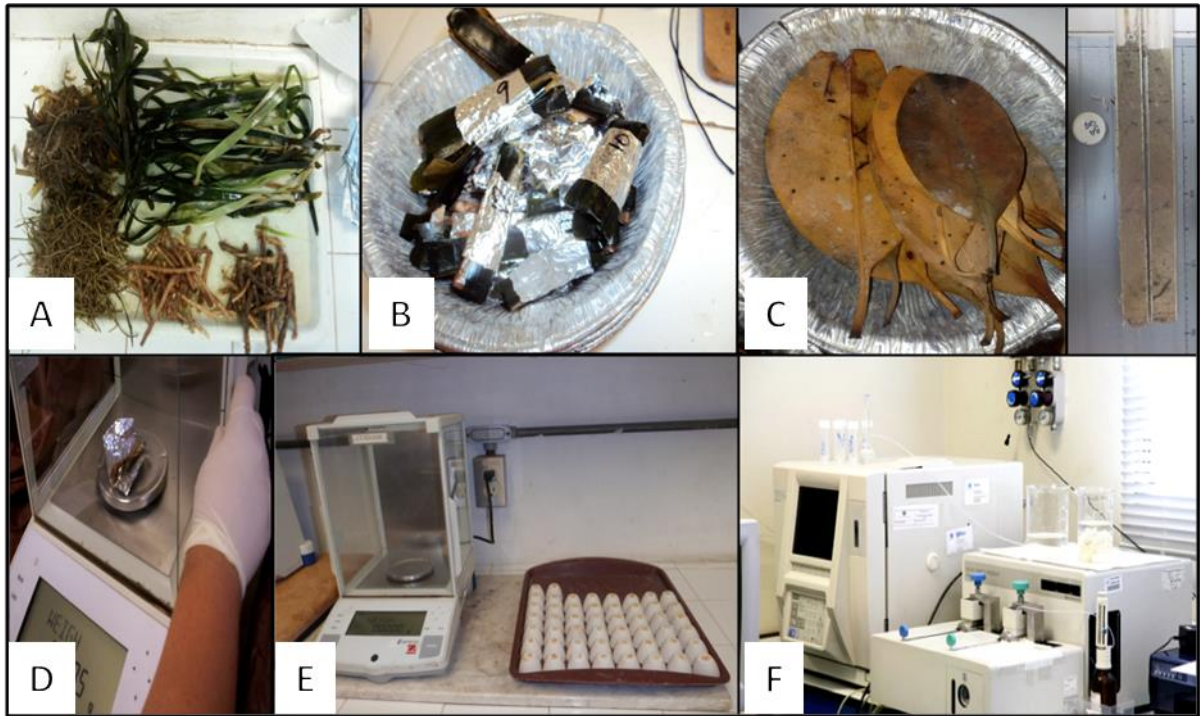


Figura 12. Muestras de biomasa de pastos marinos (a), mantillo (b), núcleo de sedimento (c), registro de peso seco de biomasa pastos marinos y mantillo (d), registro de peso seco para muestras de sedimento (e), autoanalizador elemental (f).

## V. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

### V.1. Criterios de agrupación para el análisis de los almacenes de carbono y cálculo de las reservas totales de carbono en Manglares y Pastos Marinos

El análisis de datos para estimar los almacenes de carbono en ecosistemas de manglar y pastos marinos consideró un criterio geográfico que toma en consideración variables ambientales relacionadas con la composición, distribución y conformación del paisaje de estos ecosistemas. La agrupación de las parcelas/estaciones de muestreo dimensiona la composición paisajística del sitio, que en primera instancia reflejarían condiciones específicas de acuerdo con su posición geográfica. Así mismo, la agrupación espacial fue seleccionada de acuerdo a las características particulares; para la Reserva de Yum Balam las condiciones ambientales son representadas bajo dos características generales; por un lado, la porción insular costera con mayor influencia marina, y por otro la porción insular interna y porción continental con mayor influencia terrestre y con aporte de nutrientes por agua subterránea (Fig. 13).

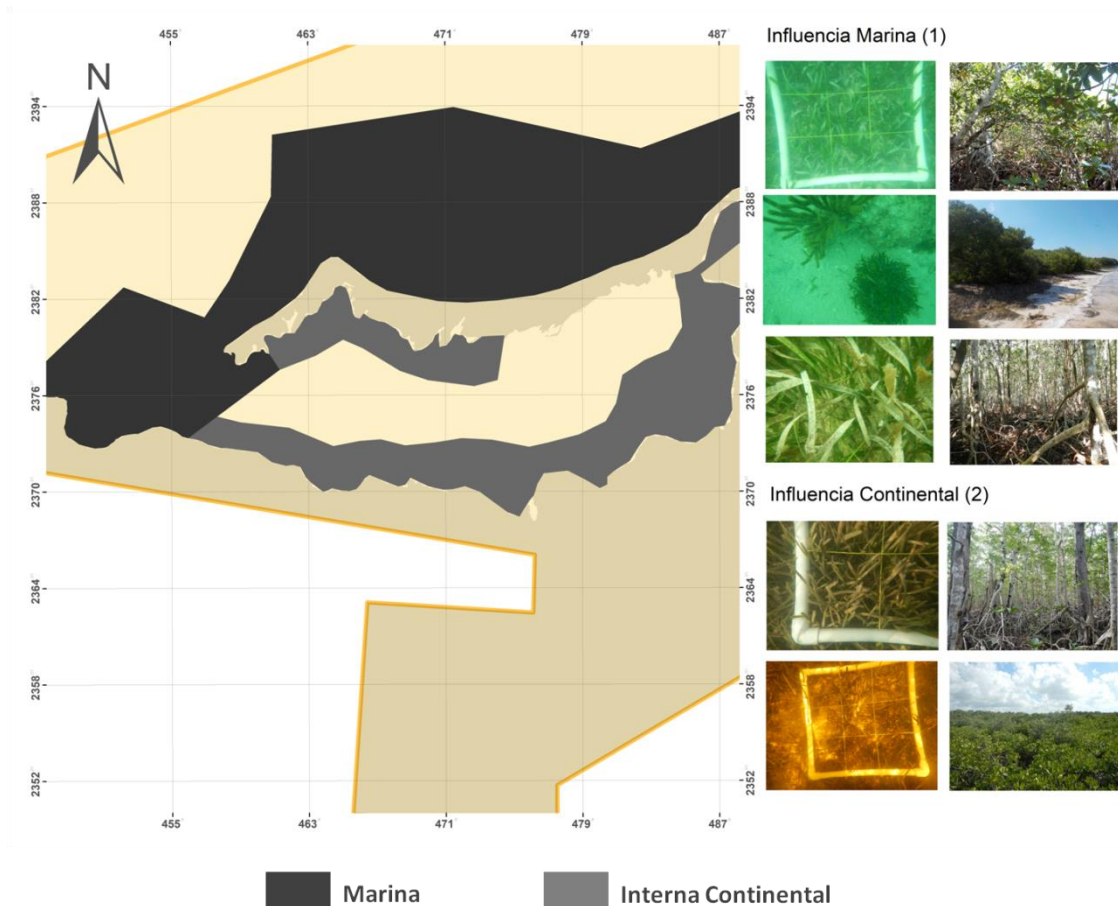


Figura 13. Zonas ambientalmente distintas definidas como criterios de agrupación en la APFFYB.

Esta configuración genera condiciones ambientales diferentes entre la zona interna de la Laguna Yalahau, porción insular y porción costera que comprende Isla Grande e Isla Chica en Holbox. Se describe como una zona generalmente mixohalina con exposición al oleaje, corrientes y vientos provenientes de la circulación costera habitual, se encuentra definida por una porción transversal de aproximadamente 37 km de línea de costa. La porción interna presenta condiciones hidrológicas típicas de una laguna costera hiperhalina, donde los tiempos de residencia del agua son cortos, y hay bajas precipitaciones y altas tasas de evaporación (Tran *et al.*, 2002b, 2008; Aguilar-Salazar *et al.*, 2003), sin embargo, se caracteriza también por presentar zonas con manantiales de agua subterránea rica en nutrientes, principalmente hacia la zona de boca.

Para las estimaciones de carbono ecosistémico en cada componente (manglar y pastos marinos) se procedió a la suma de cada estimación promedio de almacén de carbono de cada estrato/zona y de cada componente (aéreo y subterráneo). Para ambos componentes la incertidumbre asociada a las estimaciones fue estimada a partir del método aditivo de la variancia, utilizando como parámetro estadístico a la desviación estándar para cada factor de agrupación.

#### *Reservasdecarbono*

$$= \sum [CO_{estrato\ 1} * Area_{estrato\ 1}] \dots [CO_{estraton} * Area_{estraton}]$$

Los valores finales del contenido de carbono fueron expresados en las unidades utilizadas en los reportes de carbono (Mg C ha<sup>-1</sup>) y se complementan en tablas con las unidades estandarizadas (Mg CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup>).

## VI. RESULTADOS EN ECOSISTEMAS DE MANGLARES

### VI.1. Parámetros fisicoquímicos del agua intersticial en manglares del Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam.

#### *Salinidad y temperatura intersticial*

La salinidad es uno de los controladores más importantes en el establecimiento y desarrollo de los manglares y aporta información valiosa para entender los procesos que ocurren en el ecosistema (Ball, 2002); se reconoce como uno de los factores abióticos que más influye en la distribución y abundancia de los manglares (Keddy, 2010). Las dos zonas (Isla Grande e Isla Chica) ubicadas en la isla de barrera registran mayores salinidades promedio ( $64 \pm 8.2$  g/kg), caso contrario sucede en el manglar continental, donde los valores promedio de salinidad son menores ( $36 \pm 6.3$  g/kg) (Fig. 14). Esta condición de los manglares de la isla de barrera los pone en una posición de mayor vulnerabilidad a los cambios hidrológicos que favorezcan aumento en la salinidad intersticial.

La temperatura del agua intersticial está relacionada con la temperatura ambiental es una variable que responde a las condiciones locales del clima y es el principal regulador en los procesos geoquímicos y biológicos en el manglar. En esta variable se presenta la misma condición para las zonas de la isla de barrera, donde la mayor temperatura promedio alcanza los  $30.1$  °C (Fig. 14).

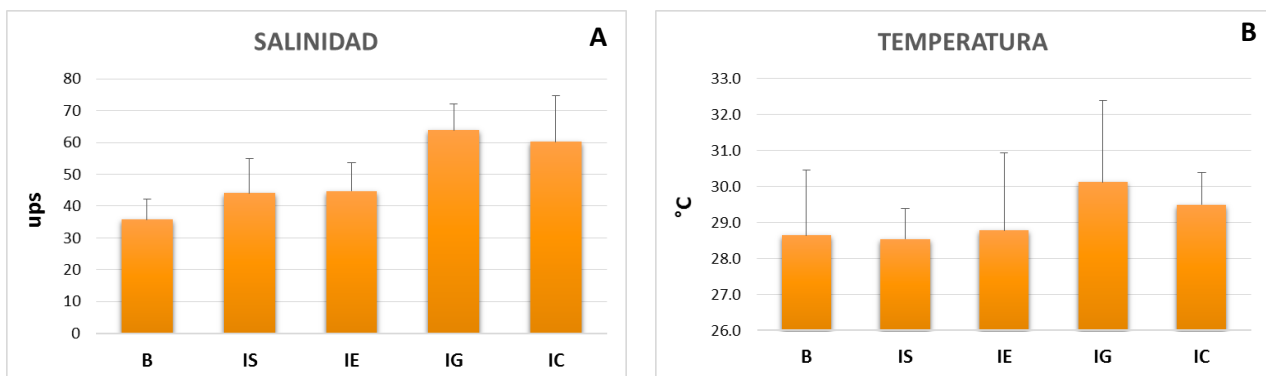


Figura 14. Promedios de salinidad (A) y temperatura (B) del agua intersticial en zonas de manglar del APFF Yum Balam. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC).

### Potencial redox (Eh) y Potencial de hidrógeno (pH) intersticial.

El registro del potencial redox (Eh) es básico en múltiples estudios que se desarrollan a nivel local o regional en humedales. La oxidación de compuestos orgánicos es la fuerza motriz en la mayoría de las reacciones redox y resulta en la descomposición de la materia orgánica del suelo (Vasilas, 2011). Esta variable regula muchas de las reacciones biogeoquímicas y determina la estabilidad de los minerales y la regeneración de nutrientes en el suelo y los sedimentos (Reddy y DeLaune, 2008). El potencial de hidrógeno suele determinar la calidad, características, capacidad de absorción y solubilidad de muchas sustancias presentes en el sistema y repercute en el modo en que los nutrientes son eliminados o acumulados tanto en las plantas como en el suelo de los manglares.

Las condiciones más anóxicas ( $-240 \pm 90$  mV) se presentan en la zona IG, y las menos reducidas ( $-156 \pm 60$  mV) se registran en la zona IC (Fig. 15). En cuanto al pH, en las cinco zonas se consideran pH ligeramente ácido como corresponde neutros obteniendo valores promedio de 6.80 (Zona IS) a 7.01 (Zona B). Estas dos variables presentan mayor variabilidad espacial, indicativo de la necesidad del monitoreo hidrológico en el ANP Yum Balam.

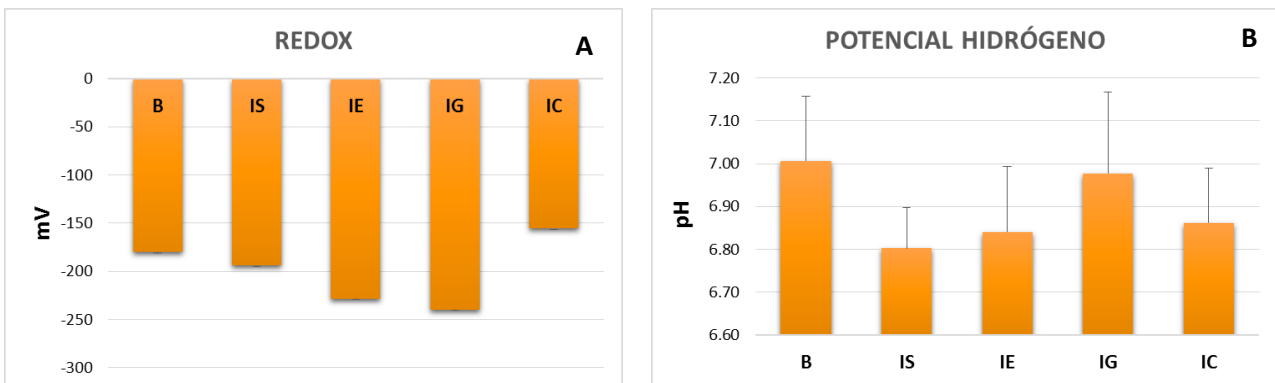


Figura 15. Promedios de potencial redox (A) y potencial de hidrógeno (B) del agua intersticial en zonas de manglar del APFF Yum Balam. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC).

## VI.2. Caracterización de las zonas de manglar en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam

### Distribución espacial de los Manglares de la reserva de Yum Balam

El Área de Protección de Flora y Fauna (APFFYB) presenta varios tipos ecológicos de manglar. Se registraron principalmente dos tipos: manglar de cuenca dominados por *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*, y manglar de franja con parches discontinuos de manglar chaparro dominados por *Rhizophora mangle* (Fig. 16). La Zona Boca se caracterizó por la dominancia de manglares de tipo franja y cuenca de *Rhizophora mangle* con alturas promedio alrededor de  $7.5 \pm 1.8$  m y densidades de  $11,400 \pm 1,833$  ind. ha<sup>-1</sup>.

La zona Interna Sur presentó manglares tipo peten, franja, cuenca y chaparro con alturas promedio de  $6.8 \pm 2.7$  m, y diámetros promedio de  $8.0 \pm 3.4$  cm. En esta zona las densidades fueron de  $44,100$  ind.  $ha^{-1}$  y dominancia de *Rhizophora mangle*, sin embargo, se observaron también individuos de *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*. El área total de manglares para esta zona se estima en  $459.7$  ha. El dosel aéreo de manglar refleja mayores coberturas para esta zona ( $>70\%$ ) aunque se presentan de manera más extensa coberturas de entre  $50$  y  $70\%$ .

Para la zona Interna este la extensión de manglar fue de  $954.7$  ha y coberturas mayores a  $50\%$ . Los árboles registrados mostraron alturas promedio de  $2.9 \pm 3.8$  con DAPs de  $3.3 \pm 2.6$  y las densidades son alrededor de  $18,600$  ind.  $ha^{-1}$ . Para esta zona dominan las especies *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*.

Para la zona conocida como Isla Grande se presentaron manglares tipo cuenca con dominancia de *Avicennia germinans*, aunque también se observaron parches de manglar tipo chaparro y una extensión total de manglar de  $506.2$  ha con coberturas promedio menores al  $30\%$ . Los arboles presentan alturas en promedio de  $3.5 \pm 1.5$  y con DAP de  $4.4 \pm 1.7$  cm. La densidad fue de  $25,600$  ind.  $ha^{-1}$ .

Por último, la zona conocida como Isla Chica presentó manglares con porcentajes de cobertura menores al  $30\%$  de tipo cuenca y franja cubriendo  $441.7$  ha. Los arboles presentaron alturas promedio de  $4.6 \pm 1.5$  m, DAP de  $7.3 \pm 2.2$  cm y densidades de  $27,800$  ind  $ha^{-1}$ . La especie dominante fue *Avicennia germinans* (Tabla 7).

Tabla 7. Distribución de las coberturas de diferentes zonas de manglar en el APFFYB.

Zona	Clave	Área (ha)
Boca	B	532.7
Interna Sur	IS	4059.7
Interna Este	IE	954.7
Isla Grande	IG	506.2
Isla Chica	IC	441.7

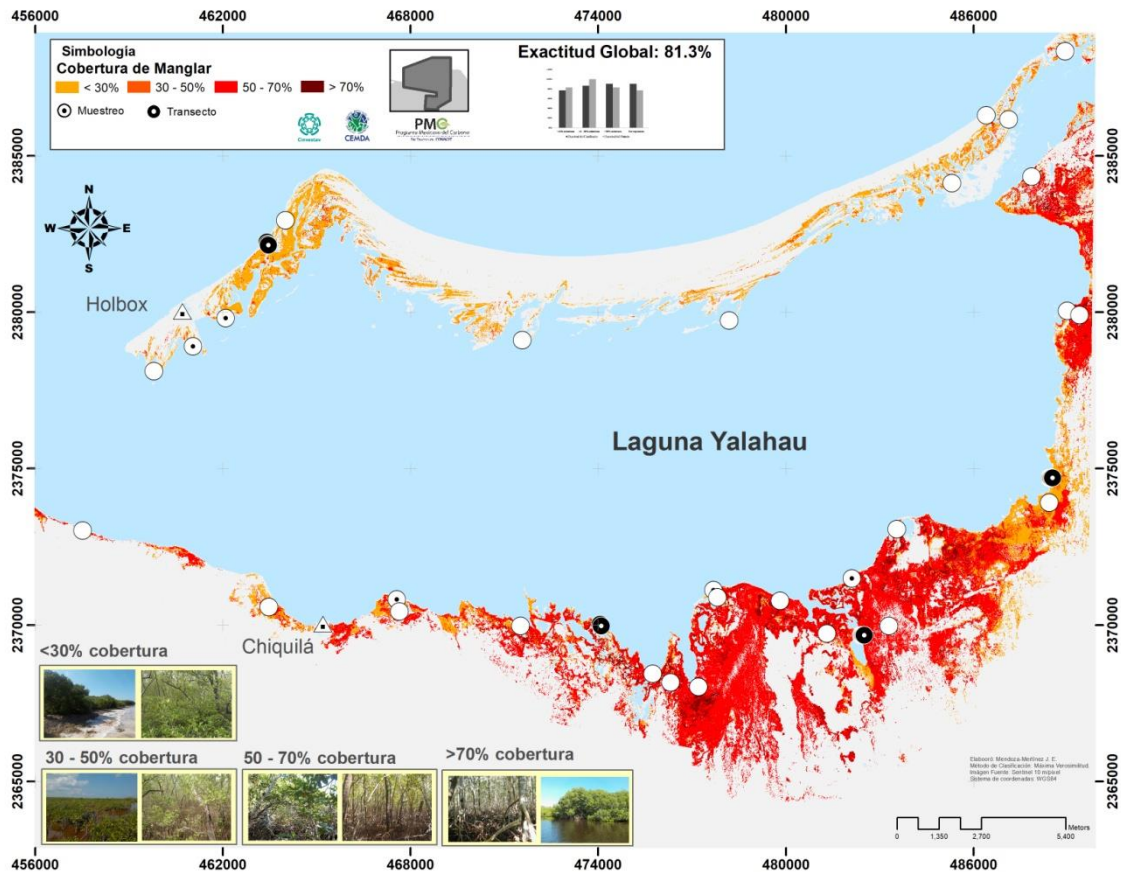


Figura 16. Distribución de manglar en el Área de Protección de Flora y Fauna Reserva de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E

### Índice de valor de importancia (IVI)

El índice de valor de importancia (IVI) jerarquiza la dominancia de cada especie en una unidad de muestreo (Zarco-Espinosa *et al.* 2010). Por lo tanto, el valor de importancia más alto es para *R. mangle* (IVI= 64%), dominando en tres zonas del APFF Yum Balam, seguido de *A. germinans* (IVI = 89%) que domina en dos zonas, seguida de *L. racemosa* con su valor más alto de 23%, y por último *C. erectus* (IVI= 17%), robusteciendo la premisa de las diferencias en las condiciones fisicoquímicas de cada sitio, principalmente la salinidad intersticial que podría explicar los patrones de distribución vegetal (Tabla 8 y Fig. 17).



Tabla 8. Características (promedio  $\pm$  DE) de la estructura de los manglares de APFF Yum Balam y el índice de valor de importancia (IVI) de las especies de cada zona.

Zona	Altura (m)	DAP (cm)	Densidad (Ind. ha <sup>-1</sup> )	IVI-Rm (%)	IVI-Ag (%)	IVI-Lr (%)	IVI-Ce (%)
Boca (B)	7.6 $\pm$ 1.8	9.6 $\pm$ 4.6	11,400 $\pm$ 1,833	60	17	23	
Interna sur (IS)	6.8 $\pm$ 2.7	8.0 $\pm$ 3.4	44,100 $\pm$ 10,209	55	27	18	
Interna este (IE)	2.9 $\pm$ 3.8	3.3 $\pm$ 2.6	18,600 $\pm$ 3,818	64	36		
Isla grande (IG)	3.5 $\pm$ 1.5	4.4 $\pm$ 1.7	25,600 $\pm$ 4,424	22	61		17
Isla chica (IC)	4.6 $\pm$ 1.2	7.3 $\pm$ 2.6	27,800 $\pm$ 17,111	11	89		

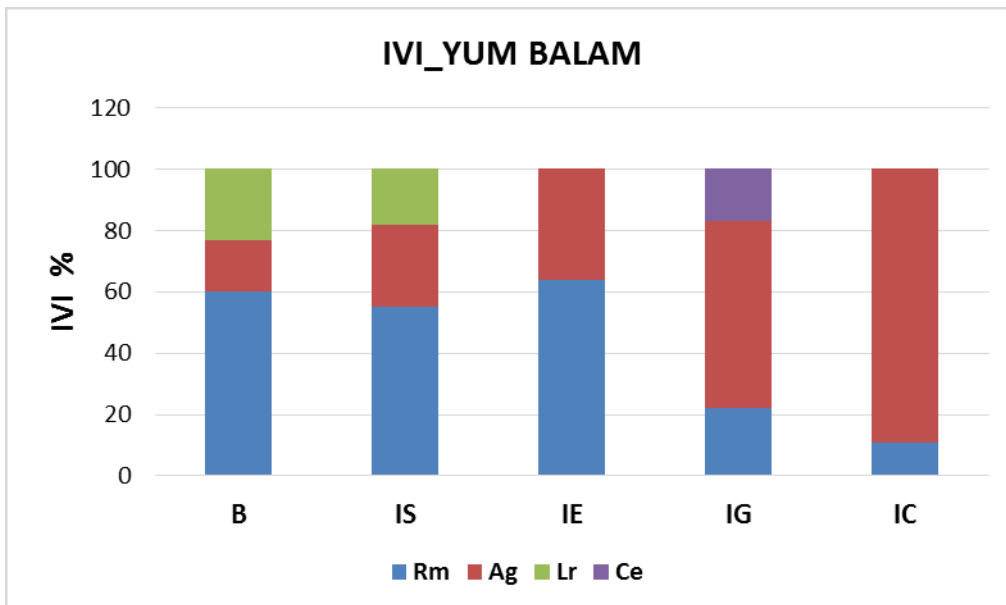


Figura 17. Índice de valor de importancia por especie de manglar en las distintas zonas del APFFYB. Boca (B), Interna sur (IS), Interna este (IE), Isla Grande (IG), Isla Chica (IC).

### VI.3. Carbono Azul de los manglares en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam

#### *Variación espacial de los almacenes de carbono (Biomasa aérea/subterránea/sedimentos)*

El valor promedio para el almacén de carbono aéreo total (carbono aéreo vivo + carbono subterráneo) de las zonas geográficas fue de  $750.2 \pm 98 \text{ MgC ha}^{-1}$ . El carbono aéreo vivo fue mayor en la zona Interna Sur ( $64 \pm 29 \text{ MgC ha}^{-1}$ ), y el valor más bajo se registró en la Zona Este ( $15 \pm 9 \text{ MgC ha}^{-1}$ ).

El valor promedio para el almacén de carbono subterráneo de las zonas geográficas fue de  $707 \pm 177 \text{ MgC ha}^{-1}$ . Los sedimentos de la zona Isla Chica presentan el valor promedio más alto de carbono ( $837.8 \pm 100 \text{ MgC ha}^{-1}$ ); mientras que el valor promedio más bajo se registró en la zona Isla Grande ( $513 \pm 147 \text{ MgC ha}^{-1}$ ) (Fig. 18), aun así, este valor es alto para el promedio observado en otros manglares de México (Herrera-Silveira et al., 2016)

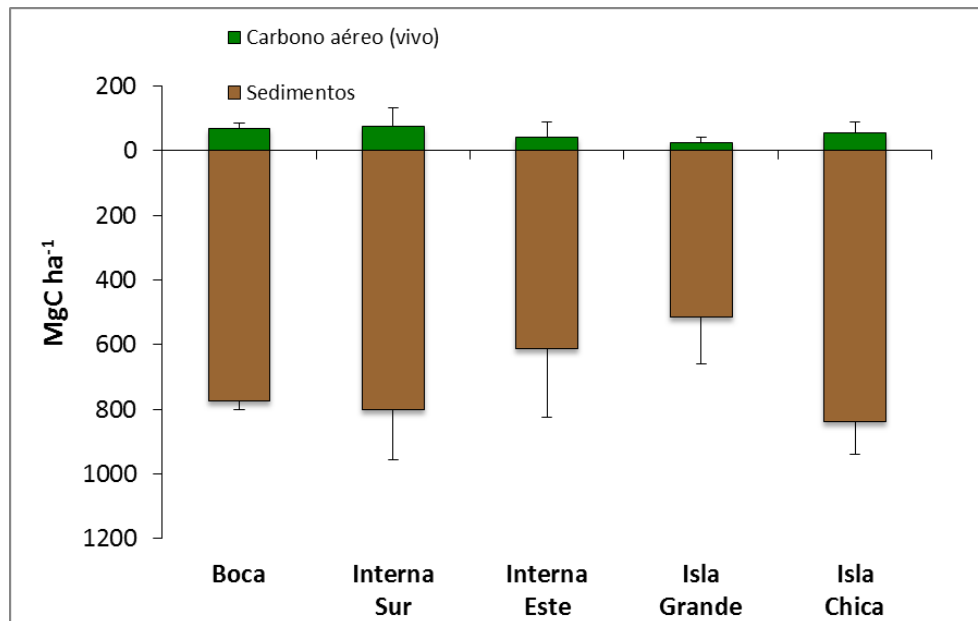


Figura 18. Almacenes carbono en manglares de la APFFYB de acuerdo con las zonas geográficas.

### ***Variación espacial de las reservas de Carbono total asociado a zonas de Manglar en la Reserva de Yum Balam.***

La distribución de manglares en APFFYB presentó diferencias espaciales para cada una de las distintas zonas evaluadas (Fig. 19). Los manglares distribuidos sobre Isla Grande almacenan menos carbono ( $528 \pm 164 \text{ MgC ha}^{-1}$ ) por unidad de área y representan las menores reservas de carbono total de la APFFYB ( $0.9 \pm 0.3 \text{ Tg CO}_2\text{eq}$ ). Sin embargo, los tipos de manglares presentes sobre la zona (tipo cuenca de *A. germinans* y chaparro) con coberturas promedio del 30%, están teniendo un papel preponderante en la estabilidad de la línea de costa interna, ya que al estar ubicados en región interna de la isla de barrera limitan la erosión contribuyendo a la estabilidad de los ecosistemas más terrestres. Por ello su conservación y mejoramiento hidrológico se recomiendan ampliamente.

Por otro lado, para la parte interna de la laguna (Interna sur y este), la alta heterogeneidad del paisaje es resultado de la diversidad de tipos ecológicos de manglar que se presentan en estas zonas. Estas diferencias muestran una respuesta diferencial en la capacidad para almacenar carbono orgánico. Manglares de tipo peten, franja, cuenca y chaparro con densidades de  $44,100 \text{ ind. ha}^{-1}$  y altas coberturas del dosel (>70%) representan las mayores reservas de carbono con  $12.9 \pm 3.12 \text{ Tg CO}_2\text{eq}$  para la zona sur y  $2.2 \pm 0.9 \text{ Tg CO}_2\text{eq}$  para la zona este.

Para el caso de Isla Chica las reservas totales de carbono son bajas ( $1.4 \pm 0.2 \text{ Tg CO}_2\text{eq}$ ) respecto a las demás zonas. Sin embargo, la alta concentración de carbono por unidad de área de los manglares de esta zona ( $883 \pm 134 \text{ MgC ha}^{-1}$ ), la convierte en un área de especial interés de conservación y de restauración.

La conservación de los manglares del APFFYB puede llegar a representar la mitigación de  $19.2 \pm 4.6$  millones de toneladas anuales de  $\text{CO}_2\text{eq}$ . Este valor representa las emisiones evitadas de 4.97 millones de personas al año en México por el uso de hidrocarburos. Esta evaluación se basa en las cifras que reporta el INECC considerando que por persona se estiman emisiones por consumo de hidrocarburos de  $3.8 \text{ Mg CO}_2\text{eq año}^{-1}$  (INECC-Semarnat, 2013).

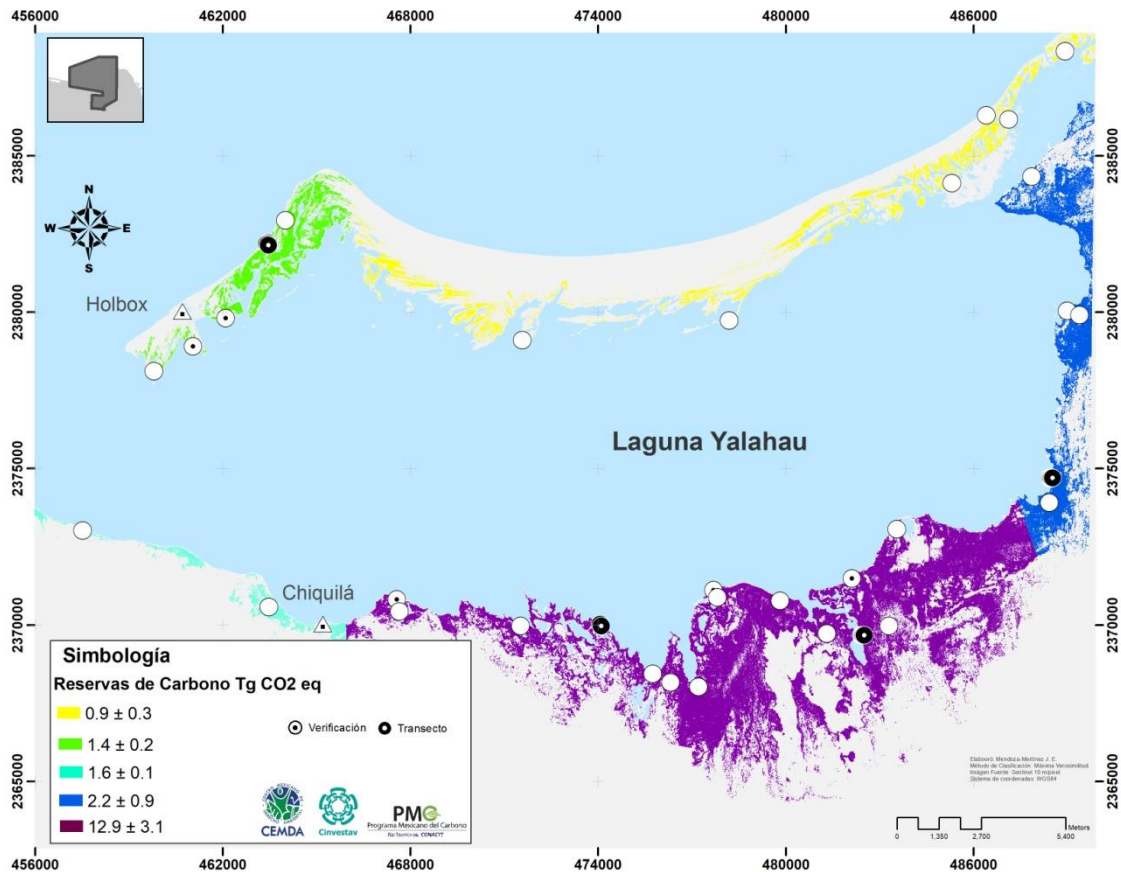


Figura 19. Reservas de Carbono Azul ecosistémico almacenado en las zonas dominadas por manglares de la APFFYB.

#### VI.4. Vulnerabilidad espacial de los almacenes de carbono asociado a zonas de Manglar en la Reserva de Yum Balam

Los manglares se caracterizan por ser ecosistemas que proveen múltiples servicios ambientales, ser dinámicos, con procesos ecológicos complejos y muy sensibles a cualquier perturbación principalmente de tipo hidrológica superficial y/o subterránea. Por esta razón y por las diversas actividades antropogénicas como extracción de madera, desarrollo agropecuario y turístico, se ha demostrado que son vulnerables a modificar sus funciones ecológicas, y con ello reducir su aportación de servicios ambientales. Por lo tanto, con el objetivo de identificar la potencial relación entre la distancia de los manglares de diferente condición (buena-regular-mala) con los centros urbanos (Holbox y Chiquilá), se llevó a cabo un análisis estadístico para identificar posibles relaciones que sugieran alguna asociación causa-efecto. En la figura 20 se observa que los centros urbanos tienden a condicionar la condición del manglar; el 50% de las estaciones presentan alta influencia antropogénica en Chiquilá y 27% para Holbox con regular condición. En los cuadrantes CIII y CIV se representan zonas de alta y baja cobertura que no representan una presión potencial por el desarrollo urbano.

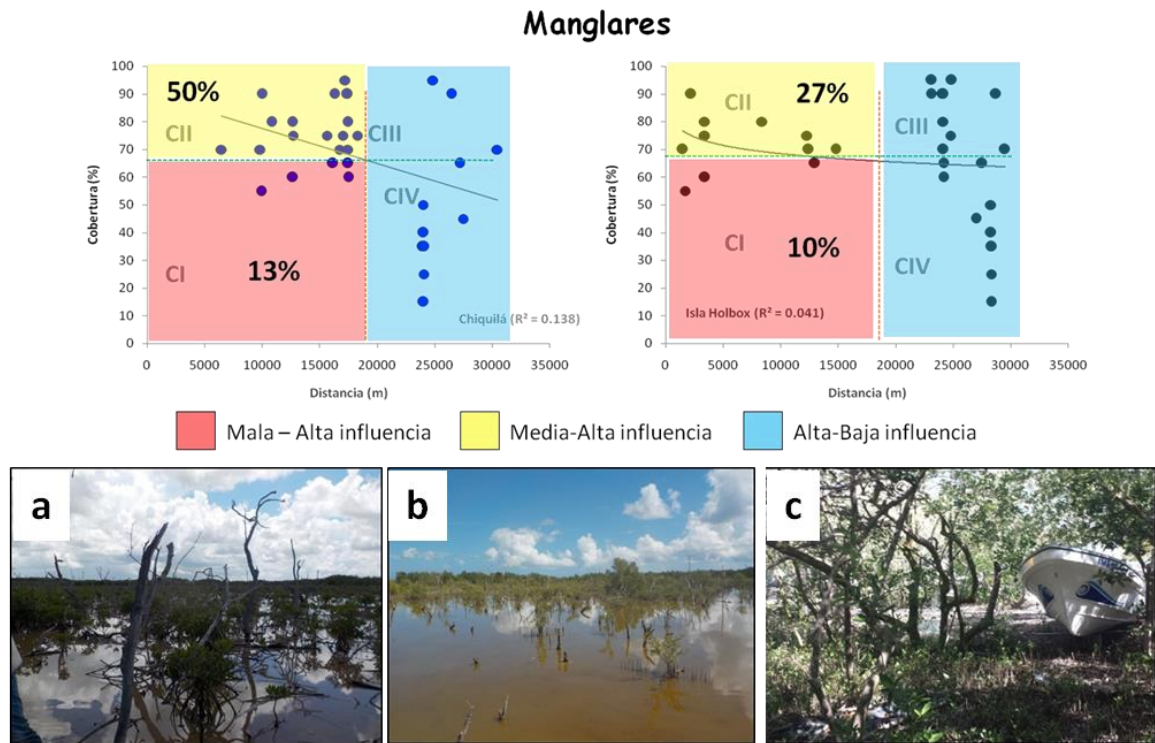


Figura 20. Evaluación espacial de la condición de manglares (Cobertura %) con la presencia de centros urbanos (Distancia m). Manglares con mala condición en la parte continental cercanos a Chiquilá, (a) y (b); manglar perturbado cercano a Holbox (c). Autor: Mendoza-Martínez J.E.

### VI.5. Flujo vertical de captura de carbono por caída de hojarasca

Los resultados de la caída de hojarasca mostraron que hubo aporte mayor de hojarasca durante la temporada seca en los tres sitios, con dominancia de las hojas sobre otras estructuras orgánicas. En relación con estos sitios donde se observa mayor caída de hojarasca (productividad) es en la zona interna sur. Este es un manglar tipo franja de bajas salinidades intersticiales. Por otro lado, se colocaron canastas en dos distintos tipos de manglar de una misma zona, siendo la de cuenca la que mayor caída de hojarasca presentó, en comparación con el de franja. Esto puede deberse a que el sitio de franja está más expuesto por su ubicación a eventos meteorológicos como nortes. No obstante, aunque parece haber relación positiva entre la precipitación y el aporte de hojarasca, cada componente estructural sigue una cronología diferente (Fig. 21A). Se recomienda analizar los resultados a mayor detalle una vez completado uno o dos ciclos anuales de monitoreo.

En la figura 21B se observan los resultados de la captura total de carbono por caída de hojarasca de cada sitio durante ocho meses. La zona Interna Sur es la que presentó mayor captura de carbono ( $80.3 \text{ g p.s/m}^2$ ) en todos sus componentes, seguida de la zona Isla Chica ( $49.8 \text{ g p.s/m}^2$ ) representada por el tipo franja, mientras que en ésta misma zona, pero el tipo ecológico cuenca presentó el valor promedio más bajo ( $31.1 \text{ g p.s/m}^2$ ).

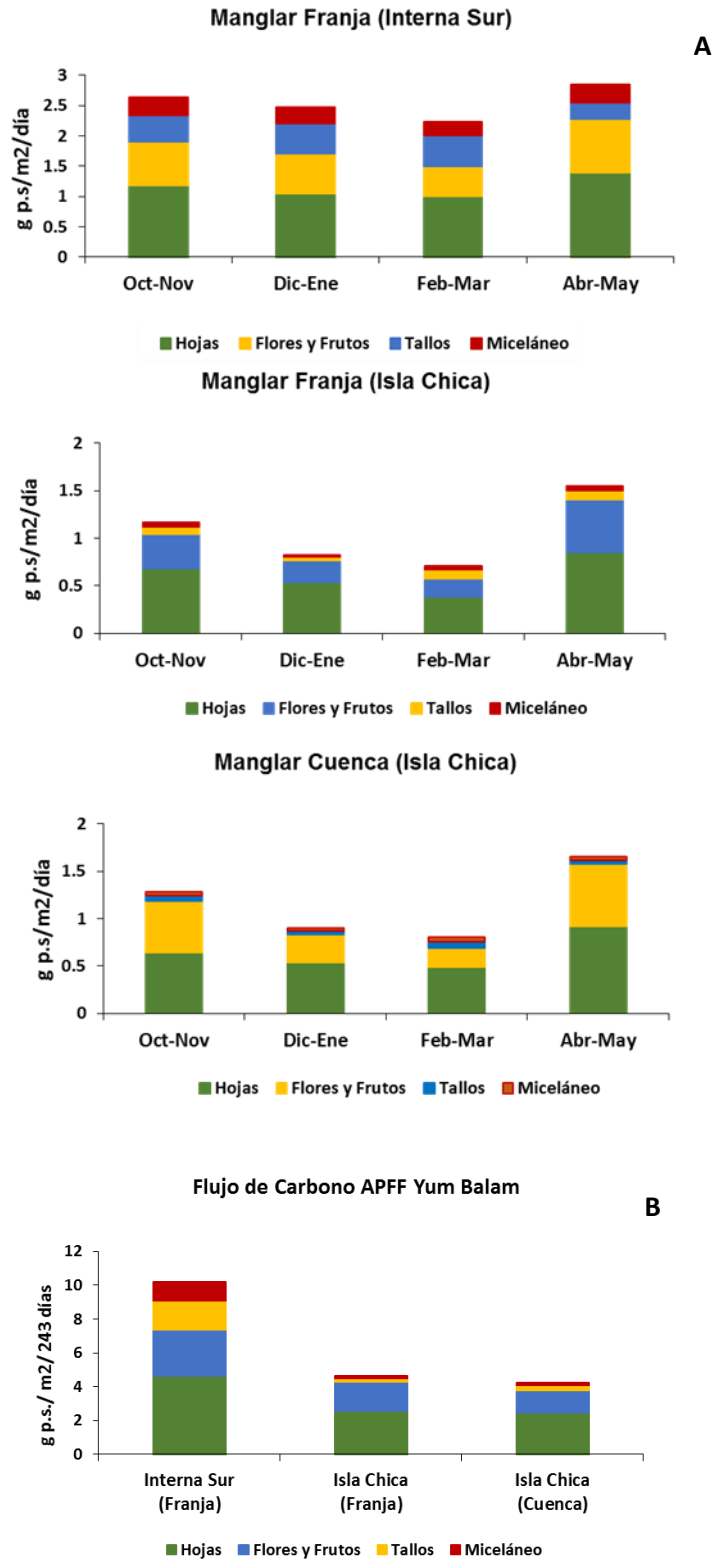


Figura 21. Caída de hojarasca (A) y flujo de carbono total (B) en tres distintos sitios de manglar en dos zonas diferentes del APFF Yum Balam. Autor: Oscar Pérez.

## VI.6. Comportamiento del Hidroperiodo en zonas de manglar del APFFYB

Los resultados presentados en la Figura 22 demuestran diferencias en las variaciones del nivel de agua del manglar entre el sitio conservado respecto al impactado. En el sitio conservado el patrón es de estar inundados casi constantemente, pero con el agua en movimiento, e intercalado con períodos en los que se encuentra sin agua superficial. Por otro lado, la zona degradada se mantiene sin agua superficial por varios días y de manera eventual se inunda. Los cambios en la microtopografía de la zona (generalmente rellenos), modificaciones del régimen hidrológico natural (por lo general obstrucciones al flujo-reflujo del agua marina y/o dulce) son de las principales causas de este comportamiento del hidroperiodo. Estos resultados permiten identificar necesidades de restauración urgentes en los manglares del APFFYB de Yum Balam, antes que este fenómeno se generalice a otras zonas, poniendo en riesgo el aprovechamiento de los servicios ambientales que provee este ecosistema.

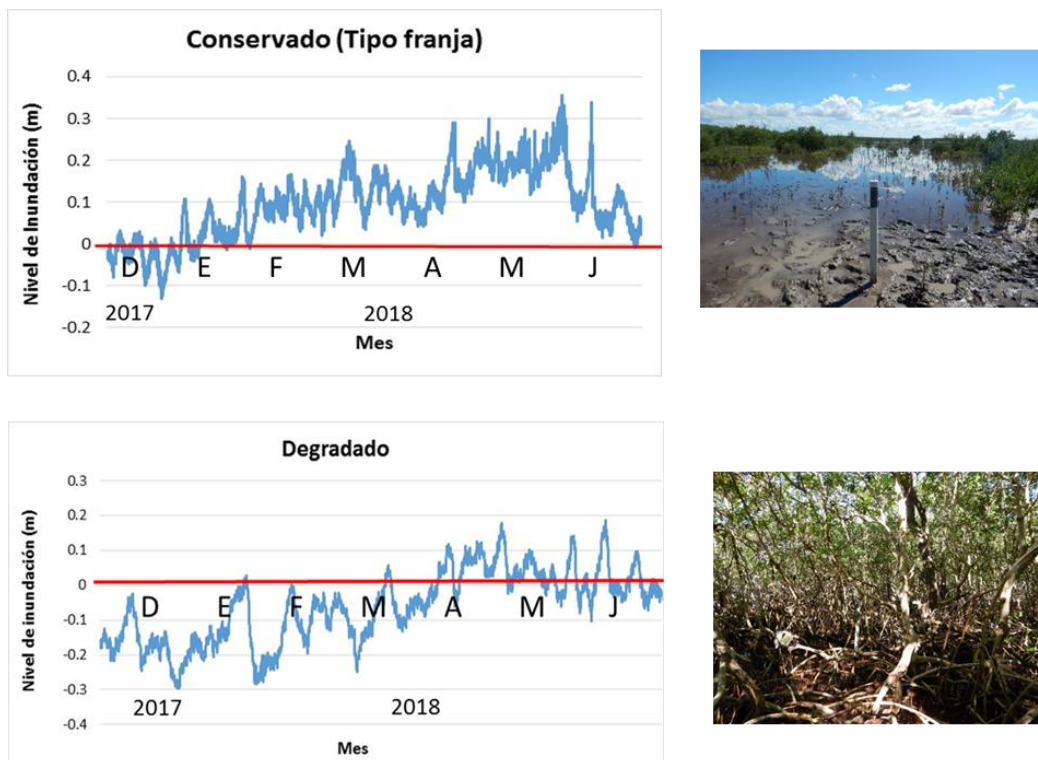


Figura 22. Comportamiento de los niveles de inundación en dos condiciones de manglares de APFFYB, conservado (arriba) y degradado (abajo). Autor: Oscar Pérez.

## VII. RESULTADOS EN ZONAS DOMINADAS POR PASTOS MARINOS

### VII.1. Parámetros fisicoquímicos de la columna de agua en el Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam.

Los parámetros que describen las concentraciones de sal y profundidades del área de estudio se muestran en la figura 23. La porción marino costero representa zonas de mayor profundidad ( $2.2 \pm 1.9$  m) y con menor transparencia ( $53 \pm 20\%$ ) en la columna de agua. Para zonas dentro de la laguna (interna insular) los porcentajes de transparencia fueron más heterogéneos, desde sitios muy turbios (25%) sobre la zona I02 a sitios con mayor transparencia (75%) en I01. Esta característica permite suponer la presencia de aportes de agua hacia la laguna, puesto que la profundidad es relativamente homogénea ( $0.6 \pm 0.4$  m). Por otro lado, se presentaron zonas de mayor salinidad (43 a 50 ups) sobre zonas internas de la laguna, con máximos de 50 ups hacia la zona protegida de Isla Chica (I01 y I02). Las menores salinidades ( $36.7 \pm 1$  UPS) se presentaron hacia la porción marina.

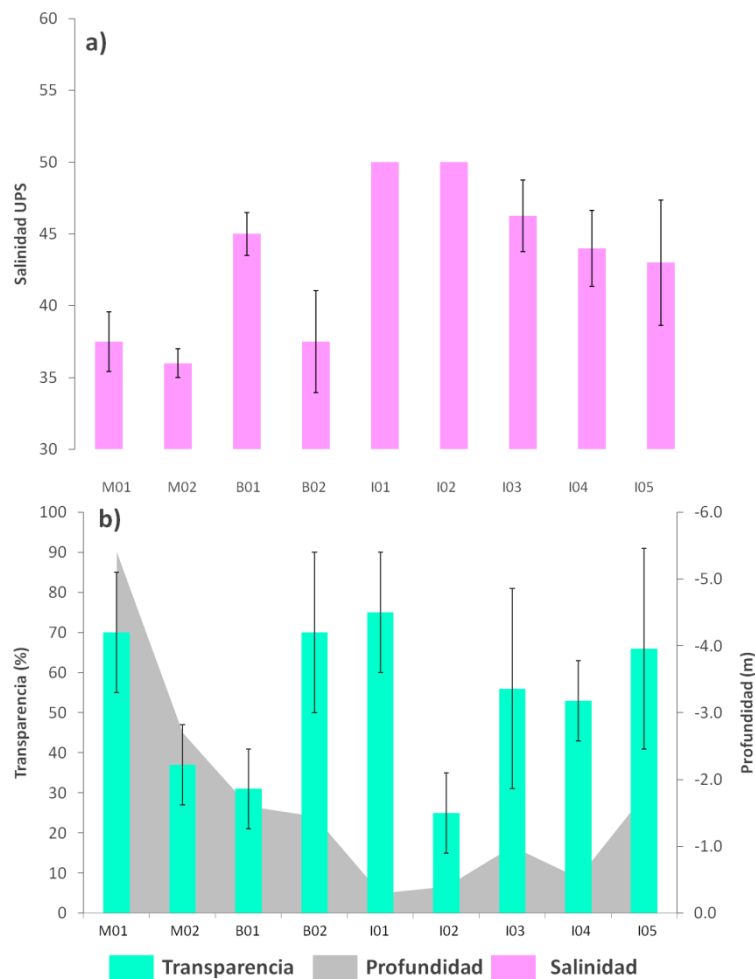


Figura 23. Distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna y zona marina del Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam.



## VII.2. Distribución espacial de praderas de Pastos Marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam

Del análisis supervisado de imágenes se obtuvo un área dominada por pastos marinos de 24,461.8 ha, de las cuales el 65% se encuentran en la porción interna de la laguna Yalahau (Fig. 24). De esta extensión las zonas con mayor cobertura de pastos marinos en proporción al tamaño total de la reserva fueron la zona B02 y las zonas internas I01 y 02 con el 10%.

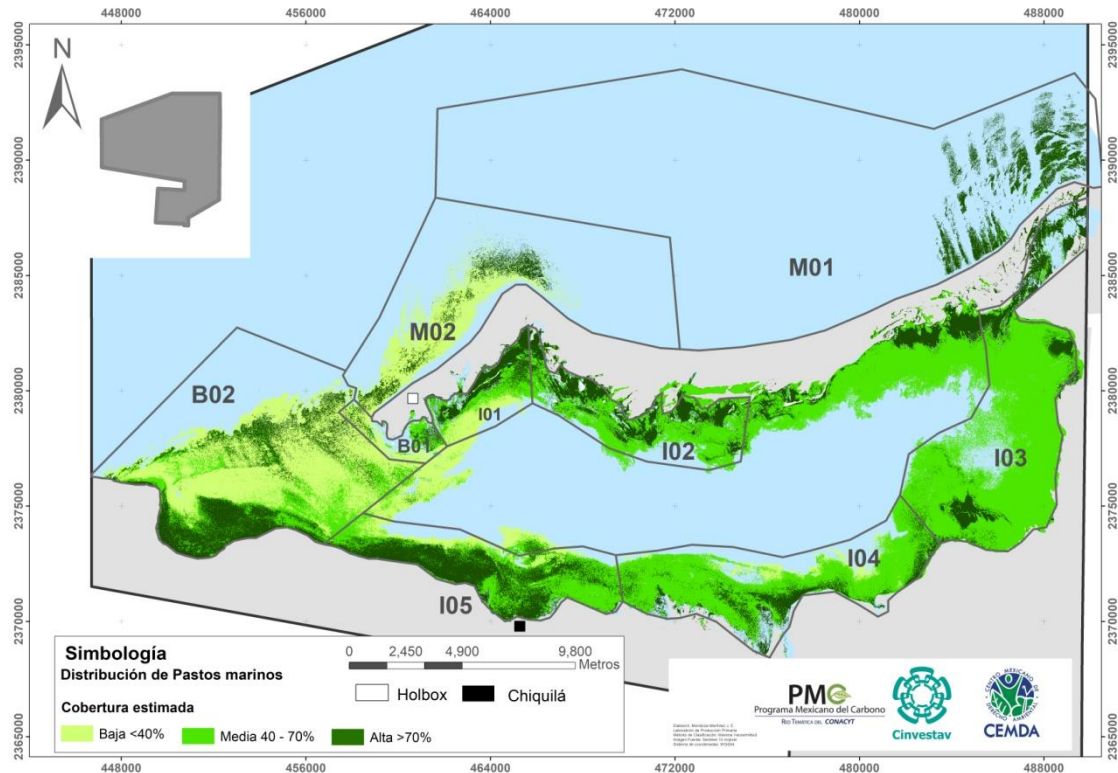


Figura 24. Distribución de pastos marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E

Las especies registradas fueron *Thalassia testudinum* (Tt) con mayor dominancia para todas las zonas con excepción de B02 (Tabla 9), donde *Syringodium filiforme* (Sf) y *Halodule wrightii* (Hw) se presentaron para las zonas con mayor influencia marina (M01, M02, B01, B02), y para zonas con influencia de descargas subterráneas (I05). El carbono promedio asociado a la biomasa de pastos marino del APFFYB fue de  $3.2 \pm 1.7 \text{ MgC ha}^{-1}$ , con promedios más altos de carbono total y área foliar ( $5.4 \pm 1 \text{ MgC ha}^{-1}$ ;  $3657.7 \text{ cm}^2$  respectivamente) para zonas internas de la laguna (I01 y I05).

Tabla 9. Características morfométricas de las praderas de pastos marinos del APFFYB. Tt *Thalassia testudinum*; Sf *Syringodium filiforme*; Hw *Halodule wrightii*. Área foliar calculada del largo por ancho de cada hoja.

Zona	Especies	Cobertura (%)	Carbono aéreo (MgC ha <sup>-1</sup> )	Carbono subterráneo (MgC ha <sup>-1</sup> )	Área Foliar (cm <sup>2</sup> )	Extensión (ha)
M01	Tt	95 ± 5	1.32 ± 0.2	3.06 ± 1.4	3114.3 ± 840.8	868.2
M02	Tt – Sf – Hw	47 ± 12	1.01 ± 0.8	0.39 ± 0.2	2241.8 ± 423	1492.2
B01	Tt – Sf – Hw	51 ± 28	2.1 ± 3.5	0.75 ± 0.9	1952.7 ± 2173	448.8
B02	Sf – Tt	40 ± 30	0.44 ± 0.1	1.15 ± 0.4	-	5710.8
I01	Tt	85 ± 15	3.6 ± 0.7	1.12 ± 0.2	2370.6 ± 640	990.1
I02	Tt	75 ± 20	2.35 ± 2.5	1.59 ± 0.8	3530.2 ± 2112.1	4845.4
I03	Tt	88 ± 10	2.44 ± 0.5	0.77 ± 0.8	934.1 ± 606.4	4695.8
I04	Tt	75 ± 25	0.22 ± 0.1	0.58 ± 0.3	1692.4 ± 961.2	2933.4
I05	Tt – Sf – Hw	70 ± 5	5.33 ± 1.2	0.81 ± 0.3	4944.8 ± 1335	2477.4

La zona de Boca (B01 y B02) se caracterizó por coberturas más bajas (<40%) y camas multi específicas dominadas por Tt y Sf. Cabe resaltar la importancia que representan las zonas M01 y B02 en la porción marina, y en la Interna las I01, I02 y I05 por presentar porcentajes de cobertura altos (>70%) con parches extensos y bien conservados de pastos marinos (Fig. 25).

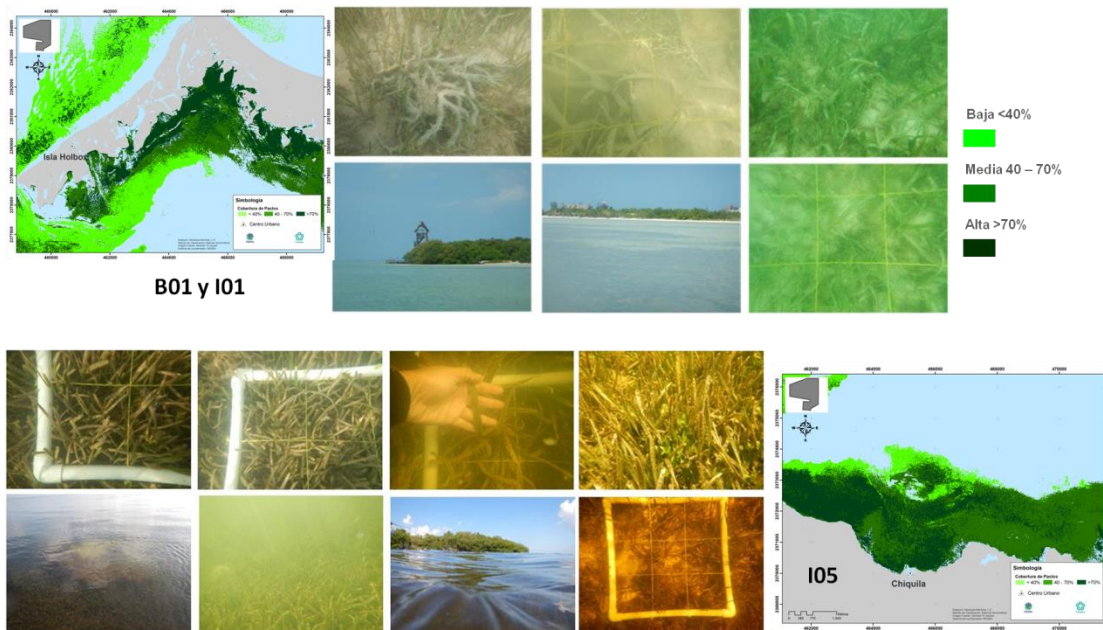


Figura 25. Paisajes submarinos dominantes de las zonas de Boca (B01 y I01) y zona interna (I05) en la APFFYB.

### VII.3. Carbono Azul de Pastos Marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam

#### *Variación espacial de los almacenes de carbono (Biomasa aérea/subterránea/sedimentos)*

Los almacenes de carbono fueron heterogéneos de acuerdo con la zona geográfica (Fig. 26). La biomasa viva de pastos marinos sobre la APFFYB representa un almacén de carbono promedio de 3.2 MgC ha<sup>-1</sup> con un máximo para la zona I05 y mínimo para la zona interna I04, y boca de la laguna Yalahau (B02). El almacén de carbono en los sedimentos fue menos heterogéneo, registrándose mayores reservas por unidad de área para las zonas de boca (B01) y zona marina (M01) con 601.9 ± 219.9 MgC ha<sup>-1</sup> y 329 ± 71.2 MgC ha<sup>-1</sup>.

El comportamiento general de los almacenes de carbono en sedimentos dominados por pastos marinos del APFFYB, muestra mayor capacidad en zonas marinas y de la Boca, y mayores almacenes en biomasa viva para la zona interna. Esta distribución espacial de los almacenes de carbono aéreos y subterráneos llama la atención porque por lo general se esperaría que donde se observan mayor carbono aéreo también se registre mayor carbono subterráneo. Sin embargo, las condiciones de transparencia y salinidad del agua, así como la hidrodinámica podrían estar jugando papeles importantes como controladores de procesos que favorezcan o no el almacén de carbono orgánico en las praderas de pastos marinos del ANP de Yum Balam.

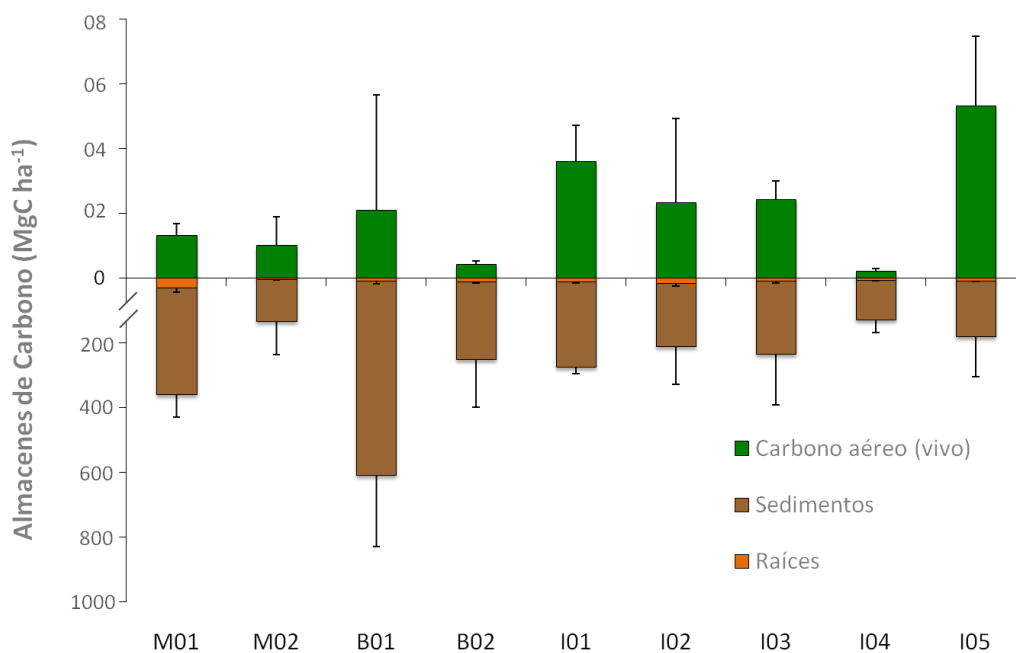


Figura 26. Variación espacial de los almacenes de carbono vivo (aéreo/raíces), y sedimentos de pastos marinos del Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam.

### *Variación espacial de las reservas totales de Carbono asociado a zonas de pastos marinos en la Reserva de Yum Balam*

La alta capacidad para almacenar carbono orgánico en sedimentos y biomasa viva de los ecosistemas de Carbono Azul se ha estado documentando con mayor frecuencia. El análisis de las áreas con presencia de pastos marinos junto a los almacenes promedio de la APFFYB demuestra una alta capacidad para almacenar y secuestrar carbono. Se estiman un total de 19.3 TgCO<sub>2</sub> equivalente (millones de Toneladas). Las zonas con mayores reservas de carbono se localizan en las zonas B02, I03 y I02 con  $5.05 \pm 1$  TgCO<sub>2</sub> eq.,  $3.9 \pm 0.9$  TgCO<sub>2</sub> eq., y  $3.5 \pm 0.7$  TgCO<sub>2</sub> eq., respectivamente (Fig. 27).

La zonificación seleccionada para el análisis espacial de las reservas de carbono, muestra mayor contribución de las zonas internas de la Laguna Yalahau (59.4%), y menor para las zonas con influencia marina (9.2%). Estas diferencias pueden ser producto de las condiciones hidrodinámicas, transparencia y salinidad de cada zona. La hidrodinámica actúa en conjunto con la profundidad, disponibilidad de luz, turbidez y salinidad para determinar la presencia y características de las praderas de pastos marinos, las cuales a su vez depende la fijación de carbono. En sistemas semicerrados (bahías y lagunas costeras) las corrientes son atenuadas permitiendo que el asentamiento y estabilidad de las praderas de pastos marinos sea más exitoso con respecto a los ambientes abiertos donde las macrófitas se encuentran “expuestas” a corrientes de mayor magnitud. La hidrodinámica en sistemas cerrados favorece tiempos de residencia del agua más largos mientras que en los abiertos hay por lo general libre circulación de masas de agua potencialmente cargadas de nutrientes y material en suspensión.

Este aspecto adquiere especial importancia sobre zonas cercanas a centros urbanos importantes de la reserva como son las de Boca (B01) e interna (I04), donde la cercanía de los centros urbanos de Holbox y Chiquilá podría significar actuales y futuras presiones sobre estas reservas de carbono.

Por otra parte, considerando que las emisiones anuales de CO<sub>2</sub>eq., por consumo de hidrocarburos “per capita” son de 3.7 Mg por año (INECC-Semarnat, 2013), la conservación de las praderas de pastos marinos de la APFFYB mitiga las emisiones de 4.98 millones de personas, sobrepasando en un 300% el número de habitantes (1,5 millones de personas) reportado para todo el Estado de Quintana Roo en 2015.

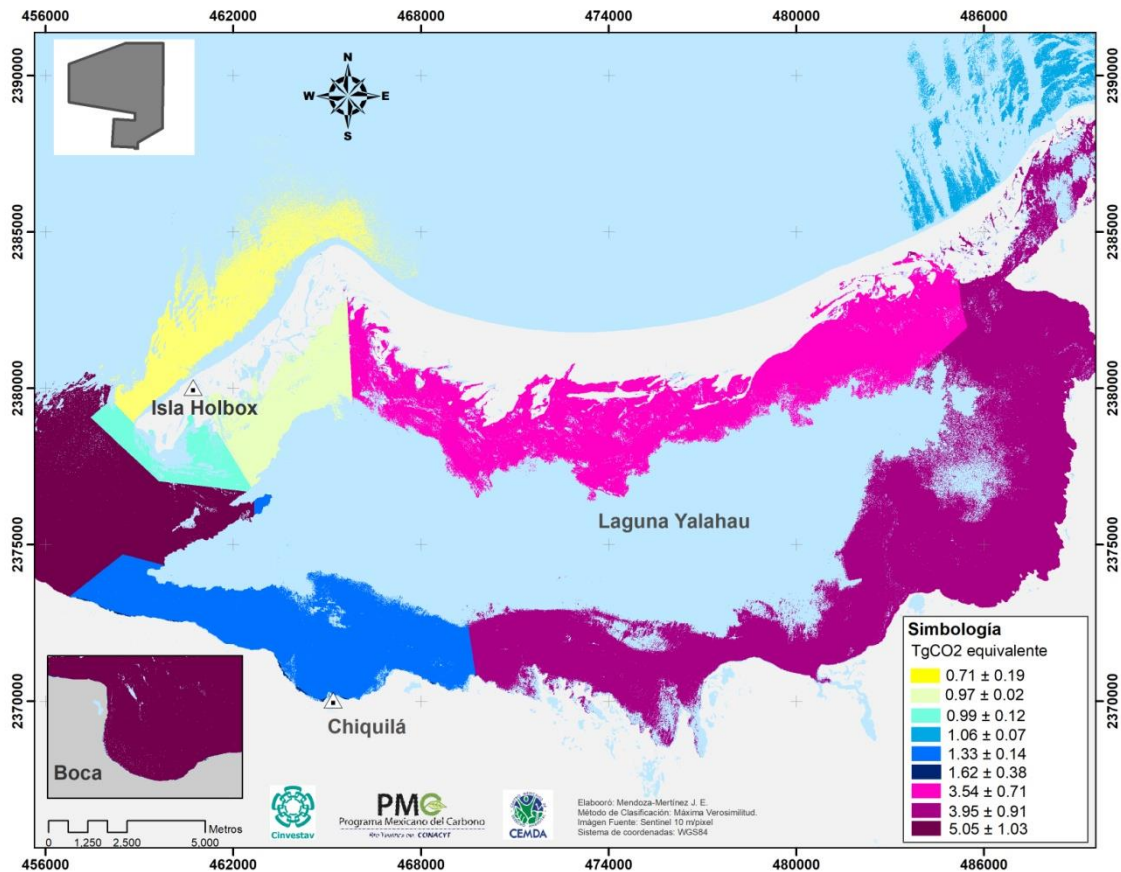


Figura 27. Distribución espacial del Carbono Total/Carbono Ecosistémico asociado a zonas de pastos marinos en el Área de Protección de Flora y Fauna Reserva de Yum Balam. Autor: Mendoza-Martínez J.E

#### VII.4. Vulnerabilidad espacial de los almacenes de carbono asociado a zonas de pasto marinos en la Reserva de Yum Balam

Parte de los planes y estrategias de conservación de las ANPs es el estudio analítico de los cambios que sufren sus ecosistemas a lo largo del tiempo por diversos factores como la actividad humana o los fenómenos naturales. La fragmentación del paisaje constituye uno de los elementos más importantes para evaluar la condición y nivel de conservación de los ecosistemas. Dadas las amenazas reportadas y proyectadas a futuro para la APFFYB, existen zonas de pastos marinos ya con algún grado de vulnerabilidad al crecimiento urbano. La figura 28 muestra la relación que existe entre la condición (porcentajes de cobertura) de las praderas de pastos marinos y la distancia lineal entre el poblado de isla Holbox y Chiquilá. De acuerdo con este análisis, el 35% de las estaciones de muestreo cercanas a Isla Holbox representan porcentajes de cobertura medios (<70%), lo que significaría una presión adicional si el desarrollo urbano incrementa para esta zona. Para la parte continental, las praderas con mejor condición se encuentran a una distancia considerable (1.2 km) del centro urbano de Chiquilá. Sin

embargo, existen zonas (16% de las estaciones) con mala condición que se relacionan con una alta influencia antropogénica.

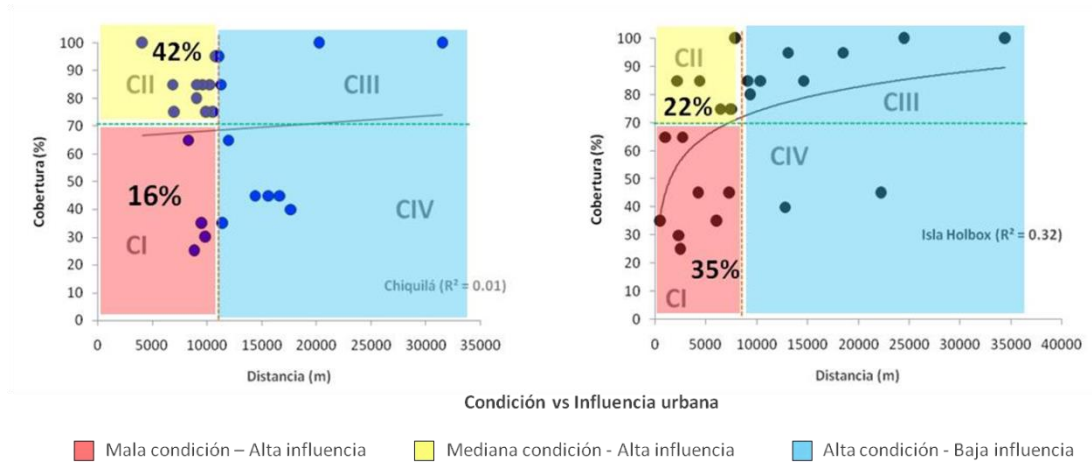


Figura 28. Evaluación espacial de la condición de pastos marinos (Cobertura %) con la presencia de centros urbanos (Distancia m). Autor: Mendoza-Martínez J.E.

El análisis de los resultados del presente estudio puede llegar a ser relevante para la toma de decisiones y la planificación del desarrollo, manejo y conservación de los ecosistemas de pastos marinos de la APFFYB, puesto que para estas zonas (de mayor vulnerabilidad por actividad antropogénica) fueron las que presentaron mayor almacén de carbono en sedimentos (B01) y las coberturas de pastos más densas (70 – 80%). Aunado a estas condiciones, la baja transparencia de la columna de agua y menor profundidad las convierten en sitios de especial importancia (Fig. 29).

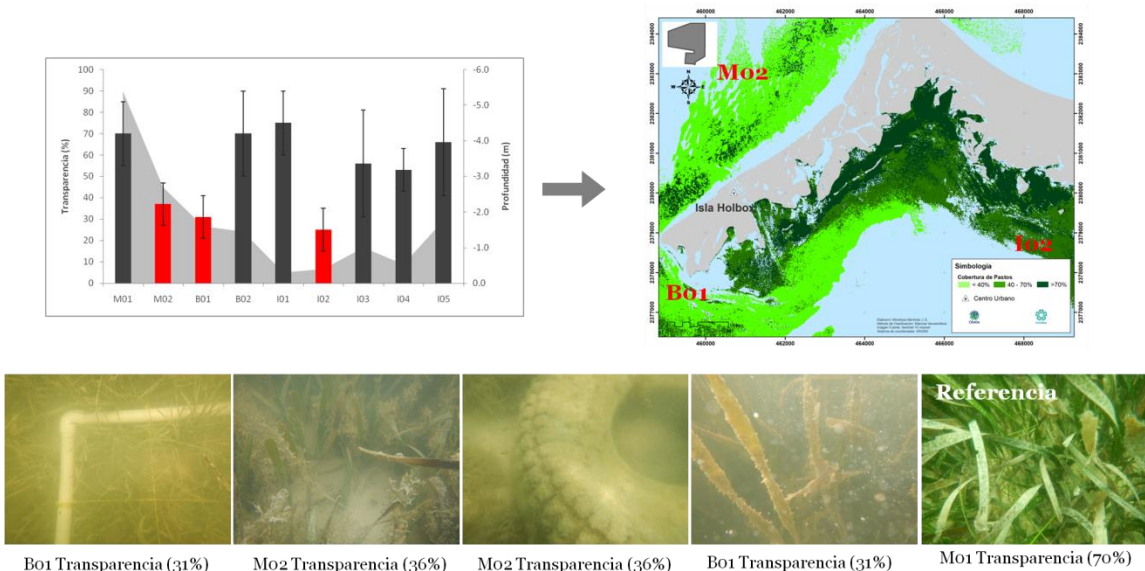


Figura 29. Zonas vulnerables de pastos marinos por cambios en la transparencia en la columna de agua. Autor: Mendoza-Martínez J.E.

## VIII. CONSIDERACIONES FINALES

El análisis de la información recopilada en campo y analizada en laboratorio de los ecosistemas de Carbono Azul en la APFFYB, permitió estimar un valor promedio para el almacén total de carbono en manglares de  $750.6 \pm 150.8 \text{ MgC ha}^{-1}$  que con una extensión total de 6,495.13 ha representa una reserva de 19.2 millones de Toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$ .

Respecto a los pastos marinos, estos tienen una extensión aproximada de 24,461.8 ha con un valor promedio del almacén total de carbono de  $256.5 \pm 146.3 \text{ MgC ha}^{-1}$ , lo que representan 19.3 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente.

Así mismo, se estima que la conservación de los ecosistemas de Carbono Azul de la APFFYB contribuye a evitar emisiones de aproximadamente 38.4 millones de Toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente (Tabla 10). Esta contribución de emisiones evitadas de GEIs es equivalente a las emisiones de 9.4 millones de personas al año por uso de hidrocarburos según cifras del INECC (2013).

Tabla 10. Resumen de los almacenes de carbono orgánico por ecosistema ( $\text{MgC ha}^{-1}$ ) y total ( $\text{Mg C}$ ), así como las reservas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  con las que contribuye al APFF de Yum Balam a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Ecosistema	Extensión (ha)	C Total $\text{MgC ha}^{-1}$	C Ecosistémico $\text{Mg C}$	Mg $\text{CO}_2$ eq
Manglar	6,495.13	$750.6 \pm 150.8$	5, 234, 555.1	19, 210, 817.2
Pastos Marinos	24,461.8	$256.5 \pm 146.3$	5, 247, 121.0	19, 256, 934.2
<b>TOTAL</b>	<b>30, 956.93</b>		<b>10, 474, 114.4</b>	<b>38, 467, 751.4</b>

Especialmente el Carbono Azul en el APFFYB presenta alta variabilidad tanto para los almacenes de los manglares como de los pastos marinos. Esta característica indica la riqueza de ambientes que favorecen condiciones diferentes y con ello servicios ambientales también diferentes y variables. Esta condición es importante para las políticas de desarrollo y manejo sostenible del área, ya que significa que no es recomendable aplicar la misma estrategia de aprovechamiento, ni tampoco las mismas acciones de conservación y/o restauración en toda el área, sino considerar sus particularidades para que las acciones que se emprendan permitan el disfrute de sus ecosistemas con visión de largo-plazo y transgeneracional.

Un tema que queda pendiente es el de los flujos de carbono tanto verticales como laterales. Se inició con el monitoreo del flujo vertical por captura de CO<sub>2</sub> a través del “proxy” de caída de hojarasca. Se recomienda darle continuidad este programa de monitoreo ya iniciado, y comenzar otros que son importantes en proveer información para la toma de decisiones como la captura de árboles adultos.

En el caso particular de los pastos marinos, los escasos trabajos relacionados con el Carbono Azul en este ecosistema brinda la oportunidad de generar conocimiento basado en investigaciones acordes a los lineamientos del IPCC, sugiriendo la aplicación de nuevas tecnologías que ayuden a esclarecer los factores y procesos relacionados con la distribución espacial de pastos marinos, y generar mapas temáticos de relevancia y utilidad para la toma de decisiones. Por ejemplo, elaboración de productos cartográficos a una resolución espacial de mayor detalle que el actual estudio serán útiles en la evaluación de las tasas de pérdida a largo plazo y las causas que la promueven.

De lo anterior también se desprende la necesidad de contar con una estrategia con prioridades de investigación y monitoreo en materia de Carbono Azul, impactos y servicios ambientales. La participación ciudadana con apoyos gubernamentales, de la iniciativa privada e internacionales, apoyados por académicos, es una oportunidad de avanzar en estructurar las mejores decisiones que beneficien a los ecosistemas con oportunidades económicas para los pobladores de esta ANP.



## IX. REFERENCIAS

### *Ecosistemas de Manglar*

- Acosta–Velázquez J. y A. Ruíz–Luna. (2007). Variación en la cobertura, distribución y estructura de los manglares del complejo lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas (1990-2005). En: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.). Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. CICIMAR-IPN, La Paz, Baja California Sur, México, p 127-141.
- Ball, M.C. (2002). Interactive effect of salinity and irradiance of growth: implications for mangrove forest structure along salinity gradients. *Trees* 16: 126 – 139.
- CCA. (2016). Comisión para la cooperación ambiental (2016). *North America's Blue Carbon: Assessing Seagrass, Salt Marsh and Mangrove Distribution and Carbon Sinks*. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation, 54 pp.
- Chave, J., Andalo, C., brown, S., Cairns, M., Chambers, J. and D. Eamus. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87–99.
- CONABIO. (2009). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2009). *Manglares de México: Extensión y distribución* 2ª ed. 99 pp.
- CONABIO. (2016). Distribución de los manglares en México en 2015, escala: 1:50000. edición: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM). Ciudad de México, México.
- Day, J. W., Conner, W. H., Ley-Lou, F., Day, R. H. and A. M. Navarro. (1987). The productivity and composition of mangrove forests, Laguna de Terminos, Mexico. *Aquatic Botany*, 27(3), 267-284.
- INECC-Semarnat. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. México.
- Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Marty, G., Betoulle, J. L., and Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia*, 115(1-2), 39-53.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., and Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159.
- Herrera Silveira, J. A., A. Camacho R., E. Pech, M. Pech, J. Ramírez R. y C. Teutli H. (2016). Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. *Terra Latinoamericana* 34: 61-72.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (eds.) (2014). *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature.
- INEGI. (1995). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Estadísticas del Medio Ambiente*. México.
- Kauffman, J., and Donato, D. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests (No. CIFOR Working Paper no. 86, p. 40p). Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia.

- Kauffman, J. B., Heider, C., Norfolk, J., and Payton, F. (2014). Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. *Ecological Applications*, 24(3): 518-527.
- Keddy, P. (2010). *Wetlands ecology principles and conservation*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Lugo, A., and Snedaker, S. (1974). The ecology of mangroves. *Annual review of ecology and systematics*, 39-64.
- Mcleod, E., Chmura, G., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C., and Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9(10): 552-560.
- Mitsch, W.J. and Gosselink J.G. (2007) *Wetlands*. 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Pendleton, L., Donato, D., Murray, B., Crooks, S., Jenkins, W., Sifleet, S., and Megonigal, P. (2012). Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PloSone*, 7(9): e43542.
- Vázquez-Lule, A. D.; J. R. Díaz-Gallegos y M. F. Adame. Caracterización del sitio de manglar Yum Balam, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2009). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.
- Reddy, R., and R. DeLaune. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*. CRC, Taylor & Francis, Boca Raton.
- Ross, M.S., Ruiz, P.I., Telesnicki, G.J. and J.F. Meeder. (2001). Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (USA). *Wetlands Ecology and Management*, 9, 27–37.
- Schaeffer-Novelli, Y., Cintron-Molero, G., Rothleder A. R., and Camargo, T. M. (1990). Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. *Estuaries*, 13(2), 204–218. doi:10.2307/1351590.
- Smith III, T.J. and K.R. Whelan. (2006). development of allometric relations for three mangrove species in South Florida for use in the greater Everglades Ecosystem restoration. *Wetlands Ecology and Management*, 14, 409–419.
- Valderrama-Landeros, L., Rodríguez-Zúñiga M., Troche-Souza C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J., Vázquez-Balderas B., Cruz-López M., and Ressel R., (2017). *Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, 128 pp.
- Vasilas B.L. (2011). Hydric soils and wetland functions. En: *Mid-Atlantic Hydric Soils Committee. A guide to hydric soils in the Mid-Atlantic Region*, ver. 2.0. L.M. Vasilas, B.L. Vasilas (eds.). usda, nracs, Morgantown, WV. Available on cd and at <<http://soils.usda.gov/technical/>>
- Zarco-Espinosa, V.M., J.I. Valdez-Hernández, G. Ángeles-Pérez y O. Castillo-Acosta. (2010). Structure and diversity of arboreal vegetation in the Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. Programa Forestal Colegio de Postgraduados División Académica de Ciencias Biológicas, ujat.

### *Ecosistemas de pastos marinos*

- Fourqurean, J.W., A.W. Willsie, C.D. Rose and L.M. Rutten. (2001). Spatial and temporal pattern in seagrass community composition and productivity in south Florida. *Marine Biology* 138: 341-354.
- Green, P.E., J.P. Mumby, A.J. Edwards y D.C. Clark. (2000). *Remote sensing handbook for tropical coastal management*. UNESCO, London, England. 320 pp.
- Chavez, P.S. Jr. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sens. Environ.* 24:459–479.
- Zar, J.H. (1999). *Biostatistical analysis*. 4th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA. 660 pp.
- Rouse, J.W., Has, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third ERTS Symposium (NASA)*, Washington, DC, USA
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N., (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 58, pp289–298.
- Barrera F., E. (2012). Caracterización y mapeo de hábitat bentónicos en Bahía Magdalena, B.C.S. mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos. Tesis de licenciatura en manejo sustentable de zonas costeras. Facultad de Ciencias, UNAM. México
- Bulthuis DA. (1990). Leaf surface area. En R.C Phillips. y C.P. McRoy, (Eds.), *Seagrass research methods* (p. 69-70). UNESCO: Paris.
- CARICOMP. (2001). *CARICOMP Methods Manual - Level I: Manual of methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean* (91 pp). Mona, Kingston, Jamaica: CARICOMP Management Center, University of the West Indies, Mona, Kingston, Jamaica y Florida Institute of Oceanography, University of South Florida, St. Petersburg Florida, U.S.A.
- Carrasquilla-Henao, M., Ocampo, H. A. G., González, A. L., and Quiroz, G. R. (2013). Mangrove forest and artisanal fishery in the southern part of the Gulf of California, Mexico. *Ocean & coastal management*, 83, 75-80.
- Casco, R. (2004). La zona costera de México: definición. *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, 1-4.
- Díaz, J. M. (1998). Maps for Colombian reefs. *Reef Encounter*, 12: 11-12.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2012). Decreto por el que se modifica al diverso por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicada frente a las costas de los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado del Estado de Veracruz Llave. Jueves 29 de Noviembre. DCCX, 21:1-14
- Herrera-Silveira, J. (2006). Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotropico* 19(2):94-108.

- INECC-Semarnat. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. México.
- Lot-Helgueras, A. (1971). Estudios sobre fanerógamas marinas en las cercanías de Veracruz, Veracruz. *Anales del Instituto de Biología*. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica, 1, 1-48.
- Luczkovich, J., Wagner, T., Michalek, J., and Stoffle, R. (1993). Discrimination of coral reefs, seagrass meadows, and sand bottom types from space: a Dominican Republic case study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(3), 385-389.
- Milner, C. and R.E. Hughes. (1968). Methods for the Measurement of Primary Production of Grassland. Blackwell Scientific, Oxford.
- Monroy I., R. C. y Travieso-Bello, A. C., (2006). Herramientas técnicas para la planificación: índices, mapas, bases de datos y sistemas de información geográfica. En Moreno-Casasola, P., Peres Barbosa R., E. y Travieso-Bello, A. C., Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Instituto de Ecología, A.C. CONANP y Gobierno del estado de Veracruz-Llave, Xalapa, Ver, México.
- Peter-Castro., Ng, P. K., and Ahyong, S. T. (2004). Phylogeny and systematics of the Trapezii dae Miers, 1886 (Crustacea: Brachyura), with the description of a new family. Magnolia Press.
- Pittman, S. J., Connor, D. W., Radke, L., and Wright, D. J. (2011). 1.09-Application of estuarine and coastal classifications in marine spatial management. *Treatise on estuarine and coastal science*, 163-205.
- Rioja-Nieto, R. (2007). Landscape ecology and conservation of the Cozumel Reefs National Park, Mexico (Doctoral dissertation, University of Warwick).
- Vargas-Hernández, J. M., Hernández-Gutiérrez, A., and Carrera-Parra, L. F. (1993). Sistema Arrecifal Veracruzano. En S. Salazar-Vallejo, and N. E. González (Comps.), Biodiversidad marina y costera de México (pp. 559-575). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- Zainal, A. J. M., Dalby, D. H., and Robinson, I. S. (1993). Monitoring marine ecological changes on the east coast of Bahrain with Landsat TM. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*; (United States), 59(3).