

**Almacenamiento de carbono azul en praderas de pastos
marinos en la Laguna Yalahau de la Reserva Yum Balam
(Holbox, Quintana Roo)**

Tesis que presenta

Ing. Amb. Diana Belén Herver Hernández

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO AZUL EN
PRADERAS DE PASTOS MARINOS EN LA LAGUNA
YALAHAU DE LA RESERVA YUM BALAM
(HOLBOX, QUINTANA ROO).**

TESIS

**Para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS
(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)**

PRESENTA:

Ing. Amb. Diana Belén Herver Hernández

Directora:

Dra. Margarita Elizabeth Gallegos Martínez

Codirectora:

Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández

Ciudad de México, 16 de julio de 2018.

*“El uso apropiado de la ciencia no es
conquistar la naturaleza, sino vivir en ella”*

Barry Commoner

Comité Tutorial

Directora:

Dra. Margarita Elizabeth Gallegos Martínez. Departamento de Hidrobiología. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Codirectora:

Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández. Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología, Unidad Académica Mazatlán. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México.


Al jurado designado por la
Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente

de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó

DIANA BELÉN HERVER HERNÁNDEZ

El día **16** del mes de **julio** del año **2018**

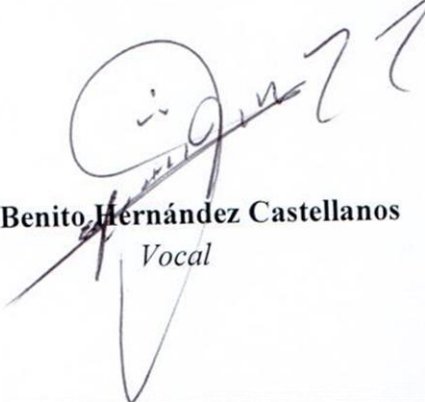
Miembros del Jurado



Dr. Mariano Gutiérrez Rojas
Presidente



Dr. Juan Gabriel Rivera Martínez
Secretario



Dr. Benito Hernández Castellanos
Vocal

Agradecimientos

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio 003893; por lo que agradece la beca recibida (738952 / 597900) para el desarrollo de esta tesis.

Esta tesis fue desarrollada gracias al apoyo recibido del proyecto “Estado de salud, conservación y vulnerabilidad de los ecosistemas de pastos marinos del litoral del Golfo de México” (Fondo SENER-CONACyT Hidrocarburos proyecto No: 201441) y el apoyo parcial del proyecto CONACyT-PDCAPN 2015-01-473 “Carbono azul en ambientes costeros de México”.

Agradecimientos personales

A **Dios**, por acompañarme a lo largo de mi vida, por poner a gente maravillosa en mi camino, otorgarme una gran familia y por dejarme alcanzar un logro más.

A mi directora de tesis, la **Dra. Margarita Elizabeth Gallegos Martínez**, mi agradecimiento más profundo por hacer esto posible, por adentrarme al mundo de los pastos marinos, por su paciencia, confianza y creer en mí, por su disposición y conocimiento brindado en la elaboración de este trabajo, principalmente quiero agradecer por su apoyo personal en los momentos difíciles y motivarme a continuar con dedicación y perseverancia. Es un gran ejemplo a seguir, tanto en lo profesional como en lo personal. Gracias por todo.

A mi codirectora, la **Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández**, por permitirme realizar una estancia en la Unidad Académica Mazatlán del ICMYL-UNAM, en la cual pude aprender mucho, por su disposición, por todo su valiosa e importante aportación y conocimiento brindado sin el cual el trabajo no sería posible. Agradezco también al **Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza** por la ayuda brindada.

A los **sinodales** de esta tesis: **Dr. Mariano Gutiérrez Rojas**, **Dr. Juan Gabriel Rivera Martínez**, y al **Dr. Benito Hernández Castellanos**, por sus valorables sugerencias y comentarios que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

Al **Laboratorio de Pastos Marinos** del departamento de Hidrobiología de la UAM unidad Iztapalapa, por su conocimiento, explicaciones y motivación para alcanzar esta meta, en especial al **M. en C. Fernando Valdez Cruz**, **Hidrobiol. Eduardo Hernández Elizalde**, **Hidrobiol. Ivanhoe Ricardo Herrera Moro Chao** y a la **Biol. Iliana Pérez Espinosa** por toda su ayuda y su amistad.

Al **Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología** del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM Mazatlán, por la asesoría y apoyo brindado en la realización de los análisis de actividad de ^{210}Pb en sedimentos, por acogerme, ayudarme y explicarme con paciencia todo, en especial a la **M. en C. Libia Hascibe Pérez Bernal** por la asesoría y el apoyo brindado durante la realización de los análisis antes referidos, de igual forma al **Biol.**

Horacio Carranza Bautista, M. en C. Perla López Mendoza y al Quím. Giovanni Aldana Gutiérrez, mis más sinceros agradecimientos, gracias por su amistad y buenos momentos.

A mi **familia**, por apoyarme incondicionalmente a lo largo de toda mi vida, por darme ánimos, consejos y motivos para salir a delante, por siempre recibirme con los brazos abiertos cuando llegaba a Xalapa, por su eterno amor y por haber compartido con ilusión este trayecto.

A mis **compañeros, amigos y personas especiales** que conocí en el posgrado y aquellos que ya conocía y nuestra amistad se hizo más fuerte en estos años, en especial a **Betty, Karen, Laura, Adriana, Itái, Sergio, Oscar E., Marco y Juan**, gracias por compartir esta nueva etapa conmigo con risas y buenos momentos, por su apoyo, consejos y una gran amistad que siempre apreciaré.

Al **Posgrado en Energía y Medio Ambiente**, así como a la **UAM** por aceptarme y forjarme como profesional.

Dedicatorias

Dedico este trabajo primero que todo a mis padres **Chely** y **Chino**, mi eterno agradecimiento y amor, gracias a ustedes estoy cumpliendo con el sueño de realizar una maestría porque son mi fuente de motivación e inspiración, por sus consejos, apoyo incondicional, por aquellas llamadas telefónicas en donde ya quería regresar a Xalapa y donde me daban palabras de aliento, por nunca dejar que me rindiera, por ser mi ejemplo a seguir, mis amigos, pero sobre todo porque ustedes han dado razón a mi vida. Los amo tanto.

A mi hermano **Abad**, por ser mi cómplice y ayudarme a iniciar esta aventura, por pasar por mí en aquellas madrugadas en las que llegaba a la casa o en las que me dejaba en la terminal de autobuses, por poder disfrutar los momentos en los que nadie podía contra nosotros, por darme ánimos y hacerme reír. De igual manera dedico este trabajo a mi cuñada **Maggie**, y a mi amor chiquito, mi sobrino **Bruno**, gracias por querer tanto a mi hermano, a la familia y llenarla de mucho amor.

A mi abuelita **Mamá Chelita**, por estar conmigo desde que nací, por cuidarme, apoyarme y por siempre pedir por mí, por ser la base de toda la familia y mantenernos unidos.

A mi compañero de vida **Sergio**, por ocupar un espacio muy grande y especial en mi corazón, por ser mi mejor amigo durante todos estos años, escucharme cuando tuve momentos difíciles en los cuales pensaba que las cosas no iban a mejorar pero siempre hacerme entrar en razón y decirme las palabras necesarias que me hacían superar los retos, gracias por motivarme a seguir a delante con esto, por apoyarme y no dejar que la distancia fuera un impedimento para nosotros, por las llamadas telefónicas para platicar nuestro día, por vivir conmigo los mejores momentos y hacerlos mágicos, por brindarme su cariño, paciencia, ayudarme con mis trabajos del posgrado y su confianza, por formar tantas nuevas historias juntos, pero sobre todo gracias por entrar a mi vida. Recuerda: “Those three words are said too much they're not enough” Te amo hoy, mañana y siempre.

Índice general

Comité Tutorial.....	I
Agradecimientos.....	III
Agradecimientos personales.....	IV
Dedicatorias.....	VI
Índice general.....	VII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
CAPÍTULO 1.....	9
1. Antecedentes.....	9
1.1. Investigaciones Recientes.....	9
1.2. Investigaciones en México.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2. Preguntas de investigación.....	12
CAPÍTULO 3.....	13
3. Objetivos.....	13
3.1. Objetivo General.....	13
3.2. Objetivos Particulares.....	13
CAPÍTULO 4.....	14
4. Materiales y métodos.....	14
4.1. Zona de estudio.....	14
4.2. Muestreo.....	17
4.3. Procesamiento de las muestras.....	21
4.4. Análisis de laboratorio.....	21
4.4.1. Granulometría.....	21
4.4.2. Carbono orgánico y materia orgánica.....	22
4.4.3. Cobertura vegetal de los sedimentos de la laguna Yalahau.....	24

4.4.4.	Carbonato de calcio en el núcleo HX10.....	24
4.4.5.	Composición elemental del núcleo HX10.....	25
4.4.6.	Fechado del núcleo HX10 (tasas de acumulación y modelos de edad) ..	27
4.4.7.	Procedencia de materia orgánica en los sedimentos del núcleo HX10 ..	28
4.4.8.	Almacenamiento de carbono en el núcleo HX10.....	28
4.5.	Análisis Estadísticos.....	30
CAPÍTULO 5	.....	31
5.	Resultados y discusión	31
5.1.	Granulometría.....	31
5.1.1.	Tamaño gráfico promedio (Mz).....	31
5.1.2.	Desviación estándar gráfica inclusiva (σ)	31
5.1.3.	Asimetría gráfica inclusiva (Ski).....	34
5.2.	Carbono orgánico	35
5.3.	Cobertura vegetal	38
5.4.	Concentración de carbono orgánico en el núcleo HX10.....	43
5.5.	Carbonato de calcio en el núcleo HX10.....	45
5.6.	Composición elemental en el núcleo HX10.....	48
5.7.	Tasas de acumulación y modelos de edad en el núcleo HX10.....	51
5.8.	Procedencia de la MO en los sedimentos del núcleo HX10	55
5.9.	Almacenamiento de Carbono	58
CAPÍTULO 6	.....	60
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	60
6.1.	Conclusiones	60
6.2.	Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA	.....	63
Anexo 1	.....	79
Anexo 2.	.....	81

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo del ^{210}Pb en ecosistemas costeros. 1) El ^{222}Rn emana del suelo incorporándose a la atmósfera, donde se desintegra en ^{210}Pb , que se deposita básicamente por vía húmeda. 2) El ^{222}Rn emana del sedimento incorporándose a la columna de agua donde se desintegra en ^{210}Pb , que sedimenta arrastrado por las partículas. 3) El ^{226}Ra disuelto en la columna de agua se desintegra en ^{222}Rn y éste en ^{210}Pb , que sedimenta arrastrado por las partículas. 4) El ^{226}Ra contenido en el sedimento se desintegra en ^{210}Pb (^{210}Pb de base) (Fuente: Sánchez-Cabeza et al., 2012).....	7
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio: laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo. Asterisco sombreado en negro muestra la estación M HOL 10 con coordenadas $21^{\circ}31'14.7''\text{N}$ $87^{\circ}12'26.9''\text{W}$ en donde se obtuvo el nucleó sedimentario para carbono azul.....	15
Figura 3. Estaciones de muestreo a lo largo de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	18
Figura 4. Extracción de la muestra de sedimento mediante un nucleador de acero inoxidable en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	20
Figura 5. Núcleo sedimentario para análisis de concentraciones, flujos y almacenamiento de carbono azul recolectado en laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	20
Figura 6. Sistema XRF Spectro Xepos 03 SLD utilizado para el análisis de composición elemental de los sedimentos del núcleo HX10.....	26
Figura 7. Distribución de tamaño promedio de grano (unidades phi) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm en los sedimentos de 11 estaciones en 3 temporadas de muestreo en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	32
Figura 8. Desviación estándar inclusiva (unidades phi) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 - 30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	33

Figura 9. Porcentaje de carbono orgánico en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	36
Figura 10. Cobertura de la Vegetación Acuática Sumergida (VAS) (Ha) de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo determinada mediante la ecosonda BioSonics EcoSAV	39
Figura 11. Cobertura vegetal por especies encontradas en a lo largo de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	41
Figura 12. Perfil del núcleo HX10 con respecto a la profundidad de la laguna Yalahau, Holbox, Q.Roo.....	44
Figura 13. Porcentaje de carbonatos de calcio obtenidos en el núcleo HX10 en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	46
Figura 14. Perfiles de concentración de metales pesados (Al, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Pb) en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	49
Figura 15. Distribución temporal de la tasa de acumulación másica (TAM, g cm ⁻² año ⁻¹) en el núcleo sedimentario HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	53
Figura 16. Tasa de acumulación sedimentaria (g cm ⁻¹) en los sedimentos en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	54
Figura 17. Distribución de las proporciones molares de C/N con respecto a la profundidad de núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	56

Índice de tablas

Tabla 1. Características generales de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo (García-Hernández, 2004).....	16
Tabla 2. Coordenadas de las 11 estaciones de muestreo en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	19
Tabla 3. Grado de asimetría gráfica inclusiva (Ski) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	34
Tabla 4. Porcentaje promedio de CO en los estratos de los sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	38
Tabla 5. Áreas de cobertura vegetal por especies en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo perteneciente al Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam.	40
Tabla 6. Valores máximos, mínimos y promedios de la concentración de metales en sedimentos del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo comparado con los valores de referencia.....	50
Tabla 7. Modelo de edad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	52
Tabla 8. Procedencia de la MO en los sedimentos del núcleo HX10 de la lagunan Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	55
Tabla 9. Comparación de inventarios de CO en sedimentos de praderas de pastos marinos de la laguna Yalahau, Q. Roo (México) y otros sitios en el mundo.	58
Tabla 10. Parámetros granulométricos mediante las expresiones de Folk y Ward (1957)..	79
Tabla 11. Tamaño gráfico promedio los sedimentos en las 3 temporadas de muestreo en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	81

Tabla 12. Desviación estándar gráfica inclusiva en las 3 temporadas de muestreo en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	81
Tabla 13. Porcentaje de MO en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	82
Tabla 14. Porcentaje de CO cada 5 cm de profundidad del sedimento en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	82
Tabla 15. Carbonato de calcio a cada 5 cm de profundidad del sedimento en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	83
Tabla 16. Concentraciones de Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl y K con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	84
Tabla 17. Concentraciones de Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	85
Tabla 18. Concentraciones de Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Mo y Ag con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.	86
Tabla 19. Concentraciones de Cd, Sn, Ba, La, Ce, W, Pb, Bi, Th y U con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	87
Tabla 20. Tasas de acumulación másica y sedimentaria con respecto a la profundidad y edad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	88
Tabla 21. Almacén de C del Núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.....	89

Resumen

El cambio climático se ha revelado en las últimas décadas como uno de los problemas globales más relevantes debido principalmente a los gases emitidos resultados de la quema de combustibles fósiles, denominados gases de efecto invernadero. El dióxido de carbono (CO_2) es el gas más importante por la magnitud de liberación a la atmosfera. Los ecosistemas de pastos marinos ayudan con el secuestro y almacenamiento significativo de carbono en sus sedimentos el cual se le denomina “Carbono Azul” favoreciendo así la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático. El objetivo de este trabajo fue determinar el almacenamiento de carbono azul en sedimentos de pastos marinos de la laguna Yalahau de la Reserva Yum Balam (Holbox, Quintana Roo) durante los últimos ~100 años. Se colectaron muestras de sedimentos durante un ciclo anual en 2016 en 11 estaciones de muestreo a lo largo de la laguna Yalahau para la determinación de su granulometría, CO y MO; la cobertura vegetal se obtuvo mediante el uso de una ecosonda. Se colectó un núcleo de 57 cm de profundidad para la determinación de carbono azul, tasas de acumulación y fechado mediante el método de ^{210}Pb , así como la composición elemental con un analizador elemental y procedencia de MO mediante la relación C/N. El sedimento de la laguna fue arenas en su mayoría arena medias y finas con un rango de CO que vario entre 0.5 % y 5.86 % y como especie dominante a *Thalassia testudinum*. Así mismo se determinó que el ^{210}Pb en exceso se localizó a los 17.5 cm de profundidad correspondiente al año 1827.02 ± 191.75 ; se observó que la MO de dicho núcleo fue de procedencia autóctona, y mediante el analizador elemental se encontraron los metales Cd, Cu y Ni los cuales sobrepasaron los valores TEL considerados como de mayor vulnerabilidad para la biota. Con base en la cobertura vegetal y el almacenamiento de carbono azul en el sedimento se estimó un total de 2.8 ± 1.5 Tg de C. Por lo que la laguna Yalahau puede considerarse como un sumidero de carbono de la Península de Yucatán.

Palabras clave: pastos marinos, sedimentos, carbono azul, ^{210}Pb , cambio climático.

Abstract

During the last decades climate change has been revealed as one of the significant problems mainly caused by gases emissions from fossils fuels burning, named greenhouse gases. Carbon dioxide (CO₂) is the most important greenhouse gas due to its high magnitude of atmosphere release. The high amount of carbon sequester and sediment storage, known as “Blue Carbon”, by seagrasses ecosystems aids to mitigate and to have an adaptive effect on climate change. The objective of this work was to determine blue carbon storage in seagrass sediments in Yalahau lagoon at Yum Balam Protected Reserve (Holbox, Quintana Roo) during the last hundred years. Granulometry, organic carbon (OC) and organic matter (OM) sediments samples were collected in 11 stations along Yalahau lagoon during 2016 annual cycle. Plant cover was measured using an echosounder. Also, a 57cm depth core was collected for blue carbon; accumulation rate and dating determination by the ²¹⁰Pb method, elemental composition using an elemental analyzer and OM origin by the C/N relationship. Lagoon sediments were mostly medium and fine sand with an OC range between 0.5 y 5.86% with *Thalassia testudinum* as the dominant species. Likewise, excess ²¹⁰Pb was located at 17.5 cm depth which date was established at 1827.02 ± 191.75; the OM origin was autochthonous; Cd, Cu, and Ni were found, and their values were higher than TEL index limits considered as high biota vulnerable. Based on plant cover and blue carbon storage, a total of 2.8 ± 1.5 Tg of C was estimated so that Yalahau Lagoon could be considered as a Yucatan Peninsula carbon sinking zone

Key words: seagrasses, sediments, blue carbon, ²¹⁰Pb, climate change.

Introducción

El carbono orgánico (CO) puede ingresar a los sistemas acuáticos mediante la producción primaria y debido a descargas directas desde el continente, como las descargas de aguas residuales y la escorrentía. En los sedimentos de los ecosistemas terrestres existe una alta disponibilidad de oxígeno, que permite la oxidación microbiana aerobia del carbono (Schlesinger y Lichter 2001), en comparación con los sedimentos de los Ecosistemas Marinos y Costeros (EMC) que, por lo general, están bajo una columna de agua, que los mantiene en un estado anaerobio (Chmura *et al.*, 2003), por lo que, pueden preservar al carbono durante largos períodos de tiempo (de siglos a milenios) (Duarte *et al.*, 2005). Se denomina “Carbono Azul” a dicho CO almacenado a largo plazo en hábitats de especies vegetales que crecen en la franja costera y en entornos mar adentro (CCA, 2016), dentro del suelo, biomasa viva sobre el suelo (hojas, tallos, ramas), debajo del suelo (raíces) y biomasa sin vida (hojarasca, madera muerta) (McLeod *et al.*, 2011). A los EMC (manglares, marismas y praderas de pastos marinos) se les denomina también como Ecosistemas de Carbono Azul (ECA).

Los EMC ofrecen numerosos beneficios esenciales para la existencia de las zonas costeras tales como la protección del litoral, la regulación de la calidad del agua costera, el ciclo de nutrientes y la formación del suelo (Barbier *et al.*, 2011; Alongi, 2012). De igual forma, los EMC proporcionan una amplia variedad de bienes y servicios para las poblaciones humanas: albergan puertos de comercio, son los principales productores de pescado, mariscos y algas tanto para consumo humano como animal, y también constituyen una fuente importante de fertilizantes, sustancias farmacéuticas y cosméticas, productos para el hogar y materiales de construcción. Además, ayudan a mitigar el cambio climático mediante el secuestro de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y los océanos el cual es absorbido por las plantas durante la fotosíntesis (Howard *et al.*, 2014) generando un almacenamiento significativo de carbono (Duarte *et al.*, 2005) tanto, o más que los ecosistemas terrestres (Lau, 2013; Howard *et al.*, 2014) por lo cual son considerados como sumideros de carbono (Duarte *et al.*, 2008). No obstante, cuando estos ecosistemas se degradan o perturban pueden convertirse en fuentes de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Howard *et al.*, 2014).

El enterramiento de la materia orgánica particulada (MOP) en los sedimentos es un importante proceso de secuestro y almacenamiento de carbono. La MOP derivada del fitoplancton puede llegar a ser (dependiendo del ambiente) un componente dominante mayor que la MOP terrestre en la columna de agua, lo que indica que una abundante MO derivada del fitoplancton es potencialmente una fuente importante de CO sedimentario (Watanabe y Kuwae, 2015). Sin embargo, la MO terrestre y la MO derivada de los pastos marinos (fitobentos) son componentes importantes de la MO en los sedimentos, lo que indica que estos componentes son más refractarios que la MO derivada del fitoplancton y se conservan selectivamente en praderas marinas (Watanabe y Kuwae, 2015). La producción primaria acuática puede contribuir en gran medida a la absorción atmosférica de CO₂ en escalas de tiempo biológicas (durante su ciclo de vida) (Watanabe y Kuwae, 2015). Los pastos marinos producen MO relativamente refractaria, que se puede preservar en el océano en escalas de tiempo geológicas (Watanabe y Kuwae, 2015), donde el CO, aunque sometido a cierto grado de diagénesis, todavía se considera un sumidero de carbono (Mateo *et al.*, 1997; McKee *et al.*, 2007). Las altas tasas de acumulación sedimentaria, el bajo nivel de oxígeno, la baja conductividad hidráulica de los sedimentos (baja permeabilidad) y la tasa de descomposición microbiana más lenta, facilitan el enterramiento del carbono y la acumulación de reservas de carbono en estos sedimentos costeros (Duarte *et al.*, 2011; Mateo *et al.*, 2006; Duarte *et al.*, 2010).

Se considera *sumidero* a los depósitos de carbono como el suelo, la vegetación, el agua y la atmósfera que absorben y liberan carbono; juntos, los sumideros de carbono forman un reservorio o almacén de carbono (Howard *et al.*, 2014). Un *reservorio o almacén* de carbono es la cantidad total de carbono orgánico almacenado en un ECA de un tamaño conocido y es la suma de uno o más almacenes de carbono (Howard *et al.*, 2014). Los sumideros de carbono azul, como los pastos marinos, son ambientes que fijan dióxido de carbono para producir materia orgánica (MO). Estos ECA producen carbono orgánico muy por encima de los requerimientos del ecosistema, con exceso de carbono fotosintético (es decir, tasa de exportación y almacenamiento) en estos ecosistemas y lo fotosintetizan a través de la respiración (Duarte y Cebrián, 1996; Gattuso *et al.*, 1998; Duarte *et al.*, 2005), eliminando así el dióxido de carbono de la atmósfera. Parte de este exceso de carbono se exporta y subvenciona a los ecosistemas adyacentes, como son los sistemas arrecifales coralinos

(Duarte y Cebrián, 1996; Bouillon *et al.*, 2004). El remanente excedente (sobrante del exceso) de la producción de los bosques de manglar y de los pastos marinos se encuentra enterrada en los sedimentos, ahí puede permanecer almacenado (Mateo *et al.*, 1997), lo cual representa un fuerte sumidero de carbono natural. El sumidero de carbono terrestre a menudo se cuantifica como la diferencia entre las emisiones de combustibles fósiles, uso de la tierra, consumo de los océanos y la acumulación en la atmósfera. Sin embargo, existen incertidumbres importantes en los estimados de la captación media neta de carbono para los ecosistemas terrestres (Sarmiento y Gruber, 2002). Dado los métodos utilizados para cuantificar los sumideros de carbono terrestres y oceánicos, los ECA no están explícitamente incluidos en las estimaciones de ninguno de estos sumideros de carbono, lo que crea un vacío en las extrapolaciones globales. Las pérdidas de los ECA (e.g. cambio en el uso de la tierra) deben tenerse en cuenta al estimar las fuentes y sumideros en estos ecosistemas (Mcleod *et al.*, 2011).

Los pastos marinos, pertenecientes a los ECA, son plantas submarinas que echan raíz en los sedimentos y producen flores, polen, frutos y semillas debajo de la superficie de los océanos costeros (Hartog y Kuo, 2006). A pesar de su importancia, estos ecosistemas están experimentando una fuerte disminución a nivel global, debido a factores naturales (Cunha *et al.*, 2005), pero sobre todo a disturbios antrópicos, como el daño directo en la calidad del agua (Short y Wyllie-Echeverría, 1996; Hemminga y Duarte, 2000). Sin embargo, aún ante esta pérdida, hay un relativo desconocimiento sobre el estado y los beneficios de los hábitats costeros con cubierta vegetal.

El carbono que se encuentra almacenado en estos ecosistemas puede clasificarse como autóctono o alóctono (Middelburg *et al.*, 1997; Kennedy *et al.*, 2010). El carbono autóctono se produce y deposita en el mismo lugar; las plantas eliminan el CO₂ de la atmósfera/océano a través de la fotosíntesis (producción primaria) y lo convierten en tejido vegetal (como hojas, tallos, raíces/rizomas) para aumentar la biomasa de la planta; una gran parte de la biomasa vegetal se asigna a las raíces donde se descompone muy lentamente en condiciones anaerobias, almacenando así el carbono dentro de los sedimentos (Middelburg *et al.*, 1997; Kennedy *et al.*, 2010). El carbono alóctono se produce en un lugar y se deposita en otro; es decir, los ECA existen en entornos dinámicamente activos, son constantemente golpeados

por las olas, las mareas y las corrientes costeras que transportan los sedimentos y el carbono orgánico asociado de los ecosistemas adyacentes (mar adentro o terrestres) (Rodríguez-Hernández, 2017); las plantas que se encuentran en estos sistemas tienen estructuras de raíz y marquesinas complejas que son eficientes para atrapar los sedimentos a medida que se mueve a través del sistema, lo que se suma al almacén de carbono local como resultado, por lo general a través de la escorrentía y/o inundación por aguas marinas (Howard *et al.*, 2014) representando un sumidero de carbono para un área más grande (Mcleod *et al.*, 2011). Varios estudios basados en proporciones de isótopos de carbono estables en sedimentos han demostrado la importancia del enterramiento de CO desde fuera de los límites del ecosistema (Mcleod *et al.*, 2011). Se estima que un 50% del carbono secuestrado en sedimentos de pastos marinos es de origen externo (Kennedy *et al.*, 2010).

Los sedimentos de los EMC, como los de los pastos marinos, constituyen un registro integral de los cambios temporales en aquellas áreas en que la acumulación de sedimentos tiene lugar sin bioturbación, mezclado físico o episodios de erosión. Bajo estas condiciones, la columna sedimentaria registra información histórica de mucho valor sobre las características del ambiente en el momento de su formación, así como las modificaciones temporales producto de las actividades antropogénicas (Golberg *et al.*, 1963). La estimación de las tasas de acumulación y las edades de los sedimentos de los EMC es de gran interés. Los resultados brindan información valiosa sobre: (i) la dinámica de sedimentos costeros y los cambios inducidos antropogénicamente, (ii) las tendencias históricas de emisiones contaminantes en sitios industriales, (iii) los efectos de eventos únicos, por ejemplo, una marea de tormenta o inundación, y pueden ayudar a reconstruir localmente condiciones paleoclimáticas (Kirchner, 2011); entre los contaminantes destacan los metales pesados, estos constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la Tabla Periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm³ (Passow *et al.*, 1961).

Desde sus primeras aplicaciones, hace más de 40 años (Krishnaswamy *et al.*, 1971; Koide *et al.*, 1972), el uso de ²¹⁰Pb se ha convertido en un método reconocido y ampliamente utilizado para establecer cronologías de sedimentos acuáticos recientes (Kirchner, 2011). El ²¹⁰Pb es un radionúclido natural, miembro de la cadena de decaimiento de ²³⁸U, que tiene un periodo de semi-desintegración (T) de 22.23 años (LNHB, 2016). Se encuentra presente en los

sedimentos debido a la producción *in situ*, resultado de la desintegración radioactiva de ^{226}Ra que forma parte de los minerales del sedimento (^{210}Pb soportado o de base), así como a la producción atmosférica, debido a la desintegración del ^{222}Rn ($T= 3.8$ días; LNHB, 2016) emanado por los suelos (^{210}Pb en exceso o no soportado). El ^{210}Pb en exceso alcanza los sistemas acuáticos por depósito seco o húmedo; y una vez en la columna de agua se adsorbe fácilmente a la materia suspendida que puede incorporarse en los sedimentos (Kirchner, 2011). Este ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) está sujeto a la desintegración radioactiva y puede estar también sujeto a procesos biogeoquímicos en el sedimento. La evaluación de la desintegración del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ con la profundidad permite, en determinadas condiciones, estimar la fecha de formación de los sedimentos (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012) (Figura 1).

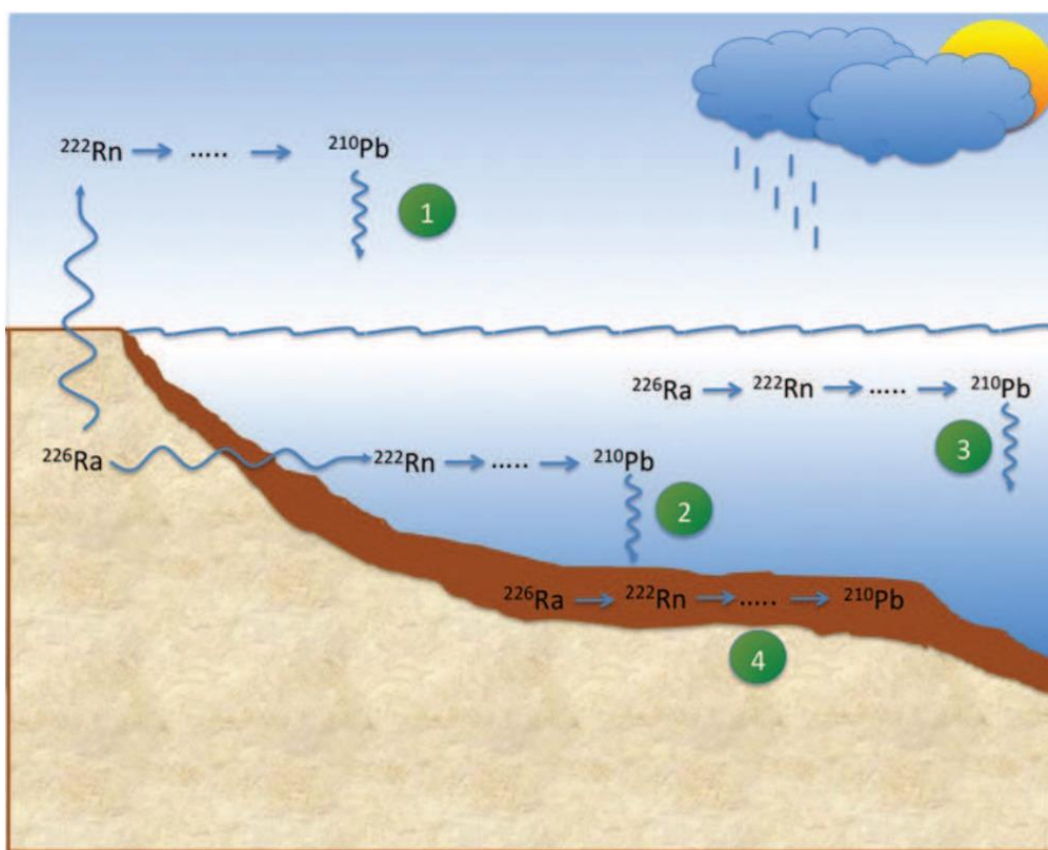


Figura 1. Ciclo del ^{210}Pb en ecosistemas costeros. 1) El ^{222}Rn emana del suelo incorporándose a la atmósfera, donde se desintegra en ^{210}Pb , que se deposita básicamente por vía húmeda. 2) El ^{222}Rn emana del sedimento incorporándose a la columna de agua donde se desintegra en ^{210}Pb , que sedimenta arrastrado por las partículas. 3) El ^{226}Ra disuelto en la columna de agua se desintegra en ^{222}Rn y éste en ^{210}Pb , que sedimenta arrastrado por las partículas. 4) El ^{226}Ra contenido en el sedimento se desintegra en ^{210}Pb (^{210}Pb de base) (Fuente: Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012)

En México se tiene interés en generar mayor conocimiento en materia de carbono azul en las Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2016a). Los EMC se encuentran contemplados en el proyecto “Próximos pasos en la ciencia hacia la formulación de políticas en materia de carbono azul en América del Norte” y los avances fueron dados a conocer en la Reunión Trinacional de Expertos en Carbono Azul en Tofino British Columbia, Canadá, en donde el primer mapa presenta a México con una extensión de 17,588 km² (CONANP, 2016a); sin embargo, los pastos marinos representan el hábitat que capta y almacena carbono azul para el cual existe el mayor vacío de información en general, y en gran medida su extensión espacial, no ha quedado lo suficientemente bien reflejada en la información recabada por Canadá, Estados Unidos y México (CONANP, 2016a). El presente trabajo contribuye a la estimación de los almacenes de carbono azul de la laguna Yalahau ubicada en Holbox, Quintana Roo, la cual se encuentra la Reserva de la Biosfera Yum Balam.

CAPÍTULO 1

1. Antecedentes

Debido al pronosticado aumento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, las comunidades científica y política, han considerado a los inventarios de carbono azul como un medio rentable para lograr resultados positivos en la mitigación del cambio climático (Thomas, 2014). A partir de 2011, y con el apoyo de UNESCO y UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) la comunidad científica internacional dio inicio al esfuerzo de unificar criterios, definiciones y estrategias para mejorar el conocimiento de los ecosistemas de carbono azul, protegerlos del impacto del cambio global, aprovechar sus capacidades para maximizar la preservación del carbono almacenado y minimizar las emisiones de carbono (IPCC, 2014). Sin embargo, la información del almacenamiento de carbono azul en los sedimentos es aún escasa alrededor del mundo.

1.1. Investigaciones Recientes

La mayor parte de la información sobre el almacenamiento de carbono de los pastos marinos se deriva de estudios de una sola especie, *Posidonia oceanica*, del Mar Mediterráneo (Lavery *et al.*, 2013). Lavery *et al.* (2013) estudiaron 17 hábitats de pastos marinos australianos para evaluar la variabilidad en sus reservas de carbono azul. Los hábitats abarcaron 10 especies, en praderas monoespecíficas o mixtas, deposicionales en hábitats expuestos y hábitats templados a tropicales. Hubo una diferencia de 18 veces el inventario de CO (1.09 - 20.14 Mg cm⁻³ (mega gramos sobre centímetro cúbico) para pradera templada de *Posidonia sinuosa* y una pradera templada estuarina de *Posidonia australis*, respectivamente) integrado en los primeros 25 cm de sedimento, equivalente a un inventario de 262 - 4833 g de C m⁻².

Alongi *et al.* (2016) estimaron el almacén de carbono azul, estandarizado a 1 m de profundidad, en sedimentos de 11 bosques de mangle y 10 praderas de pastos marinos en Indonesia. Los inventarios de carbono oscilaron entre 18.8 y 1569.3 Mg ha⁻¹ en los bosques de mangle, y entre 31.3 y 293.3 Mg ha⁻¹ en las praderas de pastos marinos; y concluyeron que el depósito de carbono en los sedimentos de manglar es mayor que en los sedimentos de pastos marinos.

Murdiyarso *et al.* (2015) determinaron los inventarios de carbono en todos los componentes del ecosistema (biomasa, madera muerta y sedimentos) de 39 zonas de manglar localizadas en ocho sitios de Indonesia, comprendidos en las longitudes de 105° a 140° E. Los inventarios de carbono en todo el ecosistema variaron de 442 a 1567 Mg ha⁻¹, con un inventario promedio de 1083 ± 378 Mg ha⁻¹. Murdiyarso y colaboradores concluyeron que en los bosques de mangle de Indonesia (2.9 Mega hectáreas) se almacenan entre 1.28 y 4.54 Pg C, con un promedio de 3.14 ± 1.10 Pg C; y que el mayor reservorio de carbono en el ecosistema se encuentra en los sedimentos (78%), ya que el inventario de carbono en la biomasa es del 20% y únicamente el 2% se encuentra en la madera muerta.

Macreadie *et al.* (2015) analizaron el impacto de la perturbación de los inventarios de carbono en los sedimentos de tres hábitats de pastos marinos, en la Bahía Jervis en Australia. Los sitios de estudio se dividieron entre áreas con sedimentos “perturbados” por pruebas sísmicas, sedimentos “regenerados” durante los últimos 5-10 años a través de la invasión de rizomas y sedimentos “no perturbados” (sedimentos control). Se determinó que los inventarios de carbono orgánico en los hábitats perturbados habían tardado 6,000 años en acumularse; que eran casi tres veces menores que los observados en los sitios no perturbados, y que estas diferencias podían deberse a un cambio en la naturaleza biogeoquímica de ambos sitios, ya que los sedimentos de las áreas “perturbadas” tenían un alto contenido de heterótrofos aerobios; y los sedimentos de los pastos marinos “no perturbados” tenían más bacterias reductoras de sulfatos.

1.2. Investigaciones en México

Arellano-Méndez *et al.* (2015) determinaron el contenido, en toneladas por hectárea, de 8 clases de cobertura de *T. testudinum* (suelo desnudo, organismo solitario, ralo, disperso, parches, camas, praderas medias, praderas) en la Bahía de la Ascensión (Quintana Roo, México) en que se ha clasificado el fondo. Se registraron 1647.99 Ton en 74.01 ha que posee la bahía (22.27 Ton ha⁻¹). Las clases parches, camas, praderas medias y praderas, poseen el 68.72% de contenido de carbono orgánico. La clase praderas medias es quien mayor volumen de carbono aporta al sistema con 252 Ton en 5.04 ha (lo que corresponde a 50.02 Ton ha⁻¹), mientras que la clase praderas aporta 447.90 Ton en 11.18 ha (que corresponde a 40.07 Ton ha⁻¹).

Gutiérrez-Mendoza y Herrera-Silveira (2015) analizaron el carbono almacenado en todos los componentes del ecosistema (biomasa, madera muerta y sedimentos) de zona de manglar de Celestún, Progreso y Dzilam de Bravo, en el Estado de Yucatán; y en Nitchupté, Puerto Morelos, El Playón y El Paraíso (en Sian Ka'an) y Mahahual, en el Estado de Quintana Roo. Los resultados demostraron que los almacenes de carbono en los sedimentos oscilaron entre 82 y 477.70 Mg ha⁻¹, y que representaban entre el 90 y el 94% del carbono de todo el ecosistema.

Adame *et al.* (2013) analizaron los inventarios de carbono en todos los componentes del ecosistema (biomasa, madera muerta y sedimentos) de los humedales de la reserva de la biosfera Sian Ka'an en Yucatán, México en zonas de pantanos y de manglar. El mayor inventario de carbono del ecosistema se determinó en la Isla Pitaya (1,325 Mg ha⁻¹), un área que está influenciada por descargas de aguas subterráneas, y cuyos manglares son altos. El inventario de carbono de estos manglares fueron 67% mayores que el inventario de carbono promedio de los mangles enanos, y 85% mayores que el de los pantanos. Los inventarios de carbono de los pantanos analizados fueron ≤ 250 Mg C ha⁻¹, lo cual equivale únicamente entre el 7 y 18% de los inventarios de carbono de los manglares en la Isla Pitaya. Los mayores inventarios de carbono se presentaron en áreas de salinidad relativamente baja, alto contenido de fósforo y baja proporción de N:P, y se concluyó que el fósforo limita el secuestro y la acumulación de carbono orgánico. Los inventarios de carbono en los sedimentos variaron de 95 Mg ha⁻¹ a 1,166 Mg ha⁻¹, con los menores inventarios de carbono observados en las marismas (95–238 Mg ha⁻¹). Se estimó que los humedales costeros de Sian Ka'an, que cubren aproximadamente 172,176 ha, pueden almacenar de 43.2 a 58 millones de Mg de C.

CAPÍTULO 2

2. Preguntas de investigación

- ¿Cuál es la cantidad de carbono azul almacenado en los sedimentos de la pradera de pastos marinos de la laguna Yalahau ubicada en Holbox, Quintana Roo?
- ¿Cuál es la especie dominante que está generando el almacenamiento de carbono azul en los sedimentos de pradera de pastos marinos de la laguna Yalahau?
- ¿Cuáles son las tasas de acumulación sedimentaria y la edad de los sedimentos de la laguna Yalahau?
- ¿Cuál es la variabilidad estacional del carbono orgánico almacenado en los sedimentos de las praderas de pastos marinos de la laguna Yalahau?
- ¿Existe en el sedimento de la laguna Yalahau algún elemento que sea posible contaminante?

CAPÍTULO 3

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar el almacenamiento de carbono azul de sedimentos de pastos marinos de la laguna Yalahau de la Reserva Yum Balam (Holbox, Quintana Roo) durante los últimos ~100 años.

3.2. Objetivos Particulares

- Caracterizar los sedimentos de la laguna Yalahau (determinación de la granulometría y carbono orgánico).
- Registrar la variación estacional de la distribución y cobertura vegetal de las praderas de pastos marinos en la laguna Yalahau.
- Caracterizar los sedimentos del núcleo HX10 (carbonatos de calcio, composición elemental, tasas de acumulación y modelo de edad y stock)
- Evaluar la procedencia del carbono orgánico en los sedimentos mediante el uso de la proporción C/N
- Determinación de posibles contaminantes en sedimentos del núcleo HX10 de la laguna Yalahau

CAPÍTULO 4

4. Materiales y métodos

4.1. Zona de estudio

La laguna de Yalahau se localiza en la parte noreste de la Península de Yucatán, en el estado de Quintana Roo, México, entre los paralelos 21° 26' y 21° 36' de latitud y los 87° 08' y 87° 29' de longitud oeste (Figura 2), también se le conoce como laguna Conil y limita con el Golfo de México a través de la isla Holbox (Contreras-Espinosa, 2010). La laguna Yalahau se encuentra dentro del área de protección de flora y fauna denominada “Yum Balam” (sitio Ramsar número 1360). Los límites de esta laguna son los poblados de Holbox hacia el norte y el Puerto de Chiquilá hacia el sur (Contreras-Espinosa, 1985). La laguna tiene 32 km de longitud en dirección oeste-este y de 8 a 9 km de ancho en dirección norte-sur (Jiménez-Sabatini *et al.*, 1998) y con una superficie total de 312 km² (CONANP, 2016b) Se ubica en una región que no posee afluentes o ríos superficiales de agua dulce y es un sistema marino (Vega *et al.*, 1992). El intervalo de marea es micromareal (< 1 m), la profundidad promedio del agua es de 2 m (intervalo: 0.3 a 4 m) y no existe estratificación de la columna de agua (Tran *et al.*, 2002).

La región en donde se localiza la laguna Yalahau está bajo la influencia de los vientos alisios durante todo el año, provenientes del este y sureste principalmente, con velocidades entre 2 y 10 m s⁻¹, y el régimen de lluvias marca el patrón climático en secas (marzo-mayo), lluvias (junio-octubre) y ‘nortes’ o tormentas estacionales (noviembre a febrero) con vientos de hasta 90 km h⁻¹, lluvia moderada y descensos de temperatura de hasta 15°C en 24 h (Capurro, 2002).

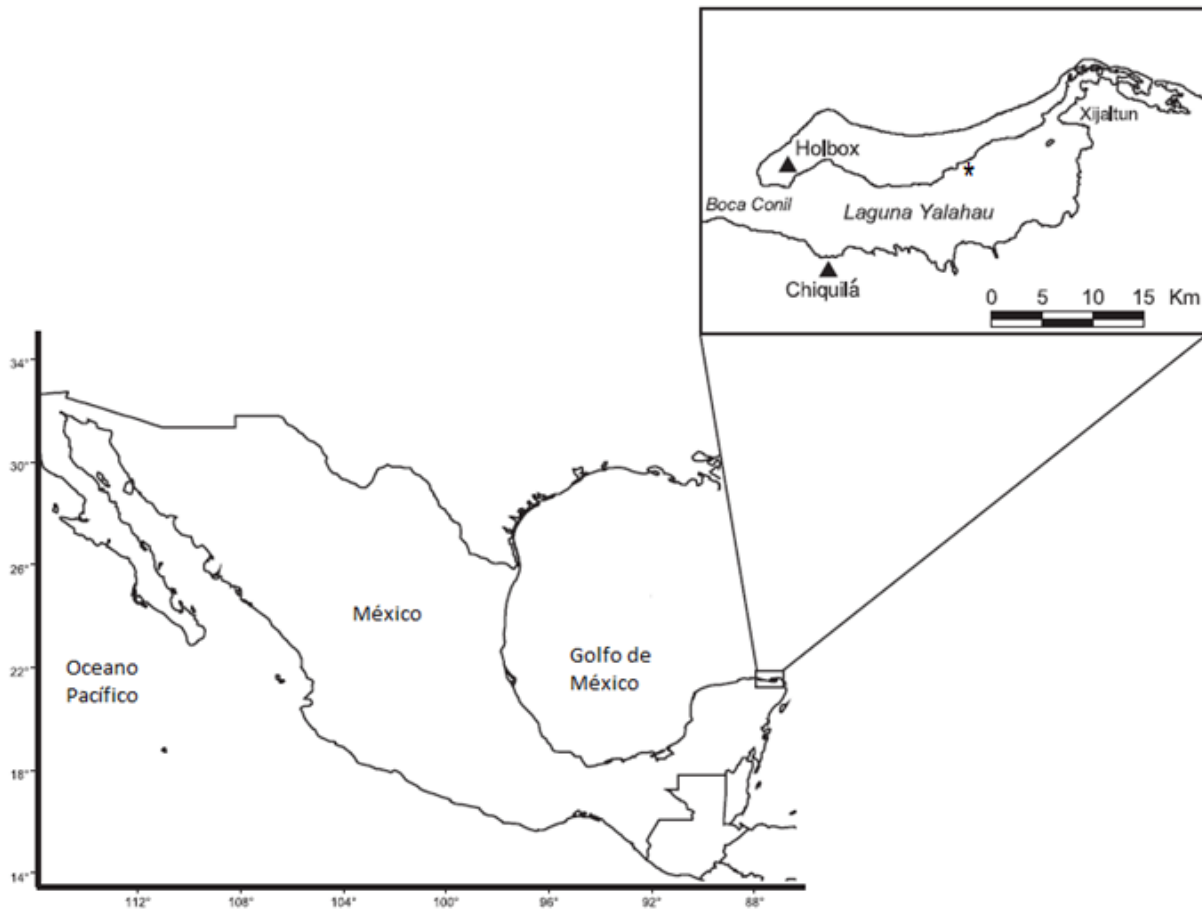


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio: laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo. Asterisco sombreado en negro muestra la estación M HOL 10 con coordenadas 21°31'14.7"N 87°12'26.9"W en donde se obtuvo el nucleó sedimentario para carbono azul.

La laguna Yalahau se caracteriza por presentar estrechas áreas someras sobre su margen interno (profundidad media de 2.0 m) con praderas de pastos marinos, dominadas principalmente por *Thalassia testudinum Banks ex König, 1805* (Ordóñez-López y García-Hernández, 2005). La laguna presenta numerosos atributos de importancia en los contextos científico, ecológico social y económico (Lazcano-Barrero *et al.*, 1995) entre los cuales destacan: (i) Dentro del Área de Protección donde se encuentra la laguna Yalahua existen importantes poblaciones de especies amenazadas o en peligro de extinción, como el Jaguar, el Puma, el Ocelote, el Tigrillo, el Tapir, el Mono araña, el Cocodrilo de Pantano, el Cocodrilo de Ría, cuatro especies de tortugas marinas, el Manatí, el Pavo Ocelado, el

Hocofaisan, el Flamenco y el Jabiru entre otras (Colmenero *et al.*, 1990; Lazcano-Barrero, *et al.*, 1992). (ii) El área es de suma importancia como sitio de reproducción, descanso e hibernación para numerosas especies de aves migratorias y residentes (Correa-Sandoval 1993; McKinnon, 1993). (iii) Los pastos marinos, constituyen la base de la producción pesquera de la región. (iv) La zona es rica en valores escénicos y tiene un gran potencial para el desarrollo del ecoturismo (Lazcano-Barrero *et al.*, 1995). (v) La región constituye una importante fuente de abastecimiento de agua y recursos forestales para el actual y futuro desarrollo de la entidad (Lazcano-Barrero *et al.*, 1995).

El sistema lagunar de Yalahau, presenta playas angostas, arenosas y alargadas, sin embargo, en algunas áreas se puede observar zonas cubiertas de manglar, principalmente *Rhizophora mangle* Linnaeus y *Avicennia germinans* (Linnaeus) Linnaeus (García-Beltrán, 2006) y se caracteriza por presentar áreas someras con praderas de macrófitas como *Halodule wrightii* Asch, *Syringodium filiforme* Kütz y *Thalassia testudinum*. El intercambio de agua entre el mar y la laguna Yalahau ocurre principalmente a través de una boca natural de 5 km de anchura localizada al oeste (May-Kú *et al.*, 2016). Las características climatológicas de la zona de estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características generales de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo (García-Hernández, 2004)

CLIMA	Ax' (wo) iw, de tipo cálido húmedo, con lluvias en verano
TEMPERATURA DEL AGUA	Oscila en un rango de 24.1- 27.5°C, con un promedio de 26.1 °C
PRECIPITACIÓN	Comprendidas en un rango de 27.7 - 130.7 mm, con un promedio anual de 868.5 mm.
BATIMETRÍA	La profundidad promedio es de 2 ± 0.8m

4.2.Muestreo

Con base en la información de extensión y presencia de pastos marinos recabada en muestreos anteriores para el informe de primera etapa del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) realizado en 2017 (pendiente en publicación), en donde se realizó una línea base de investigación para la identificación de zonas con pasto marino en la laguna Yalahau, se establecieron 11 estaciones de muestreo a lo largo de la laguna para la toma de muestras de este trabajo de investigación (Figura 3). Se realizaron 3 muestreos de núcleos sedimentarios mediante buceo autónomo. Los muestreos se efectuaron de acuerdo con la variabilidad climática del Golfo de México, descrita por Capurro (2002) en la temporada de secas, de lluvias y de nortes, en abril, agosto y diciembre de 2016 respectivamente.



Figura 3. Estaciones de muestreo a lo largo de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

La Tabla 2 muestra las coordenadas de cada estación de muestreo en la laguna Yalahau. La estación M HOL 2 B es una estación sin vegetación alguna, la cual se denominó blanco; en las demás estaciones se encontraban pastos marinos y macroalgas.

Tabla 2. Coordenadas de las 11 estaciones de muestreo en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

ESTACIONES	LATITUD	LONGITUD
M HOL 1	21.4887	-87.5033
M HOL 2 B	21.4920	-87.4940
M HOL 3	21.4694	-87.4286
M HOL 4	21.5161	-87.4053
M HOL 5	21.5047	-87.3750
M HOL 6	21.5174	-87.3246
M HOL7	21.5116	-87.3046
M HOL 8	21.4996	-87.2442
M HOL 9	21.4458	-87.2027
M HOL 10	21.5208	-87.2075
M HOL 11	21.5516	-87.3535

Se recolectaron muestras de sedimento en cada estación mediante un nucleador de acero inoxidable, con tubos de acrílico de 5.08 cm de diámetro y 30 cm de longitud (Figura 4). La manipulación de la muestra fue muy cuidadosa en todo momento y se mantuvo en posición vertical, para evitar la mezcla de los sedimentos. Las muestras se preservaron a baja temperatura en hieleras hasta su procesamiento en el laboratorio.



Figura 4. Extracción de la muestra de sedimento mediante un nucleador de acero inoxidable en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo

Se realizó la extracción de 5 núcleos de un metro de longitud en la laguna Yalahau (Figura 5), sin embargo, al momento de realizar la determinación de CO de cada uno mediante la técnica propuesta por Walkley y Black (1934), descrita posteriormente, se seleccionó el núcleo de la estación M HOL 10 (núcleo HX10) para determinar las concentraciones, flujos y almacenamiento de carbono azul. El núcleo HX10 se recolectó en la temporada de lluvias y no mostró vestigios de mezcla o perturbación ya sea física o biológica.



Figura 5. Núcleo sedimentario para análisis de concentraciones, flujos y almacenamiento de carbono azul recolectado en laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

4.3. Procesamiento de las muestras

Los núcleos para la determinación de granulometría, carbono orgánico y materia orgánica de la laguna Yalahau fueron extrudidos y cortados en secciones de 10 cm de espesor: 0-10 cm (superficial), 10-20 cm (medio), 20-30 (inferior); en núcleos donde el sedimento no era suficiente (muestra menor a 15 cm) se segmentaron en 2 estratos. Cada sección fue colocada en charolas de aluminio, se etiquetó y se secó en una estufa durante 48 h a 40 °C

El núcleo HX10 para el análisis de concentración, flujos y almacenamiento de carbono azul se extruyó y seccionó en intervalos de 1 cm de espesor. Cada segmento se congeló y posteriormente liofilizó para la eliminación de humedad.

4.4. Análisis de laboratorio

Los análisis para la caracterización de la laguna se llevaron a cabo en el Laboratorio de Pastos Marinos del Departamento de Hidrobiología en la UAM Unidad Iztapalapa, Ciudad de México. Los análisis de tasas de acumulación sedimentaria, modelo de edad, almacenamiento de carbono y composición elemental se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología en la Unidad Académica Mazatlán, UNAM.

4.4.1. Granulometría

El análisis de granulometría se realizó mediante el método de tamizado en seco con base en el método gráfico de Folk y Ward (1957) y fue clasificado de acuerdo con la escala Udden-Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922). En las tres temporadas de muestreo se determinó: Tamaño de gráfico promedio (Mz), Desviación estándar gráfica inclusiva (σ) y Grado de asimetría gráfica inclusiva (Ski).

Procedimiento:

Se tomaron 50 g de cada estrato del núcleo previamente secas en la estufa y se pasó a través de tamices de diferente tamaño de malla (-2, -1.5, -1, -0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 y < 4 phi) con la ayuda de un tamizador eléctrico marca Matex, mediante agitación por 10 minutos. Los sedimentos retenidos en cada malla se pesaron en balanza analítica. Los datos obtenidos se agrupan en rectas (porcentaje de volumen vs unidad phi), cada recta asocia un rango de tamaño a un modo de transporte (Corrales *et al.*, 1977); a partir de la recta se obtienen los

percentiles de cada muestra ($\rho_5, \rho_{16}, \rho_{50}, \rho_{84}, \rho_{95}$) y con dichos percentiles se calculan los parámetros granulométricos mediante las expresiones de Folk y Ward (1957) que se describen enseguida:

$$\text{Tamaño gráfico promedio (Mz)} = \frac{\rho_{16} + \rho_{50} + \rho_{84}}{3} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Desviación estándar gráfica inclusiva } (\sigma) = \frac{\rho_{84} - \rho_{16}}{4} + \frac{\rho_{95} - \rho_5}{6.6} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Grado de asimetría gráfica inclusiva (Ski)} = \frac{\rho_{16} + \rho_{84} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{84} - \rho_{16})} + \frac{\rho_5 + \rho_{95} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{95} - \rho_5)} \quad (\text{Ec. 3})$$

La escala logarítmica de tamaños de granos de Wentworth (1922) está en unidades de phi. Phi es la transformación logarítmica: $\rho = -\log_2 d$, donde d es el tamaño de grano en mm. Esta representación más simétrica ayuda a la correspondencia de las medidas gráficas con las teóricas. Los parámetros estadísticos obtenidos gráficamente a partir de una curva de frecuencias de tamaños acumulativos se basan en las relaciones espaciales de los puntos de la curva que coinciden con los percentiles 5, 16, 50, 84 y 95 ($\rho_5, \rho_{16}, \rho_{50}, \rho_{84}, \rho_{95}$). En el Anexo I se resumen las propiedades de los parámetros granulométricos.

4.4.2. Carbono orgánico y materia orgánica

La determinación del CO del sedimento se evaluó a través del método de Walkley y Black (1934). Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. El calor desprendido por la reacción del H_2SO_4 al diluirse favorece la acción del $K_2Cr_2O_7$ para oxidar. El exceso de oxidante se determina titulando con una solución de sulfato ferroso ($FeSO_4$) de normalidad conocida, que actúa como reductor.

Procedimiento:

Se colocaron 0.5 g de sedimento seco en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se tamizó con abertura de 0.0024 in. Se realiza duplicado para cada muestra, así como un blanco con reactivos por duplicado. Se adicionó exactamente 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ 1 N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con toda la muestra. Se agregaron cuidadosamente con una bureta 20 mL de H_2SO_4 concentrado a la suspensión, girando nuevamente el matraz. Se dejó reposar durante 30 minutos. Posteriormente se añadió 200 mL de agua destilada y 5 mL de H_3PO_4 concentrado. Se colocan 8 gotas del indicador de difenilamina. Se realizó la titulación con la disolución de $FeSO_4$ gota a gota hasta un punto final verde esmeralda. Se calculó la normalidad de sulfato ferroso como resultado de la titulación de los blancos implementados (Ec. 4)

$$N = \frac{V}{B} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

V = Volumen de dicromato de potasio agregados al blanco (mL)

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL).

Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de CO (Ec. 5) y posteriormente el porcentaje de MO multiplicando por el factor de Van Bemmelen (1.724) (Ec. 6).

$$\% \text{ CO} = N \times \left(\frac{B-T}{g} \right) \times 0.39 \text{ mfc} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\% \text{ MO} = \% \text{ C.O.} \times 1.724 \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (mL).

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso.

g = Peso de la muestra empleada (g).

mcf = Factor de corrección de humedad

El factor 0.39 resulta de multiplicar $\frac{12}{4000} \times \frac{1}{0.77} \times 100 = 0.39$. Donde $\frac{12}{4000}$ es el peso miliequivalente de C, $\frac{1}{0.77}$ es un factor de corrección debido a la hipótesis de que el método solo oxida el 77% del C, y 100 es la conversión el porcentaje.

Debido a que se estima que la MO contiene el 58% de C, la constante de conversión Van Bemmelen 1.724 de CO a MO resulta del cociente $\frac{1}{0.58} = 1.724$.

4.4.3. Cobertura vegetal de los sedimentos de la laguna Yalahau

La cobertura vegetal de pasto marino en la laguna Yalahau se realizó mediante el uso de la ecosonda Hidro acústica BioSonics, utilizando el software EcoSAV. La ecosonda se colocó en la borda de una lancha y efectuó el registro de la vegetación en las 11 estaciones seleccionadas alrededor de la laguna Yalahau. El algoritmo de EcoSAV reconoció la presencia o ausencia de la Vegetación Acuática Sumergida (VAS) y calculó los parámetros basado en las características de la eco señal. Se usaron patrones de reconocimiento para distinguir entre diferentes tipos de eco señales; los algoritmos de los parámetros de reconocimiento utilizaron la composición acústica del área entre la cara del transductor y el primer eco de fondo (BioSonics Inc, 2004). Con la ecosonda se obtuvieron ecogramas que representan la cobertura de la VAS.

4.4.4. Carbonato de calcio en el núcleo HX10

La concentración de carbonatos de calcio (CaCO_3) en el núcleo HX10 se determinó utilizando el método volumétrico propuesto por Stuardo y Villaroel (1976).

Procedimiento:

Se pesaron 250 mg de la muestra molida en un tubo de centrifuga de 50 mL, se agregó exactamente 10 mL de HCl 1N para posteriormente centrifugar a 3500 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante se pasó a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Se le agregaron 20 mL de agua destilada al tubo de centrifuga y se centrifugó nuevamente. El sobrenadante se agregó al matraz correspondiente. Se colocan 3 gotas de fenolftaleína (indicador) y se tituló con NaOH 0.5 N hasta que la solución transparente viró a rosa mexicano.

Se preparó una curva de calibración con diversas cantidades de CaCO₃ (0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 g) y se procesó de la misma manera que las muestras. Con la curva se obtuvo una recta de calibración mediante una regresión lineal en Excel de los puntos resultantes. La linealidad se verificó mediante el análisis estadístico realizado en Excel de los datos a través de los coeficientes de correlación, pendiente e intersección al eje. La recta de calibración permitió obtener la concentración de CaCO₃ en gramos de todos los segmentos del núcleo. Posteriormente se calculó el % de CaCO₃ de cada segmento (Ec. 7)

$$\% \text{ CaCO}_3 = \left(\frac{\text{CaCO}_3(\text{g})(1000)}{\text{Peso (g)}} \right) / 10 \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

CaCO₃(g) = Carbonato de calcio en gramos obtenidos mediante la función Pronostico de Excel con los datos del gasto en mL de cada segmento y la curva de calibración

1000 = factor de conversión de g a mg

Peso (g) = Peso del sedimento de cada segmento

10 = factor de conversión de mg/g a %

4.4.5. Composición elemental del núcleo HX10

La determinación de las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y oligoelementos presentes en los sedimentos de estudio se realizó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés) por dispersión de energía, con un espectrómetro marca “Spectro Xepos” modelo 03 SLD (Figura 6). El instrumento permite la determinación de concentraciones elementales de los números atómicos entre 13 (Al) y 92 (U).

Para el proceso de fluorescencia de rayos X, primero ocurre la absorción fotoeléctrica, esta sucede cuando un fotón altamente energético proveniente de una radiación de rayos X interactúa con la materia. Cuando los átomos de la muestra de sedimento absorben esta alta energía, un electrón de los más cercanos al núcleo de las capas internas K o L es expulsado del átomo. En este proceso de absorción, parte de la energía del fotón incidente de rayos X es utilizada para romper la energía de enlace del electrón interno del elemento y la energía

restante acelera el electrón expulsado. Después de que el electrón es expulsado, el átomo queda en un estado altamente excitado y por lo tanto muy inestable. Para que se reestablezca la estabilidad, los electrones de las capas adyacentes llenan el espacio vacante, al pasar un electrón de otra capa y con una energía diferente al del electrón saliente hay una diferencia de energía, la cual se emite en forma de radiación de rayos X. Este proceso de emitir rayos X es conocido como fluorescencia de rayos X. El fotón de rayos X emitido tiene una energía específica igual a la diferencia entre las dos energías de enlace de un electrón de las capas interna y adyacente, y esta energía es única para cada elemento (Meléndez-Pizarro y Camacho-Dávila, 2009).



Figura 6. Sistema XRF Spectro Xepos 03 SLD utilizado para el análisis de composición elemental de los sedimentos del núcleo HX10

Procedimiento:

Se pesaron aproximadamente 2 g de muestra molida y seca en celdas con fondo recubierto con film MYLAR, que posteriormente se colocaron en el equipo XRF. Para determinar la exactitud de las mediciones se utilizaron los materiales de referencia certificados (MCR) IAEA 158 sedimento marino y PACS-2 sedimento marino; en donde la mayoría de elementos, las concentraciones determinadas eran estadísticamente iguales a los valores de referencia, lo que indicaba la adecuación del método para el propósito establecido.

4.4.6. Fechado del núcleo HX10 (tasas de acumulación y modelos de edad)

La actividad total del ^{210}Pb (^{210}Pb total) se determinó por espectrometría alfa a través de su descendiente radioactivo ^{210}Po , mediante la suposición de equilibrio secular entre ambos radionúclidos. Las muestras fueron sometidas a una digestión ácida con HNO_3 , HCl y HF concentrados (5:4:1) (Loring y Rantala, 1992) sobre una plancha de calentamiento a 120°C , durante 12 h. Posteriormente los ácidos se evaporaron a 70°C para evitar que se evaporen los isótopos de polonio. El residuo se disolvió en HCl concentrado y se evaporó hasta sequedad, cuatro veces. El residuo se resuspendió en 50 mL de HCl 0.5 N y se centrifugó a 3000 rpm, durante 10 minutos. El sobrenadante se depositó en un vaso de precipitados de 200 mL y se añadieron 0.2 g de ácido ascórbico. El aislamiento de los isótopos de Po se realizó por depósito espontáneo en discos de Ag de 2 cm de diámetro (Flynn, 1968). La actividad del ^{210}Pb se midió en un detector de partículas alfa (detector de barrera con superficie de silicio EG&G Ortec TM modelo 574) hasta obtener al menos 400 cuentas en el espectro más débil entre los isótopos analizados.

La determinación ^{210}Pb de base (^{226}Ra) se determinó por espectrometría gamma. Las muestras para la determinación de radionúclidos emisores gamma se colocaron en una geometría 2 de medición, que se sella herméticamente para evitar la exhalación de gas (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). Las muestras permanecieron al menos 21 días selladas antes de la determinación, para que el ^{214}Pb y ^{214}Bi se encuentren en equilibrio con el ^{226}Ra (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). La determinación de las actividades requiere una previa calibración del detector mediante patrones certificados y/o modelos matemáticos (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2012). La actividad de ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), se estimó mediante la diferencia entre las actividades de ^{210}Pb total y el ^{210}Pb de base.

La determinación de la edad de los sedimentos y las tasas de acumulación másica (TAM) y sedimentaria (TAS) se realizó mediante el modelo de fechado “Flujo constante” (CF por sus siglas en inglés; Robbins, 1978) que tiene como hipótesis fundamental que el flujo de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ hacia los sedimentos es constante. La descripción de los fundamentos del fechado con ^{210}Pb y las ecuaciones utilizadas para el cálculo de edades y tasas de acumulación se encuentran en Sánchez-Cabeza *et al.* (2012). El cálculo de incertidumbres se realizó con un método de simulación de Monte Carlo (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2014).

4.4.7. Procedencia de materia orgánica en los sedimentos del núcleo HX10

La relación C/N es un indicador del origen de la materia orgánica (Stein, 1991). La determinación de carbono total (CT), carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (NT) se realizó mediante la técnica de combustión a alta temperatura utilizando el analizador elemental Vario MICRO Cube Select de la marca Elementar con automuestreador. Las muestras se alimentan automáticamente a una zona de combustión; los gases resultantes pasan por una zona catalítica de postcombustión y luego una zona de reducción. Los gases formados (N₂, H₂O, CO₂ y SO₂) transportados por helio gaseoso se separan secuencialmente por una columna de desorción programable a temperatura y se determinan cuantitativamente en un detector de termoconductividad. Una computadora conectada calcula las concentraciones de elementos a partir de la señal del detector y el peso de la muestra.

Procedimiento:

Se pesaron aproximadamente 5 mg de sedimento molido y seco para analizar CT y NT directamente en el equipo; para analizar el CO la muestra se descalcificó previamente, mediante la adición de HCl 1M para disolver el CaCO₃. La muestra se adicionó con agua desionizada, se centrifugó, liofilizó y finalmente se analizó en el analizador elemental. Con los valores de C y N total se calculó la relación molar C/N (Ec. 8).

$$C/N = \frac{C/12}{N/14} \quad (\text{Ec. 8})$$

4.4.8. Almacenamiento de carbono en el núcleo HX10

El almacenamiento de carbono en sedimentos dentro de la laguna Yalahau está determinado por el porcentaje de carbono dentro de la zona donde se extrajo el núcleo, la profundidad del sedimento y la profundidad e intervalo de la submuestra (Howard *et al.*, 2014).

Procedimiento:

El almacenamiento de carbono orgánico en el sedimento de la laguna Yalahau se evaluó a través del método propuesto por Howard *et al.* (2014) mediante los siguientes pasos:

- Paso 1: Para cada intervalo del núcleo muestreado/analizado, se calculó la densidad de carbono orgánico del sedimento de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Densidad de carbono del sedimento } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \\ \left[\text{Densidad aparente seca } \left(\frac{g}{cm^3} \right) \right] * \left[\frac{\%CO}{100} \right] \end{aligned} \quad (\text{Ec. 9})$$

El porcentaje de carbono se determinó mediante el método de Walkley y Black (1934) explicado previamente en el punto 4.4.2.

- Paso 2: Se calcula la cantidad de carbono en las diversas secciones del núcleo muestreado multiplicando el valor de densidad de carbono del sedimento obtenido en el paso 1 por el grosor del intervalo de la muestra (cm):

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de carbono en la sección del núcleo } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \\ \left[\text{Densidad de carbono del sedimento } \left(\frac{g}{cm^3} \right) \right] * [\text{Intervalo de espesor (cm)}] \end{aligned} \quad (\text{Ec.10})$$

- Paso 3: Se sumó la cantidad de carbono en las secciones de todo el núcleo HX10 sobre la profundidad de muestreo total (1 m como mínimo). En el caso de núcleo HX10 solo alcanzaba los 57 cm de profundidad por lo que se calculó el promedio de todas las secciones, este promedio se utilizó como carbono de cada segmento faltante para completar el metro de profundidad.

$$\begin{aligned} \text{Núcleo HX10} = & \text{Cantidad de carbono en la sección del núcleo A } \left(\frac{g}{cm^3} \right) + \\ & \text{Cantidad de carbono en la sección del núcleo B } \left(\frac{g}{cm^3} \right) + \\ & \text{Cantidad de carbono en la sección del núcleo C } \left(\frac{g}{cm^3} \right) + \\ & \dots \text{todas las muestras del núcleo HX10} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 11})$$

- Paso 4: El carbono de todo el núcleo HX10 del paso 3 se convirtió en las unidades comúnmente utilizadas en la evaluación de la reserva de carbono (Mg C/ hectárea-cm) utilizando los siguientes factores de conversión de la unidad (Hay 1,000,000 g por Mg (megagramo) y 100,000,000 cm² por hectárea):

$$\text{Carbono total} \left(\frac{\text{MgC}}{\text{hectarea-cm}} \right) = \text{Carbono del núcleo sumado} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ Mg}}{1,000,000 \text{ g}} \right) * \left(\frac{100,000,000 \text{ cm}^2}{1 \text{ hectárea}} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

La unidad aquí es Mg C/ hectárea, y es una unidad típica utilizada en evaluación de almacén de carbono.

4.5. Análisis Estadísticos

Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis, sobre la granulometría y carbono orgánico, basadas sobre diferencias mínimas significativas usando un modelo lineal generalizado ($p < 0.05$).

CAPÍTULO 5

5. Resultados y discusión

5.1. Granulometría

Los resultados granulométricos (tamaño gráfico promedio, desviación estándar gráfica inclusiva y asimetría gráfica inclusiva) para cada muestreo se describen a continuación.

5.1.1. Tamaño gráfico promedio (Mz)

La Figura 7 desprende: (i) en las 3 temporadas de muestreo la laguna Yalahau tiene un tamaño gráfico promedio de entre 4 phi a -1 phi (0.625 mm a 2 mm) correspondiendo a arenas en general; (ii) en la temporada de secas se presenta un mayor porcentaje de arenas medias (55%) mientras que en la temporada de lluvias y nortes existe un mayor porcentaje de arenas finas (55% y 45% respectivamente). El tamaño de grano del sedimento influye en la cantidad de CO y MO que están presente, en donde a menor tamaño de grano se presenta una mayor acumulación de CO y MO (Valette, 1993).

5.1.2. Desviación estándar gráfica inclusiva (σ)

En la Figura 8 se puede observar que en las 3 temporadas los sedimentos de la laguna Yalahau muestran valores altos de desviación estándar inclusiva, que indican una mala clasificación (1 phi a 2 phi) en los sedimentos. La mezcla de partículas finas con partículas gruesas genera un aumento en los valores de desviación estándar, siendo estos ambientes sedimentarios heterogéneos (Folk y Ward, 1957; Héquette *et al.*, 2008).

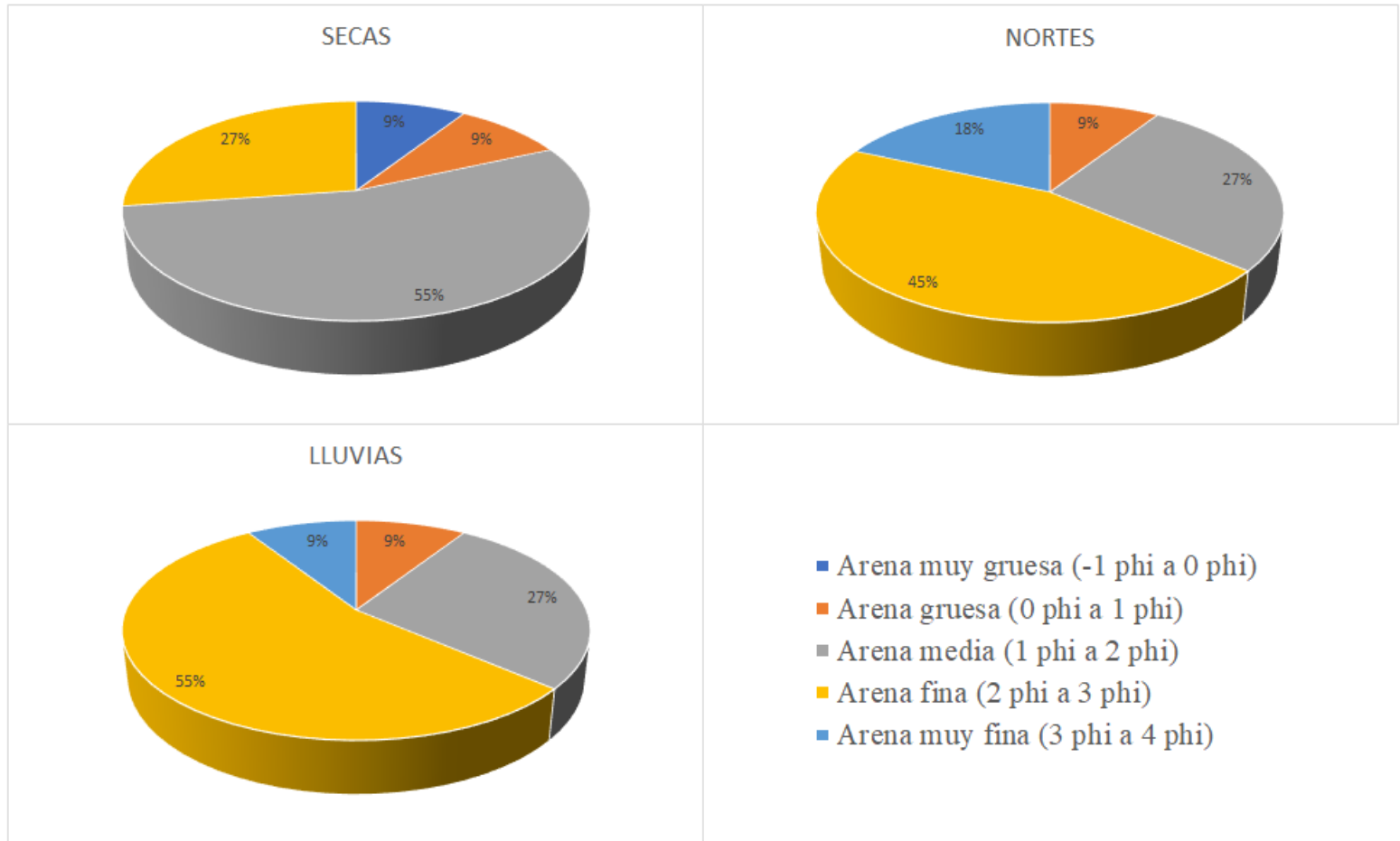


Figura 7. Distribución de tamaño promedio de grano (unidades phi) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm en los sedimentos de 11 estaciones en 3 temporadas de muestreo en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo

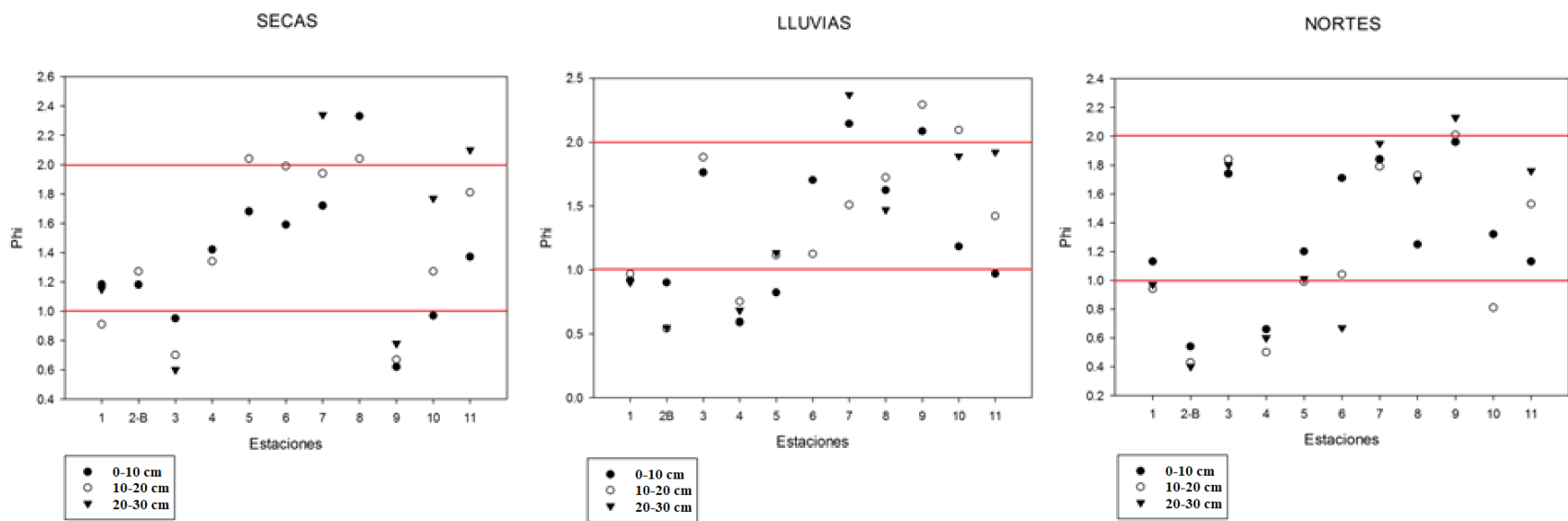


Figura 8. Desviación estándar inclusiva (unidades phi) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

5.1.3. Asimetría gráfica inclusiva (Ski)

La Tabla 3 muestra los valores de asimetría en los sedimentos en las estaciones de la laguna Yalahau en los 3 muestreos realizados. Se puede observar que la asimetría esta inclinada hacia phi negativos. Los valores negativos de asimetría, se relacionan con la mala clasificación del sedimento (Gao *et al.*, 1994; Parrado y Achab, 1999), el movimiento de la media y la moda al interior de la curva de distribución gráfica hacia la izquierda, haciéndola decrecer (Emeka *et al.*, 2010), lo que indica, que el traslado de los granos finos presentes en la cola de distribución se da por selección de partículas ante una energía cinética media más alta de lo normal (en términos de intensidad y duración), con turbulencia y adiciones de restos calcáreos gruesos.

Tabla 3. Grado de asimetría gráfica inclusiva (Ski) en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

	Ski								
	Secas			Lluvias			Nortes		
	0 - 10	10 – 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30
M HOL 1	-0.58	-0.24	-0.30	-0.56	-0.56	-0.28	-0.5	-0.43	-0.21
M HOL 2 B	0.43	0.49	ND	-0.1	-0.1	-0.34	-0.31	-0.18	-0.11
M HOL 3	-0.26	-0.15	-0.27	0.1	0.1	ND	0.24	0.37	0.36
M HOL 4	-0.36	-0.53	ND	-0.1	-0.1	-0.16	-0.16	0.16	-0.16
M HOL 5	-0.01	0.07	ND	-0.47	-0.47	-0.56	-0.36	-0.47	-0.57
M HOL 6	0.13	-0.04	ND	-0.26	-0.26	ND	-0.91	-0.84	-0.51
M HOL 7	0.06	-0.08	-0.07	-0.17	-0.17	-0.09	0.04	-0.22	-0.01
M-HOL 8	-0.02	0.65	ND	-0.29	-0.29	-0.67	-0.25	-0.15	-0.39
M-HOL 9	-0.32	-0.26	-0.5	-0.03	-0.03	ND	0	0.09	-0.22
M HOL 10	-0.91	-0.62	-0.46	-0.76	-0.76	-0.5	-0.53	0.01	ND
M HOL 11	-0.62	-0.3	-0.52	-0.63	-0.63	-0.48	-0.42	-0.43	-0.25

ND = No disponible (la longitud de los núcleos es menor a 30 cm)

Se realizó una prueba de normalidad y homocedasticidad y no cumplieron con los supuestos por lo que se realizó una prueba de Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica con el fin de determinar si las muestras proceden de una misma población o si al menos una muestra

procede de una población diferente a las otras), en donde no se encontraron diferencias significativas temporales y espaciales ($p > 0.05$) lo cual indica un ambiente homogéneo, la mezcla de arenas en diferentes proporciones es característica de zonas someras y cercanas a la costa (Poppe *et al.*, 2000).

En la laguna Yalahau se observa en todas las estaciones de muestreo que el sedimento está constituido por arena muy gruesas, gruesas, medias, finas y muy finas con un valor máximo de 3.48 phi en la estación M HOL 5 en temporada de lluvias y nortes, y un valor mínimo de -0.8 phi en la estación M HOL 2 B en época de secas. La naturaleza química y física de la arena de la costa depende de la composición, en el caso de la laguna se encuentra que los granos están compuestos principalmente de fragmentos subredondeados a redondeados de ostras, bivalvos y gasteropodos, siendo común en las franjas costeras del Mar Caribe y del Golfo de México.

El predominio de arenas finas y medias puede ser resultado de las condiciones hidrodinámicas (e.g., oleaje, corrientes, mareas) y las características estructurales de la VAS, que son los factores principales que afectan la distribución del tamaño medio de grano del sedimento (May-Kú *et al.*, 2016). Por ejemplo, el predominio de sedimentos finos se ha asociado con áreas geográficamente aisladas donde la energía de los procesos hidrodinámicos es baja, así como con praderas de pastos marinos más densas, ya que las hojas reducen el movimiento del agua y favorecen la deposición y sedimentación, mientras que los rizomas actúan como estabilizadores de éstos en el fondo. Por otra parte, los sedimentos gruesos se han asociado con áreas expuestas donde la energía hidrodinámica es alta (Teeteb *et al.*, 2001; Peterson *et al.*, 2004).

5.2. Carbono orgánico

Los porcentajes de carbono orgánico en la temporada de secas, lluvias y nortes en los sedimentos de la laguna Yalahau en los 3 estratos (0-10, 10-20, 20-30) se localizan en la Figura 9. Los valores de la MO se presentan en el Anexo 2.

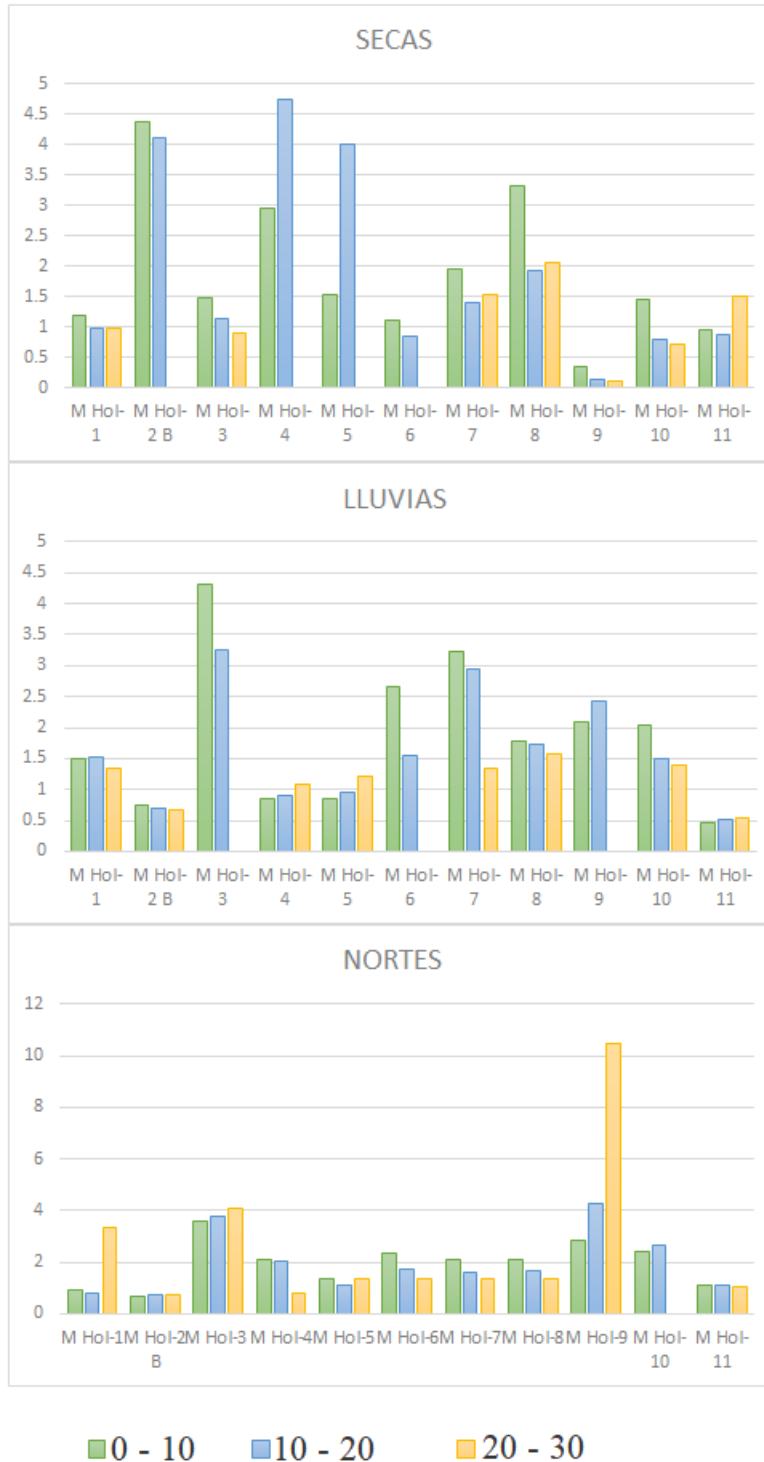


Figura 9. Porcentaje de carbono orgánico en estratos de 0 -10, 10 – 20 y 20 -30 cm de sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

De la Figura 9 se desprende que: (i) las concentraciones de CO oscilaron entre 0.10% (estrato 20 – 30 cm de la estación 9 época de secas) y 10.48% (estrato 20 – 30 cm de la estación 9 época de nortes); (ii) los valores más altos de CO se encuentran en la superficie de cada uno de los núcleos, excepto el estrato de 20 – 30 cm del núcleo de la estación M HOL 9; (iii) los valores más altos de concentración de CO en el estrato superficial se encontraron en las estaciones M HOL 2 B y M HOL 3 y los más bajos en la estación M HOL 11; (iv) los valores promedios de las concentraciones de CO en los sedimentos superficiales son del mismo orden de magnitud en las 3 épocas del año.

Se realizó una prueba de normalidad y homocedasticidad y no cumplieron con los supuestos por lo que se realizó una prueba de Kruskal-Wallis en donde, comparando los resultados obtenidos de manera temporal y espacial, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$).

Los sedimentos de la laguna, con tamaño de grano arenoso, tuvieron contenidos promedios de CO entre 0.5 y 5.86 % (Tabla 4), esta gran variabilidad espacial en Yalahau, también se ha observado en otras lagunas de la Península Yucatán, sistemas en los que se presentan zonas de influencia del manglar, zonas de extensas poblaciones de pastos marinos y otras en las que no hay aporte de materia orgánica (Aguilar-Salazar *et al.*, 2003; García-Hernández y Ordóñez-López, 2006). En términos generales, los valores de CO en los sedimentos de la laguna Yalahau se asocian con los aportes de materia orgánica derivado de la presencia de la VAS y presencia de manglares alrededor de la laguna sin descartar el aporte por fitoplancton (Alongi 1998; Calva-Benitez *et al.*, 2006) asimismo, se considera la entrada de material orgánico incluso de origen antropogénico.

Tabla 4. Porcentaje promedio de CO en los estratos de los sedimentos de 11 estaciones, en 3 temporadas de muestreo, en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

	Secas		Lluvias		Nortes	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
M HOL-1	1.05	0.11	1.45	0.1	1.67	1.45
M HOL-2 B	4.25	0.19	0.7	0.05	0.7	0.04
M HOL-3	1.17	0.29	3.79	0.74	3.81	0.23
M HOL-4	3.84	1.27	0.94	0.13	1.66	0.73
M HOL-5	2.77	1.74	1.01	0.19	1.29	0.14
M HOL-6	0.98	0.18	2.1	0.78	1.82	0.5
M HOL-7	1.63	0.29	2.51	1.02	1.7	0.37
M HOL-8	2.44	0.77	1.69	0.11	1.69	0.37
M HOL-9	0.20	0.14	2.26	0.23	5.86	4.06
M HOL-10	0.99	0.41	1.65	0.35	2.53	0.17
M HOL11	1.11	0.34	0.5	0.04	1.07	0.03

Los promedios más altos se observan en la época de secas. Se registraron porcentajes más bajos de CO en los puntos externos a la laguna (M HOL 1 y M HOL 11) probablemente porque estos puntos están sujeto a una mayor influencia de los movimientos de agua tanto de entrada como de salida del sistema lagunar. El tipo de sedimento también influyó en las concentraciones de CO, ya que los sedimentos finos tienen una gran capacidad de adsorción tanto para la materia orgánica como para los contaminantes (Valette, 1993) mientras que los sedimentos más gruesos no son adsorbentes óptimos de materia orgánica (Grenz *et al.*, 2010); la laguna Yalahau muestra una distribución de sedimentos con la mayor proporción de arenas gruesas cerca de la influencia de la boca del sistema y los sedimentos finos en áreas alejadas de la influencia marina y con escasa circulación.

5.3. Cobertura vegetal

La Figura 10 muestra la cobertura de la VAS (km) de las 11 estaciones de muestreo a lo largo de laguna Yalahau. La estación M HOL 5 no pudo ser recorrida por la ecosonda, debido a que se ubica muy cerca del área con mayor turismo de Holbox y la lancha no pudo entrar en esa zona. La cobertura vegetal por especies se muestra en la Tabla 5 y la Figura 11.

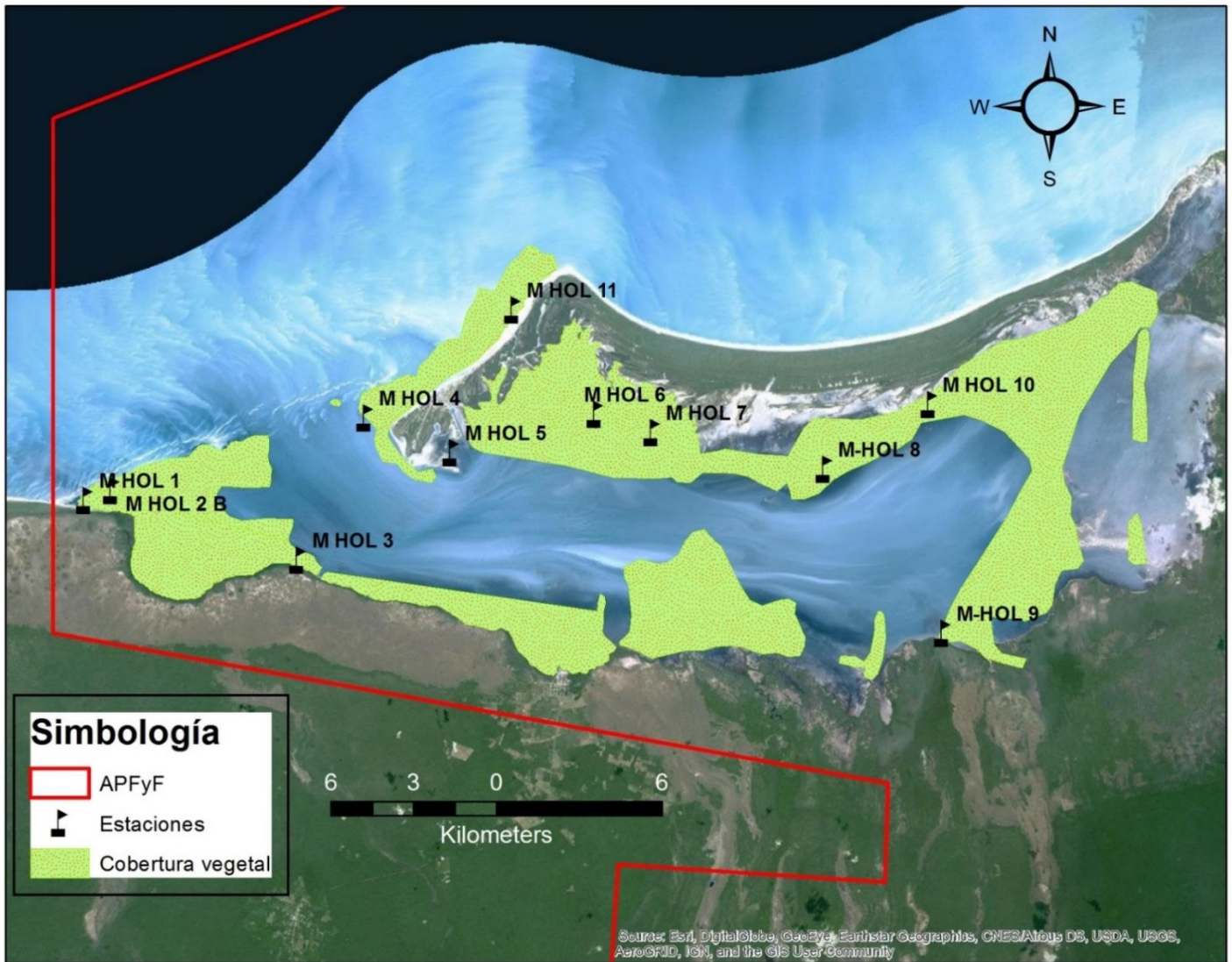


Figura 10. Cobertura de la Vegetación Acuática Sumergida (VAS) (Ha) de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo determinada mediante la ecosonda BioSonics EcoSAV

Tabla 5. Áreas de cobertura vegetal por especies en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo perteneciente al Área de Protección de Flora y Fauna de Yum Balam.

ID	Sp	Área (Ha)	Área (km²)
44	<i>Tt, Sf</i>	1220.10877	12.2010877
47	<i>Tt, Sf, Hw</i>	1862.75965	18.6275965
38	<i>Tt</i>	177.802244	1.77802244
45	<i>Tt</i>	1316.64219	13.1664219
35	<i>Tt, Hw</i>	87.8179245	0.87817925
37	<i>Tt</i>	137.131584	1.37131584
46	<i>Tt</i>	1496.61658	14.9661658
43	<i>Tt, Sf</i>	1144.09346	11.4409346
26	<i>Sf</i>	7.07883518	0.07078835
51	<i>Tt, Sf, Hw</i>	8191.12739	81.9112739
TOTAL		15641.1786	156.411786

Tt = *Thalassia testudinum*

Sf = *Syringodium filiforme*

Hw = *Halodule wrightii*

De la Tabla 5 se desprende que: (i) *T. testudinum* está presente en todas las estaciones de muestreo, incluso se encontraron parches en la estación considerada como Blanco (M HOL 2B); (ii) La laguna está compuesta por praderas multiespecíficas (dos a 3 especies por pradera) y praderas monoespecíficas (una especie) ; (iii) Se determinó una extensión de 156.411786 km² (5641.1786 ha) de vegetación acuática sumergida a lo largo las 11 estaciones de muestreo de la laguna Yalahau.

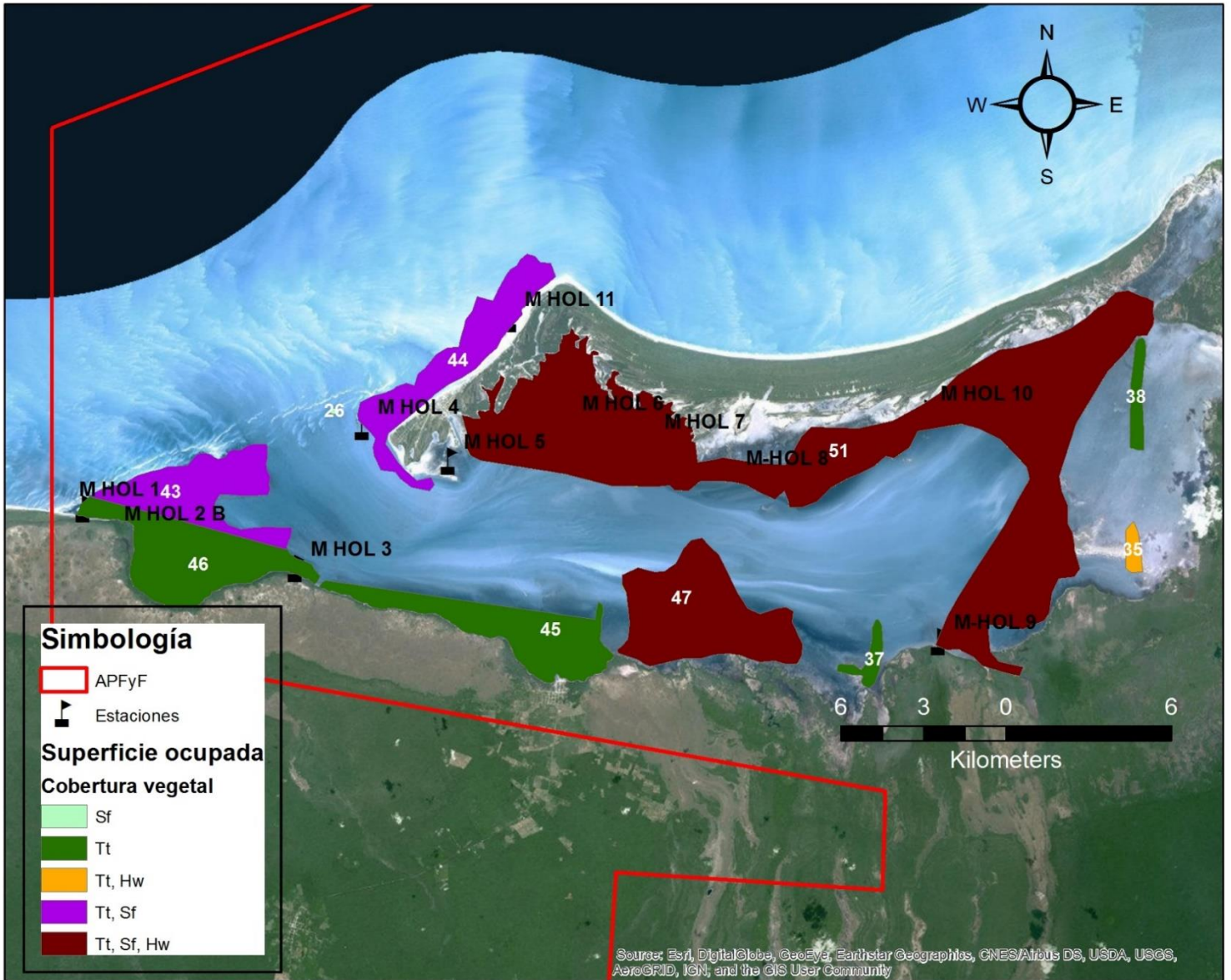


Figura 11. Cobertura vegetal por especies encontradas en a lo largo de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Con base en la Figura 11, se observa que el sistema lagunar de Yalahau presenta áreas someras con praderas mixtas en el interior de la laguna conformada por las especies de pastos marinos *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme* y *Thalassia testudinum* siendo esta última la de mayor distribución en la laguna; esto concuerda con los estudios realizados por Ordóñez-López y García-Hernández (2005), May-Kú *et al.* (2010) y Castillo-Geniz (2007) en los cuales identifican a la especie *T.testudinum* como la especie dominante. Al aproximarse a la boca de la laguna la diversidad disminuye, se observa únicamente a la especie *T. testudinum* y en los puntos externos a la laguna una asociación de *T. testudinum* con *S. filiforme*.

La distribución espacial de las diversas especies de VAS de acuerdo con Herrera-Silveira *et al.* (1998) y Aguilar-Salazar *et al.* (2003), está determinada por las diferencias hidrológicas en la laguna de Yalahau como resultado de la asociación entre la fuerza y dirección de los vientos, tiempo de residencia del agua, intensos flujos de marea y aportes dulceacuícolas subterráneos (manantiales). Asimismo, el aporte de nutrientes da una mayor transparencia e intensidad en la radiación solar que también influyeron en la condición de *T. testudinum*, reflejándose en una mayor biomasa y área foliar en la zona externa (García-Hernández y Ordúñez-López, 2007).

Kilminster *et al.* (2015) mencionan que las comunidades de pastos marinos pueden estar formadas por especies cuyas estrategias de historia de vida pueden considerarse como colonizadoras, oportunistas y persistentes. Con base a esto, se encontraron en la laguna las 3 clasificaciones:

- *T testudinum*, especie persistente con largos tiempos (muchos meses - años) de renovación de rametos, clonalidad de genes de vida larga (milenios en casos extremos), la madurez sexual que se alcanza más lentamente (años), el esfuerzo reproductivo para la producción de la semilla que no compromete el crecimiento vegetativo, y los bancos de semillas que generalmente no se forman; tiene una alta resistencia fisiológica pero tarda en recuperarse de las perturbaciones y su biomasa de alto rendimiento contribuye a su capacidad para estabilizar y/o atrapar sedimento.

- *H. wrightii*, especie colonizadora caracterizada por tiempos de renovación cortos (< meses) de los rametos, la madurez sexual se alcanza rápidamente (< meses) y una gran inversión en la reproducción sexual para producir semillas inactivas; tienen la capacidad de construir un banco de semillas, incluso de corta duración, así como baja resistencia fisiológica a las perturbaciones, pero se recuperan rápidamente.
- *S. filiforme* como oportunista, este tipo de especies tiene elementos centrales de las persistentes y colonizadoras, ya que tienen la capacidad de colonizar, producir semillas o plántulas y obtener biomasa y clonalidad significativas y persistentes, así como también la capacidad de recuperarse rápidamente por medio de semillas (o nuevos reclutas) cuando sea necesario. La persistencia genética, particularmente para las especies oportunistas, todavía no se comprende bien.

Kilminster *et al.* (2015) mencionan que las praderas duraderas contienen especies que perduran en el tiempo, aunque puede haber variaciones en la composición de especies, la abundancia y la fenología; es decir, las praderas duraderas están presentes durante 5 años o más en condiciones naturales. La pradera de pastos de la laguna Yalahau, dominada por una especie persistente y que ha perdurado en el tiempo, como se muestran en estudios realizados por Ordóñez-López y García-Hernández (2005), García-Hernández y Ordóñez-López (2007), Castillo-Geniz (2007) Tran *et al.* (2008) May-Kú *et al.*, (2010) y este estudio, puede entonces ser considerada como una pradera duradera.

5.4. Concentración de carbono orgánico en el núcleo HX10

El perfil de concentración de CO respecto a la profundidad del núcleo HX10 (Figura 12) mostró un perfil típico, con los valores más altos en la superficie y valores que disminuyen con la profundidad, con una tendencia de tipo exponencial. La ausencia de secciones homogéneas en el perfil indica que el mezclado o alteración de los sedimentos puede considerarse despreciable.

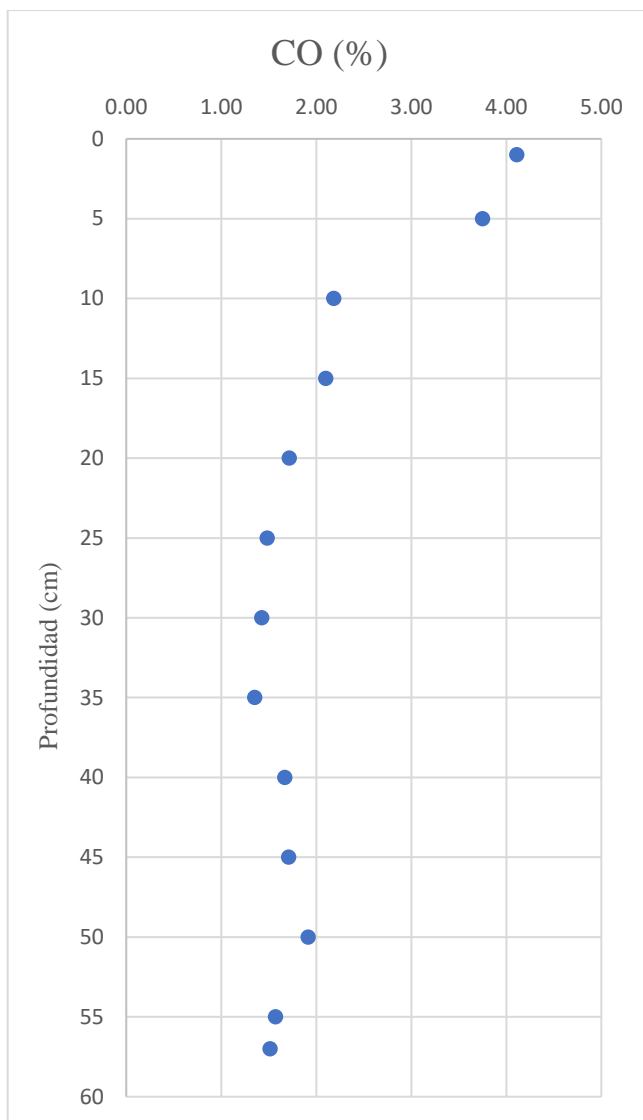


Figura 12. Perfil del núcleo HX10 con respecto a la profundidad de la laguna Yalahau, Holbox, Q.Roo.

El núcleo HX10 presentó una distribución vertical con una variación cercana a una disminución exponencial en CO. Esto se debe a que en la zona podría haber una escasa o nula bioperturbación, una tasa de sedimentación más bien constante y que el material depositado ha tenido una composición química relativamente estable en el tiempo (Rojas y Silva, 2003). Esta distribución vertical exponencial es típica de situaciones en que los procesos diagenéticos de la materia orgánica, ocurren de acuerdo con una cinética de primer orden (Berner, 1980; Rojas, 2002).

Calva-Benites *et al.* (2011) determinaron concentraciones de CO superficial (20 cm de profundidad) en ecosistemas costeros con *T. testudinum* del sureste del golfo de México en donde los porcentajes de CO en zonas estearinas (Laguna de Términos, Estero de Champoton, Tenabo, Isla Arena, Laguna Celestún) varió de 0.77 % a 8.37 % y en zonas arrecifales (Puerto Morelos, Mahahual y la playa de Xcalak) sus porcentajes variaron de 0.53% a 2.72%. Los porcentajes menores encontrados en la zona arrecifal (Caribe) se debió principalmente a que la zona se considera como oligotrófica y a que las velocidades de las corrientes son mayores en comparación con las costas de Yucatán y Campeche. Las concentraciones de CO superficial de la laguna Yalahau son semejantes a los encontrados en las zonas de Yucatán y Campeche estudiadas por Calva Benites *et al.* (2011) debido a que Yalahau es una laguna estuarina y a que las velocidades de corriente son menores en comparación con las del Caribe.

Sin embargo, en estos estudios solo se analizó el CO superficial y la mayor parte de los estudios que han analizado el contenido de CO, en suelos más profundos, en México se basa principalmente en ecosistemas terrestres o manglares. Bojorquez-Sánchez (2017) analizó la distribución vertical de CO en los sedimentos del manglar en la laguna El Llano, Ver., México; el comportamiento de los 2 núcleos de la laguna El Llano fue casi constante a lo largo de los perfiles, es decir, no se observaron tendencias de posibles procesos diagenéticos en los perfiles, difiriendo con el núcleo HX10, Zenteno-Palma *et al.* (2015) analizaron la distribución vertical de CO en sedimentos de los manglares de la laguna Cuyutlán en Colima, México en donde los núcleos mostraron un comportamiento parecido al núcleo HX10, es decir, las concentraciones de CO superficial fueron mayores con una tendencia a disminuir a lo largo de los núcleos. En ambos estudios las concentraciones de CO en los sedimentos de los manglares analizados fueron mayores que en las praderas de pastos marinos del núcleo HX10.

5.5. Carbonato de calcio en el núcleo HX10

La distribución y preservación del CO y CaCO₃ en sedimentos marinos es importante porque están vinculados al ciclo del carbono y a la regulación del CO₂ atmosférico (Sánchez *et al.*, 2013). La Figura 13 muestra el porcentaje de carbono en los sedimentos del núcleo HX10.

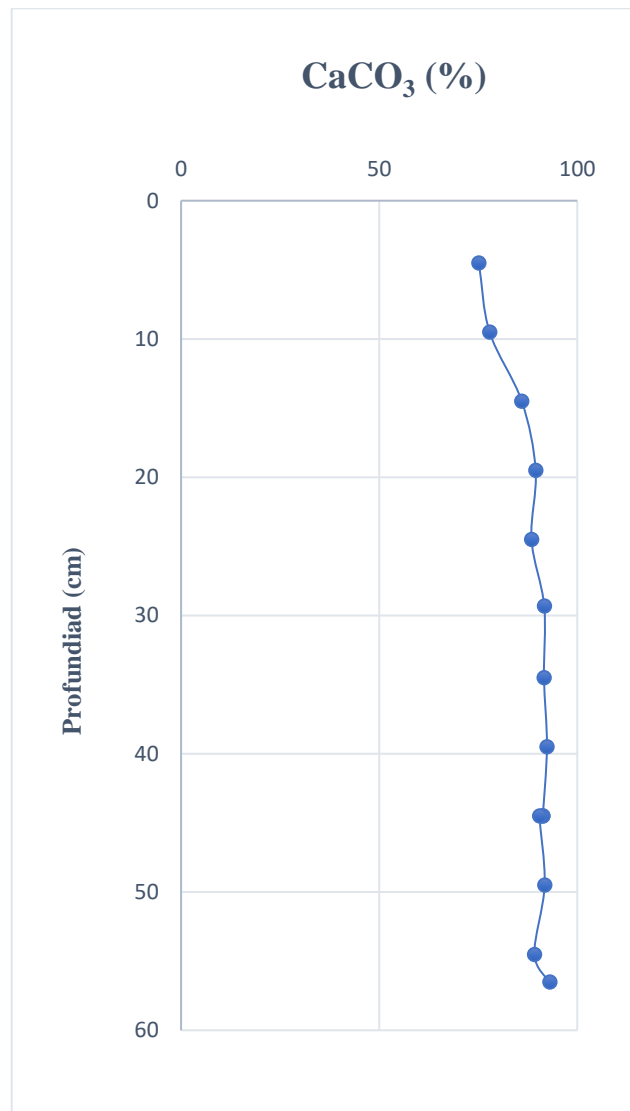


Figura 13. Porcentaje de carbonatos de calcio obtenidos en el núcleo HX10 en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

La Figura 13 muestra que: (i) El CaCO₃ es el mayor componente biogénico encontrado en el núcleo; (ii) el perfil de CaCO₃ es casi homogéneo a lo largo del núcleo sedimentario (concentraciones entre 75.16 % a 92.34%), con concentraciones ligeramente menores hacia la superficie.

Los valores de CO y de CaCO₃ del núcleo HX10 muestran que, en las partes más profundas de los núcleos, el contenido de carbonato es alto y bajo en carbón orgánico y en la parte

superior el contenido de carbonatos es bajo y el orgánico más alto. La disminución de CO con respecto a la profundidad se explica con base en una serie de reacciones en secuencia considerando una sucesión de aceptores de electrones u oxidantes; en las capas más superficiales el oxígeno suele ser el primario (diagénesis óxica), posteriormente en capas subsuperficiales donde el oxígeno tiende a disminuir considerablemente, la descomposición continua a través de otros oxidantes secundarios, lo que se conoce como diagénesis subóxica (zona de reducción de nitratos y zona de reducción de óxidos metálicos) y después de agotados estos oxidantes, en los sedimentos más profundos se presenta la diagénesis anóxica (zona de sulfato-reducción y reducción de carbonatos) (Chester, 2000; Lens *et al.*, 2005). Las concentraciones de CaCO₃ tienen una ligera disminución hacia la superficie, esto podría involucrar un efecto de dilución ocasionado por el aumento en la abundancia de otros componentes sedimentarios como la MO (Raigoza-Viera, 2015). Los factores que controlan el contenido de CaCO₃ en sedimentos costeros son la dilución por material no calcáreo, la productividad de organismos calcáreos y la disolución de CaCO₃ (Archer, 1996; Jahnke y Jahnke, 2004; Morse, 2005; Naik y Naidu, 2008). En sedimentos someros como es el caso de la laguna Yalahau, la disolución de carbonatos ocurre en el agua intersticial debido a la oxidación del CO sedimentario, la cual es más intensa cuando está presente una capa bentónica fitodetrital (Martin y Sayles, 1999; de Villiers, 2005). Otro factor importante para considerar cuando se trata con el CaCO₃ es el estado de preservación, lo cual es el porcentaje fraccional de los caparazones de los organismos. Los caparazones son preservados en un estado inicial y empiezan un proceso de destrucción debido a la disolución química (Pazmiño y Michaud, 2009). El carbonato está saturado en la superficie y los procesos de disolución empiezan con el incremento de la presión y la disminución en la temperatura, conduciendo a un incremento en el contenido de CO₂ (Pazmiño y Michaud, 2009).

5.6. Composición elemental en el núcleo HX10

Del análisis por XRF de los sedimentos del núcleo HX10 se obtuvo la concentración de 36 elementos, que incluyen: 7 no metales (Si, S, Cl, As, Se, y Br) y 29 metales (Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Mo, Ag, Cd, Sn, Ba, La, Ce, W, Pb, Bi, Th y U).

De acuerdo con Koopmann *et al.* (1991) los siguientes elementos, en particular, se requieren para una medición rutinaria de sedimentos: aluminio (Al), hierro (Fe), cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg); ya que son especialmente relevantes para interpretar la contaminación, que se presenta por la actividad que se realiza en el mar cercano a las costas y por los desechos (Salazar *et al.*, 2004). La Figura 14 muestra los perfiles de dichos elementos registrados en el núcleo de sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

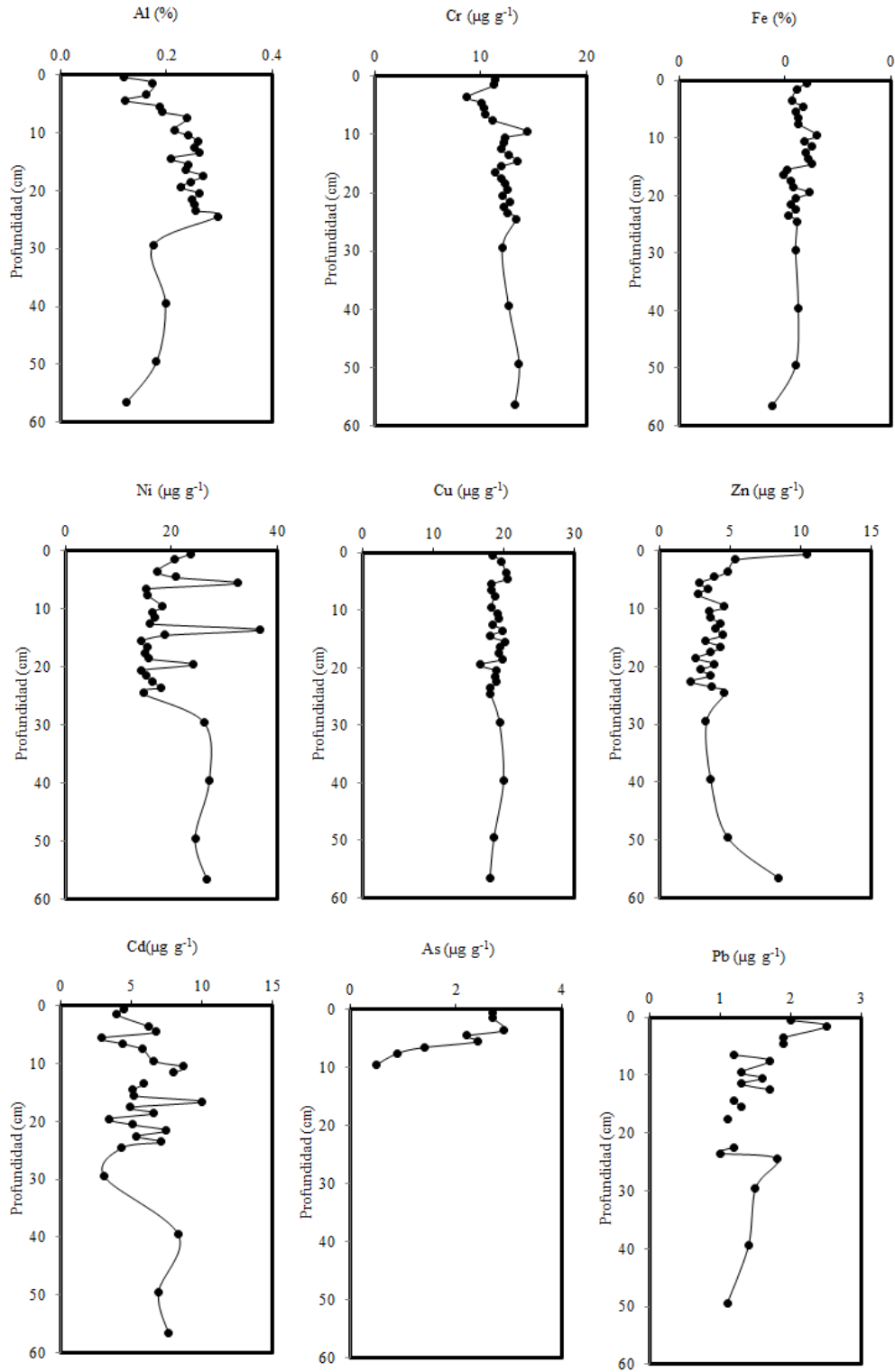


Figura 14. Perfiles de concentración de metales pesados (Al, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Pb) en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

En México no existen normas que establezcan los límites máximos permisibles (LMP) para metales en sedimentos; por lo tanto, las concentraciones de metales pesados en los sedimentos del núcleo HX10 se compararon con los valores de As, Cd, Ni y Pb contenidos en la Norma Oficial Mexicana de Criterios para la Determinación de Suelos Contaminados por Metales Pesados (NOM-147-SEMARNAT/ SSA1, 2004), aunque esta norma no incluye valores de Cr, Cu y Zn.

Las concentraciones determinadas en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau se encuentran por debajo de los límites para acciones de remediación incluidos en la NOM-147-SEMARNAT/ SSA1, 2004. Sin embargo, al comparar las concentraciones de Cr, Fe, Ni, Cd, Cu, Zn, As y Pb con el “Nivel de umbral de efectos” (TEL, por sus siglas en inglés) (Buchman, 2008) que representa la concentración por debajo de la cual es poco probable encontrar efectos adversos (Buchman, 2008), se encontró que las concentraciones de Cd, Cu y Ni en el núcleo HX10 están por encima de los valores TEL (Tabla 6) y, por lo que, este sitio se puede considerar como de mayor vulnerabilidad para la biota.

Tabla 6. Valores máximos, mínimos y promedios de la concentración de metales en sedimentos del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo comparado con los valores de referencia

	Máximo ($\mu\text{g/g}$)	\pm	Mínimo ($\mu\text{g/g}$)	\pm	Promedio ($\mu\text{g/g}$)	\pm	NOM-1477 (mg kg^{-1})	TEL (mg kg^{-1})
Cr	14.4	0.5	10.1	0.5	12	1.2	-	52.3
Ni	36.7	0.9	14.3	0.8	19.9	5.9	1600	15.9
Cu	20.6	0.8	16.6	0.8	18.9	0.9	-	18.7
Zn	10.4	0.4	2.6	0.4	4.2	1.7	-	124
Cd	10	1.1	2.9	0.9	5.9	1.8	37	0.680
As	2.9	0.2	0.5	0.2	2	0.9	22	7.24
Pb	1	0.1	2.5	0.2	1.5	0.4	400	30.24

*(Buchman, 2008)

NOM: Norma Oficial Mexicana-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar suelos contaminados por metales.

SQAGs: Guías de Evaluación de la Calidad de los Sedimentos en la Florida (por sus siglas en inglés, Florida Sediment Quality Assessment Guidelines)

TEL: Niveles de umbral de efectos (por sus siglas en inglés Threshold effects level)

Como se observa en la Tabla 6, las concentraciones de Cd, Cu, y Ni son mayores que los valores TEL. La mineralogía o parámetros geoquímicos (tales como la concentración de MO o de carbonatos), pueden afectar las concentraciones de metales (Luoma, 1990). Los metales como Cu y Ni tienen una gran afinidad con la MO, lo que provoca que los sedimentos que son ricos en MO acumulen una elevada cantidad de metales (Sterritt y Lester, 1980). En comparación con las concentraciones de MO de otros ecosistemas costeros con praderas de pasto marino de *T. testudinum* de Campeche, Yucatan y Quintana Roo realizado por Calva-Benitez *et al.* (2011) la MO de la laguna Yalahau es media, con una variación de 2.33% a 7.09% en el núcleo con los mayores porcentajes en la superficie; esta MO tiene una gran capacidad de formar complejos con Cu y Ni (Buffle, 1984). La presencia en los sedimentos de abundantes restos de los organismos calcáreos contribuye a que Cd tenga una concentración mayor debido a que se sabe que la estructura de CaCO_3 permite fácilmente sustituir los cationes de Ca^{2+} por los cationes de Cd^{2+} (Boyle, 1994; Mottl *et al.*, 1998); al respecto, Avelar *et al.* (2013) observaron que en la zona Norte de la laguna Yalahau existe una alta concentración de Cd principalmente en las hojas y rizoma de *T. testudinum*.

5.7. Tasas de acumulación y modelos de edad en el núcleo HX10

La Tabla 7 muestra el modelo de edad obtenido del núcleo HX10, la TAM y TAS de la laguna Yalahau, Holbox Quintana Roo

Tabla 7. Modelo de edad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Muestra	Profundidad (cm)	Año	±	TAM (g/cm² año)	±	TAS (cm/año)	±
Hx10 0-1	0.5	2014.14	0.30	0.14	0.02	0.41	0.06
Hx10 1-2	1.5	2011.83	0.44	0.13	0.02	0.43	0.06
Hx10 2-3	2.5	2008.43	0.65	0.11	0.01	0.29	0.04
Hx10 3-4	3.5	2004.56	0.89	0.10	0.01	0.26	0.04
Hx10 4-5	4.5	1998.07	1.33	0.09	0.01	0.15	0.02
Hx10 5-6	5.5	1990.25	1.94	0.08	0.01	0.13	0.02
Hx10 6-7	6.5	1982.09	2.69	0.08	0.01	0.12	0.02
Hx10 7-8	7.5	1974.85	3.54	0.08	0.01	0.14	0.03
Hx10 8-9	8.5	1965.09	4.93	0.08	0.02	0.10	0.02
Hx10 9-10	9.5	1955.25	6.66	0.09	0.03	0.10	0.03
Hx10 10-11	10.5	1947.25	8.52	0.08	0.03	0.12	0.05
Hx10 11-12	11.5	1936.36	11.65	0.08	0.03	0.09	0.04
Hx10 12-13	12.5	1924.80	16.11	0.07	0.04	0.09	0.05
Hx10 13-14	13.5	1911.00	23.27	0.07	0.05	0.07	0.06
Hx10 14-15	14.5	1899.07	31.36	0.07	0.08	0.08	0.10
Hx10 15-16	15.5	1886.45	43.57	0.06	0.09	0.08	0.12
Hx10 16-17	16.5	1865.24	73.84	0.05	0.09	0.05	0.09
Hx10 17-18	17.5	1827.02	191.75	0.03	0.11	0.03	0.10

TAM = Tasa de acumulación másica. TAS = Tasa de acumulación sedimentaria.

Las Figuras 15 y 16 muestran el perfil de las tasas de acumulación másica y sedimentaria, respectivamente, del núcleo HX10 obtenidos mediante el método de fechado con ^{210}Pb .

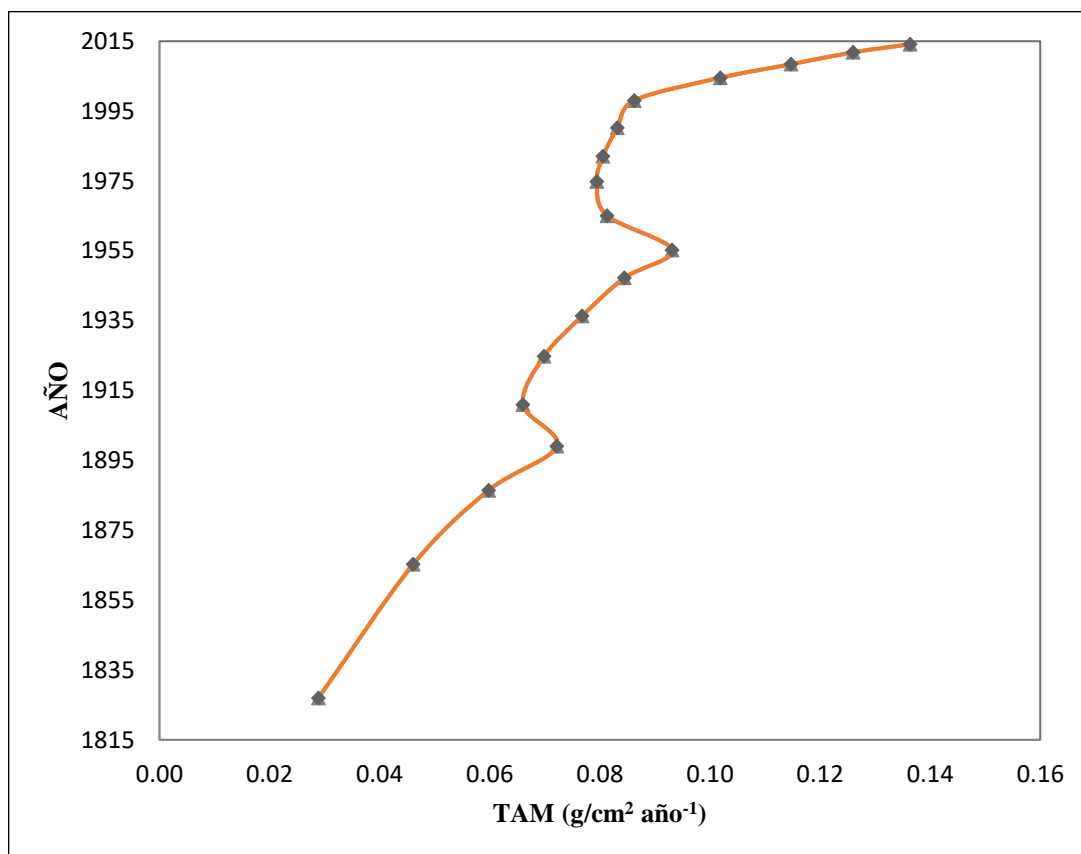


Figura 15. Distribución temporal de la tasa de acumulación másica (TAM, $\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) en el núcleo sedimentario HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

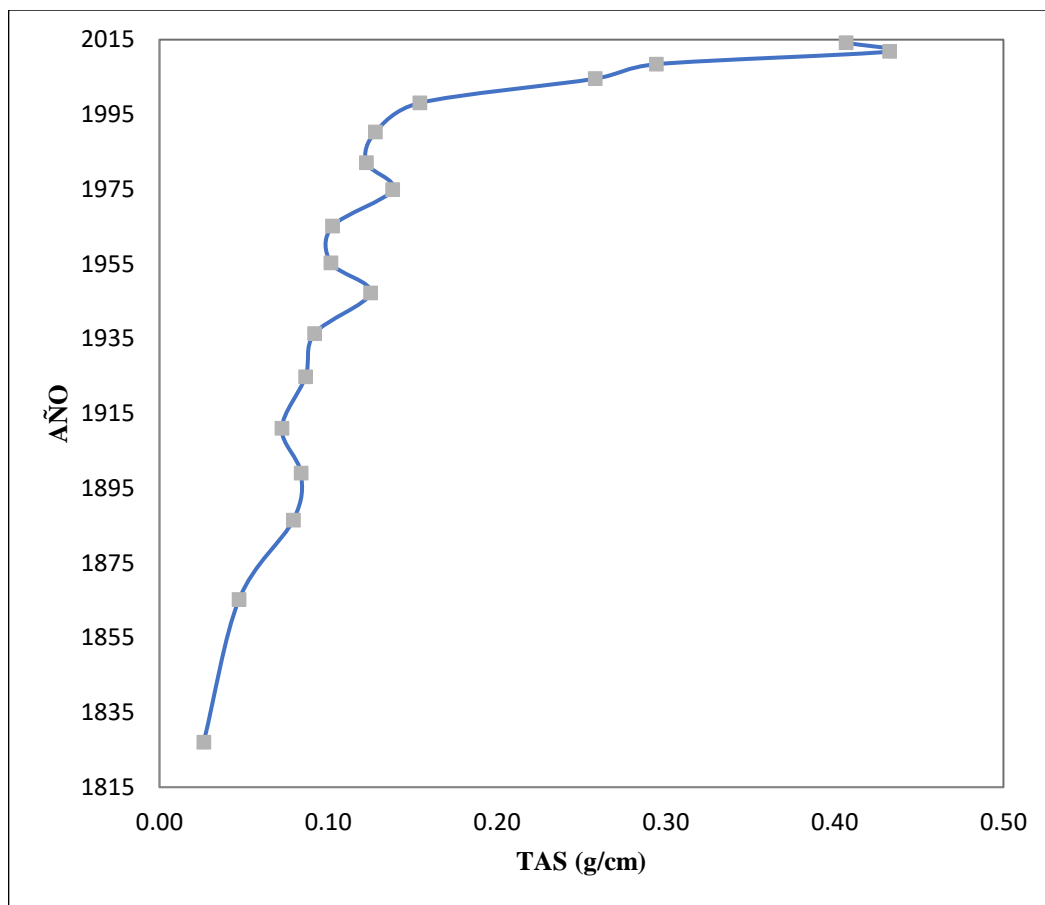


Figura 16. Tasa de acumulación sedimentaria (g cm^{-1}) en los sedimentos en la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Las figuras muestran claramente un aumento de las TAM y TAS hacia los años más recientes. El incremento en las tasas puede atribuirse a las actividades antrópicas relacionadas con el turismo como urbanización, construcción de muelles, natación y buceo ya que tienen el potencial de afectar la variabilidad ambiental natural (de Witt, 2011), así como a una mayor erosión en los terrenos aledaños a la laguna, resultado de deforestación y cambio de uso del suelo. El aumento abrupto de las TAM y TAS a mediados de la década de 1990 puede estar relacionado con el desarrollo turístico de Holbox. Los primeros hoteles se empezaron a construir en 1990, a partir de 1995 comenzó la venta de terrenos y en 1998 empezó el desarrollo a lo largo de la playa la zona hotelera (Palafox-Muñoz *et al.*, 2007).

5.8. Procedencia de la MO en los sedimentos del núcleo HX10

El C/N ratio determinado por análisis elemental de la MO, es ampliamente utilizado para distinguir entre el origen marino y terrestre de la materia orgánica. Los cambios de la relación C/N pueden reflejar cambios en las fuentes de suministro de la MO presente en los sedimentos (Thornton y MacManus, 1994). La Tabla 8 y Figura 17 presentan las proporciones de C/N obtenidas en el núcleo HX10 recolectado en la laguna Yalahau.

Tabla 8. Procedencia de la MO en los sedimentos del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Sección	Prof. (cm)	C /N molar	±
HX10 0-1	0.5	8.6	0.4
HX10 4-5	4.5	8.7	0.4
HX10 9-10	9.5	9.3	0.4
HX10 14-15	14.5	10.0	0.5
HX10 19-20	19.5	10.9	0.5
HX10 24-25	24.5	10.9	0.5
HX10 29-30	29.5	11	0.5
HX10 34-35	34.5	11.5	0.5
HX10 39-40	39.5	10.5	0.5
HX10 44-45	44.5	10.5	0.5
HX10 49-50	49.5	11.1	0.5
HX10 54-55	54.5	11.8	0.5
HX10 56-57	56.5	11.6	0.5

La distinción entre material marino y terrestre se origina de la ausencia de celulosa en las algas y su abundancia en las plantas vasculares, y de la riqueza en proteínas de la materia orgánica de origen algal (Igarza-Tagle, 2012). Las algas tienen típicamente proporciones atómicas de C/N que van de 5 a 10, mientras que las plantas vasculares tienen ratios C/N mayores a 20 (Meyers, 1997).

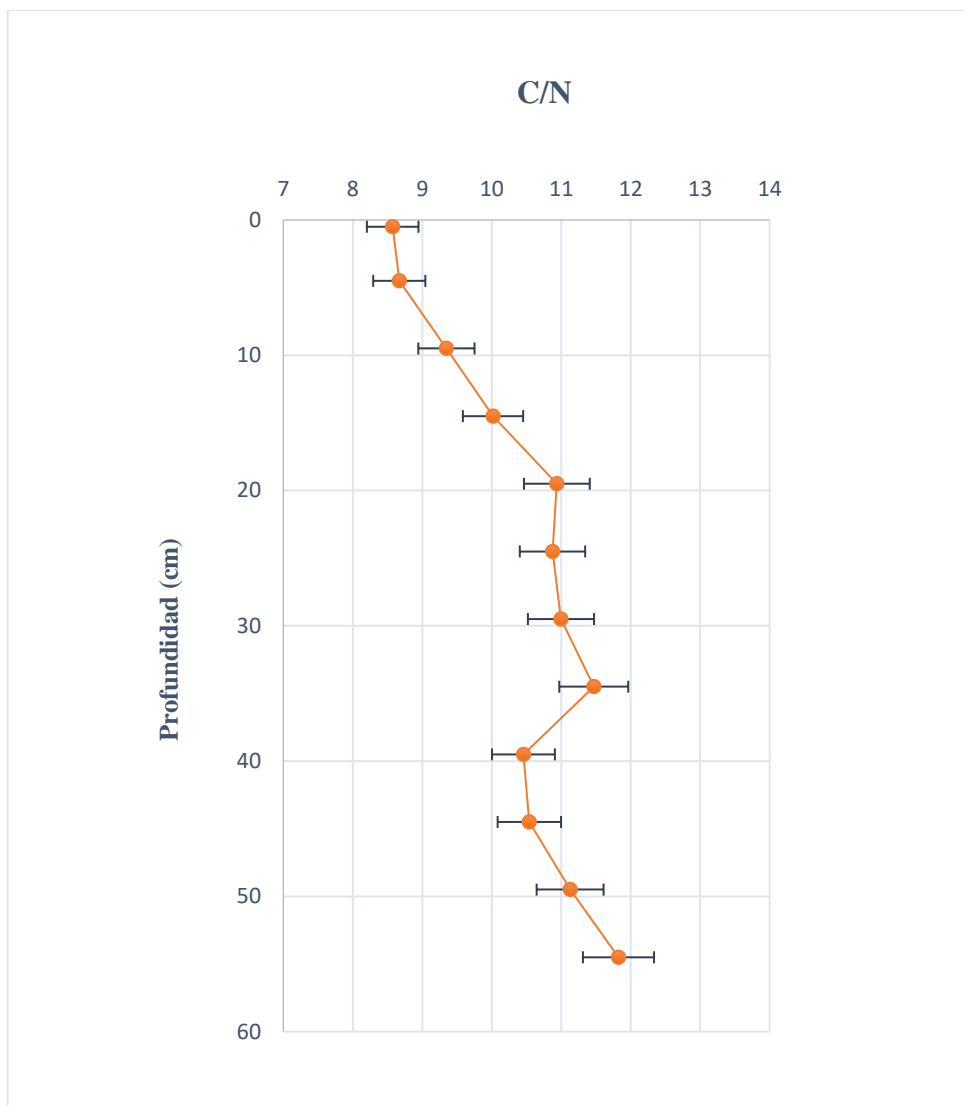


Figura 17. Distribución de las proporciones molares de C/N con respecto a la profundidad de núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

En el caso de los sedimentos del núcleo HX10, de acuerdo con los valores individuales según la profundidad, estos corresponden a sedimentos marinos frescos, ya que los valores C/N, en general, fluctuaron entre 8.6 ± 0.4 y 11.8 ± 0.5 . Los valores mayores a 10 pueden ser tomados, como una primera aproximación, como evidencia de que es posible tener además del aporte autóctono marino local, un componente terrígeno; sin embargo, al revisar los valores de Al y Fe (principales indicadores de los aportes terrígenos), se observó que Al tuvo una variación de 0.12% a 0.30% con un valor promedio de 0.22% muy lejano al valor en la corteza terrestre

de 8.23% (Taylor, 1964), de igual forma los valores de Fe variaron de 0.04% a 0.07% con un promedio de 0.06% igualmente al valor de la corteza de 5.63% (Taylor, 1964). Por lo que una primera explicación sobre el comportamiento de estos elementos es que el aporte normalmente terrígeno de ambos elementos es mínimo.

La utilización de la relación C/N para estimar la procedencia del sedimento debe ser considerada con cautela, ya que en la medida que el MO decanta hacia el fondo o se entierra, puede sufrir degradación preferencial de nitrógeno (Burdige y Martens, 1988; Jorgensen, 1996). Esta degradación aumenta parcialmente el valor C/N, alterando parcialmente la señal que esta relación muestra con respecto al origen de la MO. Con respecto a la distribución vertical general de C/N en el núcleo, se observa un aumento paulatino con la profundidad, su relación de C y N fue relativamente homogénea en él, si la estación presentó baja o alta concentración en superficie, también lo hizo en el resto del núcleo, por otra parte, el CO presentó un decaimiento exponencial. La degradación preferencial de compuestos nitrogenados provoca el aumento de la relación C/N en profundidad lo cual está relacionado con las características Redox del sedimento (Price, 1976; Jorgensen, 1996). Este aumento de C/N se debería a que la mineralización de la MO se produjo a través de un proceso diagenético secuencial de primer orden de acuerdo a lo propuesto por Berner (1980) y de acuerdo con lo propuesto por Rullkötter (2000), los valores C/N superficiales de las muestras marinas estarían dentro del intervalo considerado como sedimentos con material orgánico de origen marino fresco ($C/N = 8-10$), esto puede estar relacionado con el hecho de que la zona norte de la laguna tiene una proporción más alta de MO marina autóctona, recibiendo una menor fracción de la MO terrígena, es decir es preferentemente autóctono o de origen marino, con algún grado de degradación.

En términos generales, se determinó que el MO del núcleo HX10 es autóctono (producido en la misma zona de estudio). Los valores de CO en la laguna Yalahau se asocian con el aporte de MO derivada de la presencia de la VAS (Gutiérrez *et al.*, 2000) que se encuentra en la laguna Yalahau.

5.9. Almacenamiento de Carbono

La Tabla 9 muestra los almacenamientos de CO calculado en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau (México) comparado con otros inventarios de CO en zonas de pastos marinos de Indonesia, Australia y el inventario de CO global (IPCC, 2013).

Tabla 9. Comparación de inventarios de CO en sedimentos de praderas de pastos marinos de la laguna Yalahau, Q. Roo (México) y otros sitios en el mundo.

ÁREA DE ESTUDIO	PAÍS	PRADERAS DE PASTOS MARINOS	Almacenamiento (Mg/ha)	REFERENCIA
Mar de Banda Mar Java Mar de Célebes	Indonesia	10	31.3 - 293.3	Alongi <i>et al.</i> (2016)
Bahía Shark Bahía Geagraphe Trinity Inlet Waychinicup Inlet Green Island	Australia	17	2.62 - 48.37	Lavery <i>et al.</i> (2013)
Laguna Yalahau	México	1	179 ± 99	Herver- Hernández <i>et al.</i> (2017)
Inventario global			16 – 623 (promedio = 255)	IPCC (2013)

El inventario de CO estimado para la laguna Yalahau es de $179 \pm 99 \text{ Mg ha}^{-1}$, tuvo un valor comparable al reportado por Alongi *et al.* (2016) para zona de pastos marinos en Indonesia y el valor global IPCC (2013), pero es superior al valor reportado para praderas de pastos marinos en Australia (Lavery *et al.*, 2013). En México se han realizado estimaciones de carbono azul en sedimentos superficiales como el estudio realizado por Arellano-Mendez *et al.* (2015) en praderas de pastos marinos específicamente para la especie de *T. testudinum* en la Bahía de la Ascensión (Quintana Roo) obtuvieron un almacenamiento de 22.27 Mg ha^{-1} siendo menor al determinado en la laguna Yalahau con la misma especie de pasto; sin

embargo, la metodología utilizada para este estudio fue diferente ya que se realizó a partir del mapa de clases de coberturas geográfica y densidad de muestra de pastos, con esto se determinaron métricas del paisaje (área, densidad de fragmentos, forma y continuidad) y se calculó el contenido de CO, en toneladas por hectárea para cada clase y total. Estudios recientes en México sobre almacenes de carbono están enfocados a los sedimentos de los manglares.

Con la cobertura vegetal determinada mediante la ecosonda BioSonics EcoSAV se estimó un total del $279,9081 \pm 154,4862$ Mg C equivalente a 2.8 ± 1.5 Tg C en toda la laguna Yalahau.

Pendleton *et al.* (2012) estimaron que la conversión y degradación global de los EMC por año puede liberar 1.02 Pg de CO₂ a la atmosfera con una estimación central de 0.45 Pg CO₂. A pesar de que los pastos marinos contienen un menor inventario de carbono en comparación con los manglares, contribuyen en segundo lugar a las preservaciones globales de carbono azul, debido a su área global más grande (Pendleton *et al.*, 2012). Comparado con otros ecosistemas de carbono, la pérdida de los EMC puede contribuir a un adicional 3 - 19% sobre la estimación de emisiones global por deforestación (5.5 Pg CO₂ por año) o contrarrestar 12 - 18% del sumidero de carbono en las plataformas continentales oceánicas a nivel mundial (1.26 Pg CO₂) (Chen y Borges, 2009). La pérdida anual del potencial de secuestro de carbono en los ecosistemas aumentaría estas estimaciones (Irving *et al.*, 2012). La perturbación del carbono almacenado en la biomasa y en el metro superior de sedimentos en una hectárea típica de pastos marinos, puede contener tanto carbono cercano a la superficie como una hectárea de bosque tropical (Fourqurean *et al.*, 2012; IPCC, 2003; Pan *et al.*, 2011) acelerando el cambio climático.

Es importante seguir con los estudios sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de los pastos marinos a nivel nacional. México es un país en desarrollo que busca transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono, por lo cual este estudio es muy importante, ya que se ha incluido recientemente como una de las prioridades científicas de diversos grupos internacionales dedicados al tema del ciclo del carbono y el cambio climático en el mundo.

CAPÍTULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los objetivos planteados y preguntas de investigación para este trabajo, se mencionan las principales conclusiones que se obtuvieron junto con algunas recomendaciones que pudieran facilitar la realización de trabajos futuros inmersos en el mismo contexto.

6.1. Conclusiones

En la laguna Yalahau se presenta una homogeneidad en cuanto a la granulometría, con un sedimento en su totalidad de arenas, dominada principalmente por arenas finas y medias, este tipo de sedimento y la presencia de los pastos marinos favorecieron el porcentaje medio de CO y MO en comparación con otros ecosistemas de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

La especie dominante *T. Testudinum* tiene una gran capacidad de resistencia fisiológica, por lo que podemos considerar que en la laguna las praderas son duraderas o resilientes.

Los procesos diagenéticos controlan el comportamiento del decaimiento exponencial del CO en el núcleo; y la presencia de material calcáreo característico de la península de Yucatán dan como resultado los altos porcentajes de CaCO₃.

La cronología con ²¹⁰Pb demostró que el sedimento contenido en el núcleo HX10 hasta la sección más profunda determinada (17.5 cm de profundidad) está desde el año 1827.02 ± 191.75. En el segmento más reciente del núcleo (0.5 cm de profundidad) se determinó una tasa de acumulación másica promedio de 0.14 ± 0.02 g cm⁻² año⁻¹ y una tasa de acumulación sedimentaria de 0.41 ± 0.06 cm año⁻¹, mientras que en la sección más profunda la tasa de acumulación másica fue de 0.03 ± 0.11 g cm⁻² año⁻¹ y una tasa de acumulación sedimentaria de 0.03 ± 0.10 cm año⁻¹. El incremento de las tasas de acumulación másica y sedimentaria es compatible con la situación actual causada por el aumento en la actividad antropogénica a nivel mundial.

A través de los resultados obtenidos en el núcleo HX10 en cuestión de contaminantes se percibe que la zona aún no ha sufrido alteraciones importantes a consecuencia de las actividades antropogénicas, ya que se ve reflejado en la distribución de los metales a lo largo del núcleo; sin embargo, la posición de Cd, Cu y Ni están por encima del TEL y podrían ser la pauta para definir políticas o acciones ambientales puntuales a nivel regional y local y así prevenir y evitar efectos biológicos adversos. Hay que considerar que los parámetros geoquímicos (MO y CaCO_3) de la laguna tienen características que podrían aumentar estas concentraciones.

La relación de C/N del sedimento fluctuaron entre 8.6 ± 0.4 y 11.8 ± 0.5 , evidenciando una procedencia autóctona de MO, con algún grado de degradación proveniente de la VAS, recibiendo una fracción de MO terrígena mínima.

Mediante la estimación de un total del 2.8 ± 1.5 Tg C en toda la laguna Yalahau en las 15,641 ha, se estimó un total de 179 ± 99 MgC ha^{-1} , valor que oscila entre los valores determinados por la IPCC en pastos marinos, por lo que la laguna Yalahau puede considerarse como un sumidero de carbono de la Península de Yucatán.

El estudio efectuado en la laguna Yalahau permitió realizar una descripción de la zona, así como estimar los posibles impactos ambientales, principalmente si la pradera de pastos marinos se pierde ya que este sumidero de carbono se convertiría en una fuente de CO_2 . Con base en esta información es necesario resaltar la importancia de la implementación de medidas de prevención para un manejo adecuado y cuidado de la laguna por lo cual, es importante realizar más estudios en la zona.

6.2. Recomendaciones

La determinación de CO y MO con el método propuesto por Walkley y Black (1934) tiene como desventajas: (i) el uso de grandes cantidades de ácido sulfúrico y presenta como producto de desecho tóxico al ion cromo, el cual es altamente cancerígeno, sin embargo, si la titulación del dicromato de potasio es completa, el residuo contiene sólo cromo trivalente, no cancerígeno y de muy baja toxicidad (Eyherabide *et al.*, 2014); (ii) el gasto económico constante en la compra de reactivos. Al consultar con literatura se encontró otra técnica

conocida para la determinación de CO y MO en sedimentos mediante pérdida de peso por ignición (Loss on ignition, LOI) (Dean, 1974), realizada mediante calcinación a diferentes temperaturas (100°C, 550°C y 950°C). La pérdida de peso experimentada por la muestra durante estas reacciones es determinada pesando el sedimento antes y después de ser quemado. En el estudio de Dean (1974), se realizó una evaluación del método y se llegó a la conclusión que el LOI aporta una información rápida y barata en la determinación de los contenidos de CO y MO. Numerosos autores de Dean (1974) en adelante han notado que este método (LOI) puede considerarse una buena herramienta para determinar la MO y CO de los sedimentos, incluso si varias incertidumbres limitan la precisión absoluta del método (Dean, 1974; Bengtsson y Enell, 1986; Heiri *et al.*, 2001). Bengtsson y Enell (1986) señalaron que el método al ser rápido y económico es útil para el análisis de un gran número de muestras. Mediante estas consideraciones, la actualización de la metodología utilizada en el laboratorio podría mejorar trabajos futuros al cambiar a LOI.

Es recomendable el análisis de más núcleos para poder realizar una mejor estimación de carbono azul de la laguna, así como realizar la extracción de núcleos en zonas con diferentes especies de pastos marinos y comparar el secuestro por especie o por asociaciones vegetales.

Los factores fisicoquímicos como la salinidad, pH, temperatura, oxígeno disuelto, etc., son los que controlan los factores de distribución de los pastos marinos, por lo cual es recomendable incluir estos parámetros en futuros estudios.

La gran parte de estudios realizados sobre almacenamiento de carbono está enfocada en manglares (e.g. Gutiérrez-Mendoza y Herrera-Silveira, 2015; Adame et al., 2013; Herrera-Silveira y Teutli-Hernández, 2017; Herrera-Silveira, 2016), por lo que incluir estudios sobre pastos marinos sería un gran aporte debido a que estos ecosistemas son capaces de almacenar grandes cantidades de carbono orgánico y son considerados como un importante sistema para la mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Adame M.F., Kauffman J.B., Medina I., Gamboa J.N., Torres O., Caamal J.P., Reza M., Herrera-Silveira J.A., (2013). Carbon Stocks of Tropical Coastal Wetlands within the Karstic Landscape of the Mexican Caribbean. PLoS ONE 8(2): e56569. doi:10.1371/journal.pone.0056569.
- Aguilar-Salazar F., González-Iturbe J. A., Senties-Granados A., Rueda M., Herrera-Silveira J., Olmsted I., Remolina-Suárez F., Martínez-Aguilar J., Figueroa-Paz F. (2003). Batimetría, variables hidrológicas, vegetación acuática sumergida y peces de la laguna Yalahau, Quintana Roo, México. Instituto Nacional de la Pesca, México. CRIP-Puerto Morelos, Quintana Roo, México. 22 pp
- Alongi D.M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. Carbon Management, 3, 313-322.
- Alongi D.M., Murdiyarso D., Fourqurean J.W., Kauffman J.B., Huatahaean A., Crooks S., Lovelock C.E., Howard J., Herr D., Fortes M., Pidgeon E., Wagey T. (2016). Indonesia's blue carbón: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbón. WetlandsEcol. Manage, 24, 3-13.
- Alongi DM (1998) Coastal Ecosystem Processes. CRC Press 419 p.
- Archer, D., (1996), An atlas of the distribution of calcium carbonate in sediments of the deep sea: Global Biogeochemical Cycles, 10, 159-174.
- Arellano-Méndez L., Morales-Ojeda S., Herrera-Silvera J. (2015) Carbono orgánico de las praderas de *Thalassia testudinum* en Bahía de la Ascensión (Quintana Roo, México). Una primera estimación del contenido de carbono azul en una laguna costera del Caribe Mexicano. México.
- Avelar M., Bonilla-Heredia B., Merino-Ibarra M., Herrera-Silveira J. A., Ramírez J., Rosas H., Valdespino J., Carricart-Ganivet J. P. y Martínez A. (2013). Iron, cadmium, and chromium in seagrass (*Thalassia testudinum*) from a coastal nature reserve in karstic Yucatán. Environmental Monitoring and Assessment 185: 7591-7603.
- Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C.J., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecological Monographs, 81, 169-193.

- Bengtsson, L. y Enell M. (1986): Chemical analysis. In B.E. Berglund (Ed): Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology, Wiley, Chichester, 423-445 p.
- Berner, R. (1980). Early diagenesis: A theoretical approach. Princeton University Press, New York, 421 pp
- Biosonics, Inc. (2008). User guide EcoSAV 1 Biosonics, Inc. Seattle WA 98107 USA. www.biosonicsinc.com BS&E-2000-09-000-1.6.2.
- Bojorquez-Sánchez S. (2017). Evaluación de tasas de cambio en el nivel del mar y tendencias en flujos de elementos traza en Veracruz. Tesis para obtener el grado de Doctorado en Ciencias Marinas. Instituto Politecnico Nacional. La Paz, Baja California Sur. Disponible en: <http://www.biblioteca.cicimar.ipn.mx/oasis/Medios/tesis/bojorquezsa2.pdf>
- Bouillon S., Moens T., Koedam N., Dahdouh-Guebas F., Bayens W., Dehairs F. (2004). Variability in the origin of carbon substrates for bacterial communities in mangrove sediments. *FEMS Microbiology Ecology* 49:171–179.
- Boyle E. (1994). Isotopic and elemental tracers in calcium carbonate fossils: *Mineralogical Magazine*, 58A, 111–112.
- Buchman M. F. (2008). NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 34 p.
- Buffle, J. (1984). Natural organic matter and metal-organic interactions in aquatic system. En: Sigel, H. (Eds.) “Metal ions in biological systems”. New York: CRC Press.
- Burdige, D. y Martens C. (1988). Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin: 10. The role of amino acids in sedimentary carbon and nitrogen cycling. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 1571-1584.
- Calva-Benítez L. G., Pérez-Rojas A., Márquez A. Z. (2006) Contenido de carbono orgánico y textura de sedimentos del sistema lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiológica* 16(2): 127-136
- Calva-Benítez L.G. y Torres-Alvarado R. (2011) carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México.) Laboratorio de Ecosistemas

- Costeros. Depto. Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México D.F. c.p.09340.. www.ujat.mx/publicaciones/uciencia 27(2):133-144,2011
- Capurro, L. (2002). A large coastal ecosystem: the Yucatan Peninsula. *Advances and Perspectives (Spanish)* 22, 69–75.
- Castillo-Geniz J. L. (2007). The Use of Laguna Yalahau, Quintana Roo, Mexico as a Primary Nursery for the Blacktip Shark. *American Fisheries Society Symposium*. 50. 345-364.
- CCA (2016). *Carbono azul en América del Norte: evaluación de la distribución de los lechos de pasto marino, marismas y manglares, y su papel como sumideros de carbono*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 58 pp.
- Colmenero L. C., Palma J. J. A. y Ferreira A. (1990). *Medio Ambiente y Desarrollo en Quintana Roo*. Grupo Ecologista del Mayab A.C. (GEMA), CANTE A.C., Cancún. 75 p.
- CONANP (2016a). México valorará beneficios de pastos marinos de la Península de Yucatán. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Comunicado de prensa CONANP/SEMARNAT-Núm 16/040. Disponible en : <https://www.gob.mx/conanp/prensa/mexico-valorara-beneficios-de-pastos-marinos-de-la-peninsula-de-yucatan-54150>
- CONANP (2016b). Estudio Previo Justificativo para la declaratoria de la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano, Quintana Roo. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 305 páginas. www.conanp.gob.mx/acciones/pdf/EPJ_RB_CM_12abril2016_scc.pdf
- Contreras-Espinosa F. (1985). *Las Lagunas costeras mexicanas*. Centro de Ecodesarrollo. SEPESCA. México. 253 p.
- Contreras-Espinosa F. (2010). *Ecosistemas costeros mexicanos una actualización*. Universidad Autónoma Metropolitana. Departamento de Hidrobiología. Division de Ciencias Biológicas y de la Salud. México DF.
- Corrales I., Rosell J., Sánchez L., Vera J. A., Vilas L. (1977). *Estadigráfica*. Rueda, Madrid, 718p.

- Correa-Sandoval J. (1993). Status of Aquatic Birds in the Coastal Wetlands of the Yucatan Peninsula. *Sian KaÇan Serie Documentos (Sian KaÇan Journal)* 1: 66.
- Cunha, A. H., Santos, R. P., Gaspar y Bairros, M. F. (2005). Seagrass landscape-scale changes in response to disturbance created by the dynamics of barrier-islands: a case study from Ria Formosa (Southern Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 636-644.
- Chen C. T. A. y Borges A. V. (2009). Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: continental shelves as sink and nearshore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-Sea Research II* 56: 578-590.
- Chester R. (2000) Sediment interstitial waters and diagenesis. *Marine geochemistry*. Unwin Hyman, London (1990): 468-528.
- Chmura G.L., Anisfeld S.C., Cahoon D.R. y Lynch J.C. (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1-12. doi:10.1029/2002GB001917.
- Davis J. C. (2002) *Statistics and Data Analysis in Geology*: John Wiley y Sons.
- De Villiers, S. (2005). Foraminiferal shell-weight evidence for sedimentary calcite dissolution above the lysocline: *Deep-Sea Research I*, 52, 671-680
- De Witt, R. (2011). Biodiversity of Coastal Lagoon Ecosystems and Their Vulnerability to Global Change. In: Grillo, O. & G. Venora, (Eds.). *Ecosystems Biodiversity*. InTech. pp. 29-40.
- Dean W. E. Jr., (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *J. Sed. Petrol.* 44: 242-248.
- Duarte C. M. y Cebrián J. (1996). The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography* 37:882-889.
- Duarte C. M., Borum J., Short F. T. y Walker D. I. (2005). Seagrass Ecosystems: Their Global Status and Prospects, *In: Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects*, edited by: Polunin, N. V. C., Cambridge Univ. Press.

- Duarte C. M., Prairie Y. T., Montes C., Cole J. J., Striegl R., Melack J. y Downing J. A. (2008). CO₂ emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. *Journal of Geophysical Research* 113:G04041.
- Duarte C.M., Kennedy H., Marbe N. y Hendricks I. (2011) Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: current limitations and future strategies. *Ocean Coast Manag* 51: 671–688.
- Duarte C.M., Marba N., Gacia E., Fourqurean J.W., Beggins J. *et al.*, (2010) Seagrass community metabolism: assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows. *Glob Biogeochem Cycles* 42: GB4032. doi:10.1029/2010GB003793.
- Duarte C.M., Dennison W.C., Orth R.J.W. y Carruthers T.J.B. (2008). The charisma of coastal ecosystems: addressing the imbalance. *Estuar Coast* **31**: 233–38.
- Duarte, C.M., Middelburg, J.J. y Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2, 1–8.
- Emeka N. C., Antia V., Ukpong A., Amah E. y Ntekim E. (2010). A Study on the Sedimentology of Tidal Rivers: Calabar and Great Kwa, S. E. Nigeria. *Eur. J. Sci. Res. (Seychelles)*. 47(3):370-386.
- Eyherabide M., Saínz-Rozas H., Barbieri P., Echeverría H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Cienc. suelo* vol.32 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires. “Ciencia del suelo” versión On-line ISSN 1850-2067
- Flynn W.W. (1968). Determination of low levels of ²¹⁰Po in environmental material. *Analytica Chimica Acta* 4. 221.
- Folk, R. L. y Ward W. C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-26
- Fourqurean J. W., Duarte C. M., Kennedy H., Marba N. y Holmer M. (2012). Seagrasses ecosystems as a global significant carbon stock. *Nature Geoscience* 5: 505-509.
- Friedman G. M. (1962). On sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones: *Journal of Geology*, 70, 737-756.
- Gao S., Collins M., Lanckneus J., De Moor G. y Van Lancker V. (1994) Grain size trends associated with transport patterns an example from the Belgican continental shelf. *Mar. Geolo. (Paises Bajos)* 121:171-185.

- García-Beltrán G. (2006). Estrategia de conservación de tierras del Norte del estado de Quintana Roo. Amigos de Sian Ka'an - North American Wetlands Conservation Council. 95 p.
- García-Hernández D. (2004). Influencia de la complejidad estructural de *Thalassia testudinum* sobre la comunidad íctica juvenil en Laguna Yalahau, Quintana Roo. Tesis de maestría, CINVESTAV, 1 44p.
- García-Hernández V. D. y Ordóñez-López U. (2007). ¿Son las Praderas de *Thalassia testudinum* un Hábitat Esencial para Peces Juveniles de Importancia Comercial? Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Mérida Yucatán, México. 38p.
- García-Hernández, V. D. y Ordóñez-López U. (2006). Los peces juveniles de la laguna Yalahau, Quintana Roo. Memorias del XIV Congreso Nacional de Oceanografía. Manzanillo, Col.
- Gattuso J. P., Frankignoulle M. F., Ollast R. W. (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 29:405–434.
- Goldberg E. D. (1963). Geochronology with ^{210}Pb , In: *Radioactive Dating. Proceedings of a Symposium*, International Atomic Energy Agency, Vienna., 121-131
- Grenz C, Alvarez CS, Calva-Benítez LG, Chifflet S, Conan P, Denis L, Douillet P, Renaud Fichez, Gutierrez F, Origel M & Pinazo C, Solis V y Torres Alvarado R. (2010) JEST. Joint Environmental Study of Terminos Lagoon. Informe Final. IRD (Institut de Recherche Pour le Developement), Francia-Universidad Autonoma Metropolitana. 68 p.
- Gutiérrez A. M. A., Fuente M.G.B., Cervantes A.M. (2000). Biomasa y densidad de dos especies de pastos marinos en el sur de Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical* 48(2-3): 313-316.
- Gutiérrez-Mendoza J. y Herrera-Silveira J.A. (2015). Almacenes de carbono en manglares de tipo chaparro en un escenario cárstico. En: Paz, F., J. Wong(eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*, p. 405-414. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en

- colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México, México.
- Hartog, C. D. y Kuo J. (2006). Taxonomy and biogeography of seagrasses. 1–23. In *Seagrasses*. Springer, Dordrecht.
- Heiri, O., Lotter A. F. y Lemcke, G. (2001): Loss-on-ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110 p.
- Hemminga, M. A. y Duarte C. M. (2000), *Seagrass ecology* [Ecología de los pastos marinos], Cambridge University Press, Cambridge.
- Héquette A., Hemdane Y., Anthony J. (2008). Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, Northern coast of France. *Marine Geology*. (Países Bajos). 249: 226- 242.
- Herrera, J. A. y Teutli-Hernández C. (2017). Carbono azul, manglares y política pública. *Elementos para Políticas Públicas* 1:43-52
- Herrera-Silveira, J., Ramírez-Ramírez J., y Saldivar A. (1998). Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected costal lagoons of Yucatan, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1:353-372.
- Howard J., Hoyt S., Isensee K., Telszewski M., Pidgeon, E. (eds.) (2014). *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.
- Igarza-Tagle M. C. (2012). *Materia Orgánica sedimentaria reciente del Margen Continental Peruano (Tumbes 03°45.01'S -81°07.29'W – San Juan 15°04.75'S - 75°44.00'W): su origen y su preservación*. Tesis Para optar el Título Profesional de Biólogo con mención en Hidrobiología y Pesquería. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Biológicas. Lima, Peru.

- Inman D. L. (1952) Measures for describing the size distribution of sediments: *Journal of Sedimentary Petrology*, 22(3), 125-145.
- IPCC (2013). Coastal Wetlands. In: 2013 Supplement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (eds. Alongi, D, Karim, A, Kennedy, H, Chen, G, Chmura, G, Crooks, S et al.)
- IPCC (2014). 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland
- Kristensen E., Bouillon S., Dittmar T., Marchand C., 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems. *Aquatic Botany*.
- IPCC. (2003). Good practice guidance for Land use, Land-use change, and Forestry (Eds Penman J. *et al.*). Institute for global environmental strategies.
- Irving A. D., Connell S. D. y Russell B. D. (2011). Restoring coastal plants to improve global carbon storage: Reaping what we sow. *PLoS ONE* 6: e18311.
- Jahnke, R. A. y Jahnke, D. B (2004), Calcium carbonate dissolution in deepsea sediments: Implications of bottom water saturation state and sediment composition: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 47-59.
- Jiménez-Sabatini, T., Aguilar-Salazar E., Martínez-Aguilar J., Figueroa-Paz R, y Aguilar-Cardozo C. (1998). Una visión pesquera sobre la laguna de Yalahau en el área de Holbox, Quintana Roo, México. Federación Regional de sociedades Cooperativas de la industria pesquera del estado de Quintana Roo. Inst. Nac. de la pesca. 33 p.
- Jorgensen, B. (1996). Material flux in the sediment. In: B. Jorgensen & K. Richardson (eds.). *Coastal and Estuarine Studies*. American Geophysical Union, pp. 115-135.
- Kennedy H, Beggins J, Duarte CM, *et al.*, (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: isotopic constraints. *Global Biogeochem Cy* 24; doi:10.1029/2010GB003848.
- Kilmister K. L., McMahon K., Waycott M., Kendrick G. A., Scanes P., McKenzie L., Brien K. O., Lyons M., Ferguson A., Maxwell P., Glasby T., Udy J. (2015) Unravelling complexity in seagrass system for management: Australia as a microcosm. *Sci Total Environ*, 534. pp 97-109.

- Kirchner G. (2011). ^{210}Pb as a tool for establishing sediment chronologies: examples of potentials and limitations of conventional dating models. *J. Environ. Radioact.*, 102 (2011), pp. 490-494
- Koide M., Soutar A., Goldberg E.D. Marine Geochronology with Pb-210. (1972) *Earth Planetary Science Letters* 14. 442.
- Koopman, C. y Orange A. (1991). Multielement determination in sediments from German Wadden Sea, investigations on sample preparation techniques. *Spectrochimica Acta*. 46B: 1395-1402.
- Krishnaswamy S., Lal D., Martin J. M., Meybeck M. (1971) Geocronología de sedimentos lacustres. *Planeta Tierra. Sci. Letón.* , 11 (1971) , pp. 407 – 414
- Lau W.W.Y. (2013). Beyond carbon: Conceptualizing payments for ecosystem services in blue forests on carbón and other marine and coastal ecosystem services. *Ocean& Management*, 83, 5-14.
- Lavery P. S., Mateo M. A., Serrano O., Razaimi M. (2013). Variability in the Carbon Storage of Seagrass Habitats and Its Implications for Global Estimates of Blue Carbon Ecosystem Service. *PLoS ONE* 8(9): e73748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073748>.
- Lazcano-Barrero M. A., I. J. March, H. Núñez, E. Ruelas, A. Muñoz-Alonso, y R. Martínez. (1992). Inventario faunístico de la Reserva El Edén, Quintana Roo: Una prospección. *ECOSFERA A. C. Reporte Técnico.*, San Cristóbal de Las Casas. 54 Págs.
- Lazcano-Barrero, M., M. Vázquez-Sánchez, I. March, H. Núñez, y M. Fuller (1995), La región de Yalahau: propuesta para el establecimiento de una zona de conservación y desarrollo sostenible en el norte de Quintana Roo, CECRN, Colegio de la Frontera Sur, México.
- Lens P., Grotenhuis T., Malina G., Tabak H. (2005). *Soil and sediment remediation*. IWA, Publish. 523 pp.
- LNHB, 2016. Laboratorio Nacional Henri Becquerel http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm. Accedido el 20/04/2016
- Loring D.H., Rantala R.T.T. (1992). Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *EarthScienceReviews*. 32, 235-283.

- Luoma, S.N., 1990. Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments. En: Furness, R.W., P.S. Rainbow (Eds.), Heavy metals in the marine environment. CRS Press Inc. Florida, 51-66
- Macreadi P.I., Trevathan-Tackett S.M., Skilbeck C.G., Sanderman J., Curlevski N., Jobsen G., Seymour J.R. (2015). Losses and recovery of organic carbon from a seagrass ecosystem following disturbance. Proc. R. Soc. B 282:20151537. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1537>.
- Martin, W. y Sayles, F. (1999) Benthic cycling of biogenic components of the particulate flux to the seafloor in the Southern Ocean in March and April, 1998: EOS Transactions, 80, 241
- Mateo M. A., Cebrain J., Dunton K., Mutchler T. (2006) Carbon flux in seagrass ecosystems. In: AW LarkumRJ OrthCM Duarte. Seagrasses: biology, ecology and conservation. Netherlands: Springer Verlag. pp. 159–192.
- Mateo M. A., Romero J., Pérez M., Littler M. M. y Littler D. S. (1997) Dinámica de depósitos orgánicos milenarios resultantes del crecimiento de la alga marina mediterránea *Posidonia oceánica*. Estuar Coast Shelf Sci 44: 103-110. doi: 10.1006 / ecss.1996.0116
- May-Kú M. A., Ardisson P. L. y Ordóñez-López U. (2010). Morphological variation of *Thalassia testudinum* in two shallow coastal environments from the southeastern Gulf of Mexico. Botanica Marina 53: 449-455.
- May-Kú, M. A.; Valdés-Lozano, D. y Ardisson P. L. (2016). Variación espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y sedimento en la laguna costera Yalahau, Quintana Roo. Departamento de Recursos del Mar, Cinvestav, Yucatán. México. Hidrobiológica vol.26 no.1 México ene./abr. 2016
- McKee LK, Cahoon DR, Feller IC (2007) Los manglares del Caribe se ajustan al aumento del nivel del mar a través de controles bióticos sobre el cambio en la elevación del suelo. Glob Ecol Biogeogr 16: 545-556. doi: 10.1111 / j.1466-8238.2007.00317.x
- McKinnon, B. (1993). Important Breeding Colonies of Aquatic Birds on Islands within Laguna Yalahau, Quintana Roo, México. Sian Ka'an Serie Documentos (Sian Ka'an Journal) 1: 57-58.

- McLeod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 552–560.
- Meléndez-Pizarro, C.O. y Camacho-Dávila A.A. (2009). Espectrometría de fluorescencia de rayos X. Universidad de Ciencias Químicas/ Universidad Autónoma de Chihuahua. Aventuras del Pensamiento. Synthesis No. 18. Chihuahua, México.
- Meyers, Ph. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Org. Geochem* Vol. 27, n° 5/6, p. 213 - 250.
- Middelburg JJ, Nieuwenhuize J, Lubberts RK, and van de Plassche O. (1997). Organic carbon isotope systematics of coastal marshes. *Estuar Coast Shelf S* 45: 681–87.
- Morse, J.W. (2005) Formation and diagenesis of carbonate sediments, en Mackenzie, F.T. (ed), *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks: Elsevier, Treatise on Geochemistry, Volume 7, 67-85.*
- Mottl M. J., Wheat C. G., Baker E., Becker N., Davis E., Feely R., Grehan A., Kadko D., Lilley M., Massoth G., Moyer C. y Sansone F. (1998) Warm springs discovered on 3.5 Ma oceanic crust, eastern flank of the Juan de Fuca Ridge: *Geology*, 26, 51–54
- Murdiyarso D., Purbopuspito J., Kauffman J. B., Warren M. W. Sasmito S. D., Donato D., Manuri S., Krisnawati H., Taberima S. y Kurnianto S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forest for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*. 5, 1089-1092.
- Naik, S. S. y Naidu, P. D. (2008) Possible factors that control calcite dissolution in the western tropical Indian Ocean: *Current Science*, 95, 22-23
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Ordóñez- López U. y García-Hernández V. D. (2005), Ictiofauna juvenil asociada a *Thalassia testudinum*. en Laguna Yalahau, Quintana Roo. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Yucatán.

Hidrobiológica vol. 15 no. 2 México 2005. Hidrobiología versión impresa ISSN 0188-8897.

- Palafox-Muñoz A., Segrado R., Anaya-Ortiz J. S., González-Herrera M., Ken-Sánchez H. A., Pineda-Sánchez V. y Godínez-Arellano J. (2007). Desarrollo local y turismo en comunidades rurales de Quintana Roo. Universidad de Quintana Roo. Division de desarrollo sustentable. CATurismo.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., *et al.* (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forestd. *Science* 333: 988-993.
- Parrado J. M., y Achab M. (1999). Grain-size trends associated with sediment transport patterns in Cadiz Bay (southwest Iberian Peninsula). *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* (España). 15(1-4):269-282.
- Passow, H., Rothstein A., y Clarkson T. W. (1961). The general pharmacology of heavy metals. *Pharmacol. Rev.* 13:185-224
- Pazmiño, N., Michaud, F. (2009). Descripción de los Sedimentos Marinos en la Cordillera Submarina de Carnegie, Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador. Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador: desde la costa continental hasta las islas Galápagos. 239p.
- Pendleton L, Donato DC, Murray BC, Crooks S, Jenkins WA, Sifleet S, *et al.*, (2012) Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*7(9): e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Peterson, C. H., Luettich R. A. Jr., Micheli F. y Skilleter G. A. (2004). Attenuation of water flow inside seagrass canopies of differing structure. *Marine Ecology Progress Series* 268: 81-92.
- Poppe J. L., Knebel H. J., Mlodzinska Z. J., Hastings M. E. Y Seekins B. A. (2000) Distribution of surficial sediment in Long Island Sound and adjacent waters: texture and total organic carbon. *Journal of Coastal Research* 16(3): 567-574.
- Price, B. (1976) Chemical diagenesis in sediment. En: J. Riley and R. Chester (eds.). *Chemical Oceanography Volume 6*. Academic Press, London, pp. 01-58.

- Raygoza-Viera J. R. (2015). Flujo atmosférico, distribución en el agua y depósito sedimentario de Hg y 210 Pb en el Estero de Urías. Tesis para obtener el grado de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Unidad Académica Mazatlan. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Raygoza2/publication/308881217_Atmospheric_flux_distribution_in_water_and_sediment_deposition_of_Hg_and_210Pb_in_the_Estero_de_Urias_Lagoon/links/58b7454745851591c5d566db/Atmospheric-flux-distribution-in-water-and-sediment-deposition-of-Hg-and-210Pb-in-the-Estero-de-Urias-Lagoon.pdf
- Robbins J. A. (1978) Geochemical and geophysical applications of radioactive lead isotopes. In: Biochemistry of Lead, Ed. J.O. Nriagu, Elsevier, Amsterdam pp 285–393
- Rodríguez-Hernández C. H. (2017). Existencias de carbono azul y la dinámica histórica de la cobertura del bosque manglar en el área conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica. Tesis para obtener grado de maestría. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Costa Rica. Disponible en: <http://icc.org.gt/wp-content/uploads/2018/01/Tesis-Carlos-Rodr%C3%ADguez.pdf>
- Rojas N. (2002). Distribución de materia orgánica, carbono y nitrógeno, y diagénesis temprana en sedimentos de la zona de canales australes entre los golfos Corcovado y Elefantes, Chile. Tesis de Título de Oceanógrafo. Escuela de Ciencias del Mar. Universidad Católica de Valparaíso, 80 pp.
- Rojas N. y Silva N. (2003). Distribución espacial de textura, C y N en sedimentos recientes en canales y fiordos chilenos. Golfo Corcovado (43° 50' S) a golfo Elefantes (46° 30' S), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 26(1): 15-31
- Rullkötter, J. (2000). Organic matter: the driving force for early diagenesis. In: H.D. Schulz & M. Zabel (eds.). *Marine Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 129-172
- Salazar A., Lizano O. y Alfaro E. (2004) Composición de sedimentos en las zonas costeras de Costa Rica utilizando Fluorescencia de Rayos-X (FRX). *Revista de biología tropical* vol.52 suppl.2 San José Dec. 2004. *On-line version* ISSN 0034-7744.
- Sánchez A., González-Yajimovich O., Balart E., López-Ortiz B. E., Aguiñiga-García S., y Ortiz-Hernández Ma. C. (2013). Acumulación de carbono orgánico total y carbonato

- de calcio en la zona de oxígeno mínimo del Pacífico nororiental mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 30, núm. 1, 2013, p. 222-232.
- Sánchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernández A. C., Ontiveros-Cuadras J. F., Pérez Bernal L. H. y Olid C. (2014). Monte Carlo uncertainty calculation of ^{210}Pb chronologies and accumulation rates of sediments and peat bogs. *Quat. Geochronol.*, 23, pp. 80-93.
- Sánchez-Cabeza J.A., Díaz-Asencio M., Ruiz-Fernandez A.C. (2012). Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : modelos, validación y aplicaciones. Organismo internacional de energía atómica. Viena 2012. STI/PUB/1538 ISBN 978-92-0-325210-2
- Sarmiento C. J. y Gruber N. (2002). Sinkfor anthropogenic carbón. *Phys Today* 55: 30-36
- Schlesinger W. H. y Lichter J. (2001). Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO_2 . *Nature* **411**, 466-469 DOI:10.1038/35078060.
- Short, F. T. y Wyllie Echeverría S. (1996), "Natural and human-induced disturbance of seagrasses" [Perturbaciones naturales y antropogénicas de los lechos de pasto marino], *Environmental Conservation*, núm. 23, vol. 1, pp. 17-27.
- Stein R. (1991), Accumulation of organic carbon in marine sediments. *Lecture notes in earth sciences: Springer*, 214 pp.
- Sterritt, R.M. y Lester, J.N. (1980) The value of sewage sludge to agriculture and effects of the agricultural use of sludges contaminated with toxic elements: a review. *Science of the Total Environment*, 16, 55-90.
- Stuardo J, Villarroel M. (1976). Aspectos ecológicos y moluscos en las lagunas costeras de Guerrero, México. *An. Cent. Cienc. Mar Limnol. UNAM* 3: 1-180.
- Taylor S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 1273-1285.
- Teeter, A. M., B. H. Johnson, C. Berger, G. Stelling, N. W. Scheffner, M. H. Garcia & T. M. Parchure. (2001). Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). *Hydrobiologia* 444: 1-23

- Thomas S. (2014). Blue carbon: Knowledge gaps, critical issues, and novel approaches. *Ecological Economics*, 107, 22-38.
- Thornton S. & McManus J. (1994). Application of Organic Carbon and Nitrogen Stable Isotope and C/N Ratios as Source Indicators of Organic Matter Provenance in Estuarine Systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 38. 219–233. 10.1006/ecss.1994.1015.
- Tran K. C., Valdés-Lozano D., Herrera-Silveira J. A., Euan J., Medina-Gómez I. y Aranda-Cirerol N. (2002). Status of water quality at Holbox Island, Quintana Roo State, Mexico. In: C. A. Brebbia (Ed.). *Coastal Environment*. WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, UK, pp. 331-340
- Tran K. C., Valdez-Lozano D. S., Real E. y Zapata-Pérez O. (2008). Variaciones del índice de calidad en laguna Yalahau, Quintana Roo, México, basado en las características del agua y sedimentos, en el período 1999-2002. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 9: 20-29.
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America* 25: 655-744.
- Valette S. N. (1993) The Use of Sediment Cores to Reconstruct Historical Trends in Contamination of Estuarine and Coastal Sediments. *Estuaries* 16(3B): 577-588
- Vega M. E., De la Cruz G., Hernández S. y Pérez E. (1992). Análisis prospectivo de la comunidad de peces de la Laguna de Yalahau, Q. Roo, México. III Congreso Nacional de Ictiología, 24-27 Noviembre 1992. Oaxtepec, México.
- Walkley, A. y Black I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38
- Wantanabe K y Kuwae T. (2015) (PARI) How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system?. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.12924
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12924/abstract>

Wentworth, C. K. (1922). "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments". The Journal of Geology. **30** (5): 377 – 390. Bibcode: [1922JG.....30..377W](#). JSTOR [30063207](#). doi:[10.1086/622910](#).

Zenteno-Palma C. A., Olivos-Ortiz A., Álvarez-García M. D. C., Quijano-Scheggia, S. I., y Jiménez-Ramón G. A. (2015) Caracterización geoquímica de zonas de reforestación de mangle en los vasos i, ii y iii de la laguna de Cuyutlán, Colima. Disponible en: <http://atl.org.mx/isi-lac/images/1er-congreso/articulos/caracterizacion-geoquimica-de-zonas-de-reforestacion-de-mangle-en-los-vasos-i-ii-y-iii-de-la-laguna-de-cuyutlan-colima.pdf>

Anexo 1

Tabla 10. Parámetros granulométricos mediante las expresiones de Folk y Ward (1957)

<p>Tamaño gráfico promedio</p> $Mz = \frac{\rho_{16} + \rho_{50} + \rho_{84}}{3}$	<p>Arena muy gruesa: -1 phi a 0 phi Arena gruesa: 0 phi a 1 phi Arena media; 1 phi a 2 phi Arena fina: 2 phi a 3 phi Arena muy fina: 3 phi a 4 phi Limo muy grueso: 4 phi a 5 phi Limo grueso: 5 phi a 6 phi Limo medio: 6 phi a 7 phi Limo fino: 7 phi a 8 phi Arcila: > 8 phi</p>
<p>Desviación estándar gráfica inclusiva</p> $\sigma = \frac{\rho_{84} - \rho_{16}}{4} + \frac{\rho_{95} - \rho_5}{6.6}$	<p>Muy bien clasificado; menor de 0.35 phi Bien clasificado: 0.35 phi a 0.50 phi Moderadamente bien clasificado: 0.50 phi a 0.71 phi Mal clasificado: 1.00 phi a 2.00 phi Muy mal clasificado: 2.00 phi a 4.00 phi Extremadamente mal clasificado: > 4 phi</p>
<p>Grado de asimetría gráfica inclusiva:</p> $Ski = \frac{\rho_{16} + \rho_{84} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{84} - \rho_{16})} + \frac{\rho_5 + \rho_{95} - 2\rho_{50}}{2(\rho_{95} - \rho_5)}$	<p>Muy asimétrico hacia finos: +1.00 a +0.30 Asimétrico hacia finos: +0.30 a +0.10 Simétrico: +0.10 a -0.10 Asimétrico hacia grueso: -0.10 a -0.30 Muy asimétrico hacia grueso: -0.30 a -1.00</p>

A continuación, se presenta una descripción de los parámetros estadísticos utilizados en la descripción de la distribución de las frecuencias de los tamaños de las partículas:

Tamaño gráfico promedio (M_z) es el promedio de los diámetros de todas las partículas, es el valor del diámetro en el centro de gravedad de la distribución de frecuencias. El valor del promedio está representado por el promedio de los diámetros de los percentiles 16, 50 y 84 ($\rho_{16}, \rho_{50}, \rho_{84}$) para Folk (1974). El promedio de la muestra es menos variable que la mediana de la muestra, por lo tanto, el promedio es más eficiente en la estimación del parámetro de la población (Davis, 2002).

Desviación estándar gráfica inclusiva (σ) refleja el grado de clasificación de los tamaños de la muestra. La desviación estándar de una distribución de frecuencias es la medida de dispersión de los valores de una serie entorno a su promedio. La medida de desviación estándar propuesta por Folk y Ward (1957) abarca las colas de la distribución y considera cuatro intercepciones 5, 16, 84 y 95 ($\rho_5, \rho_{16}, \rho_{84}, \rho_{95}$). Los valores de la desviación crecen a medida que aumenta la dispersión de los datos. Folk y Ward (1957) definieron una serie de valores que reflejan distintos grados de clasificación de la distribución de los tamaños de grano. La desviación estándar inclusiva (índice de clasificación) es un parámetro textural sensible al ambiente sedimentario (Friedman, 1962).

Grado de asimetría gráfica inclusiva (S_{ki}) En una distribución normal simétrica la media y el promedio coinciden, pero si la distribución es asimétrica, el promedio se aparta de la mediana y la extensión de este alejamiento puede ser medido a través de la asimetría. La medida de asimetría de phi es cero para una distribución simétrica. Folk y Ward (1957) desarrollaron una medida de asimetría combinando la primera asimetría de propuesta por Inman (1952) con la media equivalente a las colas de la distribución dando lugar a la asimetría gráfica inclusiva. Como las medidas de Inman las curvas simétricas tienen un $S_{ki}=0$ y las medidas varían desde -1 a +1.

Anexo 2. RESULTADOS

Tabla 11. Tamaño gráfico promedio los sedimentos en las 3 temporadas de muestreo en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

	Mz								
	Secas			Lluvias			Nortes		
	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30
M HOL 1	1.83	2.13	2.01	1.93	2.16	2.14	1.69	1.97	2.10
M HOL 2 B	-0.80	-0.75	ND	2.04	1.98	1.94	2.1	2.19	2.24
M HOL 3	2.70	2.56	2.55	0.9	0.81	ND	0.66	0.14	0.31
M HOL 4	2.71	2.66	ND	2.68	2.52	2.52	2.64	2.75	2.59
M HOL 5	1.00	1.08	ND	3.46	3.48	3.39	3.23	3.44	3.48
M HOL 6	1.80	1.45	ND	2.26	2.09	ND	3.1	3.65	3.52
M HOL 7	1.66	1.45	1.06	1.76	2.41	1.01	1.78	2.01	1.43
M-HOL 8	0.90	-0.18	ND	2.33	2.28	2.82	2.82	2.2	2.4
M-HOL 9	1.61	1.80	1.8	1.33	1.12	ND	1.61	1.52	1.8
M HOL 10	3.15	2.85	2.25	3.38	1.37	2.35	2.3	2.73	ND
M HOL 11	1.6	0.9	0.98	3.42	2.84	2.19	3.01	2.44	2.03

ND = No disponible (la longitud de los núcleos es menor a 30 cm)

Tabla 12. Desviación estándar gráfica inclusiva en las 3 temporadas de muestreo en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo

	σ								
	Secas			Lluvias			Nortes		
	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30
M HOL 1	1.18	0.91	1.15	0.92	0.97	0.97	1.13	0.94	0.97
M HOL 2 B	1.18	1.27	ND	0.9	0.54	0.54	0.54	0.43	0.40
M HOL 3	0.95	0.70	0.6	1.76	1.88	1.88	1.74	1.84	1.80
M HOL 4	1.42	1.34	ND	0.59	0.75	0.75	0.66	0.5	0.60
M HOL 5	1.68	2.04	ND	0.82	1.11	1.11	1.2	0.99	1.01
M HOL 6	1.59	1.99	ND	1.7	1.12	1.12	1.71	1.04	0.67
M HOL 7	1.72	1.94	2.34	2.14	1.51	1.51	1.84	1.79	1.95
M-HOL 8	2.33	2.04	ND	1.62	1.72	1.72	1.25	1.73	1.7
M-HOL 9	0.62	0.67	0.78	2.08	2.29	2.29	1.96	2.01	2.13
M HOL 10	0.97	1.27	1.77	1.18	2.09	2.09	1.32	0.81	ND
M HOL 11	1.37	1.81	2.1	0.97	1.42	1.42	1.13	1.53	1.76

ND = No disponible (la longitud de los núcleos es menor a 30 cm)

Tabla 13. Porcentaje de MO en sedimentos de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

	CO								
	Secas			Lluvias			Nortes		
	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30	0 - 10	10 - 20	20 - 30
M HOL 1	2.03	1.71	1.70	2.58	2.60	2.28	1.57	1.33	5.76
M HOL 2 B	7.54	7.09	ND	1.29	1.19	ND	1.14	1.22	1.28
M HOL 3	2.55	1.95	1.57	7.42	5.61	ND	6.19	6.52	6.98
M HOL 4	5.06	8.18	ND	1.46	1.53	1.87	3.62	3.55	1.40
M HOL 5	2.65	6.90	ND	1.46	1.64	2.10	2.34	1.95	2.38
M HOL 6	1.90	1.46	ND	4.56	2.67	ND	4.07	2.98	2.38
M HOL 7	3.36	2.43	2.63	5.58	5.08	2.30	3.64	2.78	2.38
M-HOL 8	5.73	3.31	3.57	3.07	2.97	2.70	3.59	2.84	2.31
M-HOL 9	0.62	0.26	0.18	3.61	4.16	ND	4.95	7.31	18.07
M HOL 10	2.52	1.37	1.26	3.52	2.58	2.41	4.15	4.57	ND
M HOL 11	1.65	1.50	2.58	0.77	0.90	0.91	1.86	1.88	1.79

ND = No disponible (la longitud de los núcleos es menor a 30 cm)

Tabla 14. Porcentaje de CO cada 5 cm de profundidad del sedimento en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Sección	CO (%)
0-1	4.11
4-5	3.75
9-10	2.18
14-15	2.10
19-20	1.71
24-25	1.48
29-30	1.43
34-35	1.35
39-40	1.67
44-45	1.71
49-50	1.91
54-55	1.57
56-57	1.51

Tabla 15. Carbonato de calcio a cada 5 cm de profundidad del sedimento en el núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Profundidad	Peso (g)	Gasto (mL)	CaCO₃ (g)	CaCO₃ (mg/g)	CaCO₃ (%)
0.5	0.251	13.390	0.188	751.573	75.16
4.5	0.250	13.142	0.195	778.615	77.86
9.5	0.250	12.340	0.215	859.890	85.99
14.5	0.251	11.978	0.224	894.928	89.49
19.5	0.251	12.082	0.222	884.369	88.44
24.5	0.250	11.780	0.229	916.492	91.65
29.3	0.251	11.764	0.230	915.924	91.59
34.5	0.251	11.694	0.232	923.393	92.34
39.5	0.251	11.794	0.229	912.880	91.29
44.5	0.251	11.804	0.229	912.593	91.26
44.5	0.250	11.902	0.226	904.448	90.44
44.5	0.250	11.772	0.230	917.672	91.77
49.5	0.251	12.002	0.224	891.780	89.18
54.5	0.251	11.622	0.233	930.329	93.03
56.5	0.251	11.630	0.233	929.517	92.95

Tabla 16. Concentraciones de Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl y K con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Elemento	Na	Na	Mg	Mg	Al	Al	Si	Si	P	P	S	S	Cl	Cl	K	K
Dimensión	%	±	%	±	%	±	%	±	%	±	%	±	%	±	%	±
HX10 00-01	12.59	0.3	1.492	0.048	0.119	0.011	3.061	0.007	0.02396	0.00033	0.8662	0.0011	5.392	0.003	0.16	0.0016
HX10 01-02	14.52	0.32	1.748	0.053	0.174	0.011	3.977	0.008	0.02491	0.00034	0.6039	0.0009	5.258	0.003	0.1653	0.0016
HX10 03-04	12.07	0.3	1.72	0.048	0.162	0.01	3.408	0.007	0.02655	0.00032	0.6313	0.001	4.143	0.003	0.1503	0.0016
HX10 04-05	10.96	0.28	1.54	0.045	0.1213	0.0098	2.594	0.006	0.02351	0.00029	0.553	0.0009	4.094	0.003	0.1455	0.0016
HX10 05-06	8.59	0.22	1.683	0.036	0.1878	0.0081	2.711	0.006	0.0226	0.00023	0.5531	0.0008	2.107	0.001	0.122	0.0015
HX10 06-07	7.82	0.21	1.492	0.034	0.1916	0.0078	2.25	0.005	0.02188	0.00021	0.54	0.0008	1.785	0.001	0.1096	0.0014
HX10 07-08	7.36	0.18	1.559	0.031	0.2396	0.007	2.288	0.005	0.01914	0.00018	0.5319	0.0008	1.399	0.001	0.1001	0.0014
HX10 09-10	5.71	0.16	1.249	0.028	0.2143	0.0065	1.684	0.004	0.01818	0.00017	0.4635	0.0007	1.07	0.001	0.0944	0.0014
HX10 10-11	5.6	0.16	1.3	0.027	0.2403	0.0063	2.295	0.005	0.02034	0.00016	0.488	0.0007	0.6863	0.0005	0.0871	0.0013
HX10 11-12	5.03	0.15	1.34	0.027	0.2594	0.0061	2.509	0.005	0.01876	0.00015	0.4686	0.0007	0.3888	0.0003	0.0856	0.0013
HX10 12-13	4.73	0.14	1.294	0.025	0.2521	0.0059	2.488	0.005	0.01847	0.00014	0.4617	0.0007	0.3845	0.0003	0.0806	0.0013
HX10 13-14	5.14	0.15	1.329	0.027	0.2627	0.0062	2.307	0.005	0.01908	0.00015	0.4508	0.0007	0.3666	0.0002	0.0809	0.0013
HX10 14-15	4.95	0.14	1.111	0.026	0.2074	0.006	1.68	0.004	0.01742	0.00015	0.4094	0.0006	0.6621	0.0004	0.08	0.0013
HX10 15-16	4.94	0.13	1.15	0.024	0.2406	0.0055	1.739	0.004	0.01808	0.00013	0.4049	0.0006	0.3222	0.0002	0.0735	0.0013
HX10 16-17	3.8	0.11	1.1	0.022	0.2366	0.0051	1.657	0.004	0.0183	0.00013	0.3728	0.0006	0.4217	0.0003	0.0677	0.0013
HX10 17-18	4.62	0.13	1.267	0.024	0.2687	0.0054	1.841	0.004	0.01663	0.00013	0.4136	0.0006	0.1922	0.0001	0.0692	0.0013
HX10 18-19	4.09	0.12	1.167	0.023	0.2463	0.0053	2.378	0.004	0.01855	0.00013	0.3894	0.0006	0.2288	0.0002	0.0716	0.0013
HX10 19-20	4.18	0.12	1.006	0.023	0.2269	0.0053	1.847	0.004	0.0175	0.00013	0.3785	0.0006	0.4486	0.0003	0.0731	0.0013
HX10 20-21	3.98	0.12	1.214	0.022	0.261	0.0052	2.554	0.004	0.01812	0.00013	0.3813	0.0006	0.2011	0.0001	0.0708	0.0013
HX10 21-22	3.51	0.11	1.071	0.021	0.2481	0.0051	2.496	0.004	0.0194	0.00013	0.3644	0.0006	0.2186	0.0002	0.0689	0.0013
HX10 22-23	3.58	0.11	1.125	0.022	0.2518	0.0051	2.569	0.004	0.01857	0.00012	0.3611	0.0006	ND	ND	0.0637	0.0012
HX10 23-24	3.88	0.11	1.187	0.022	0.2552	0.005	1.998	0.004	0.01661	0.00012	0.3474	0.0005	0.04429	0.00003	0.0592	0.0012
HX10 24-25	4.45	0.13	1.348	0.024	0.2959	0.0054	2.053	0.005	0.01646	0.00013	0.3999	0.0006	0.2082	0.0001	0.0701	0.0013
HX10 29-30	3.38	0.11	0.943	0.021	0.1747	0.0049	1.552	0.004	0.01654	0.00012	0.3495	0.0005	0.2835	0.0002	0.0625	0.0013
HX10 39-40	3.95	0.12	1	0.022	0.1982	0.0052	1.908	0.004	0.01742	0.00013	0.3604	0.0006	0.3454	0.0002	0.0692	0.0013
HX10 49-50	3.6	0.11	0.89	0.021	0.1814	0.005	2.067	0.004	0.01809	0.00013	0.3686	0.0006	0.3293	0.0002	0.0793	0.0013
HX10 56-57	3.41	0.1	0.864	0.021	0.1247	0.0049	1.08	0.004	0.01725	0.00013	0.3345	0.0005	0.495	0.0003	0.0626	0.0013

ND = No detectados

Tabla 17. Concentraciones de Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Elemento	Ca	Ca	Ti	Ti	V	V	Cr	Cr	Mn	Mn	Fe	Fe	Ni	Ni	Cu	Cu	Zn	Zn
Dimensión	%	±	%	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	%	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±
HX10 00-01	17.07	0.01	0.0106	0.00039	1.9	1.1	11.3	0.5	23.4	1	0.06052	0.00028	23.6	0.7	18.4	0.7	10.4	0.4
HX10 01-02	18.5	0.01	0.01365	0.0004	4.6	1.2	11.2	0.5	22.1	1	0.05569	0.00028	20.7	0.7	19.7	0.8	5.4	0.4
HX10 03-04	19.72	0.01	0.01306	0.00041	8.1	1.2	8.7	0.5	25.8	1	0.053	0.00028	17.4	0.7	20.3	0.8	4.8	0.4
HX10 04-05	20.21	0.01	0.01034	0.00042	1.6	1.2	10.1	0.5	23.9	1	0.05856	0.00028	20.8	0.8	20.6	0.8	3.9	0.4
HX10 05-06	22.64	0.01	0.01733	0.00042	11.9	1.1	10.3	0.5	32.5	1.1	0.05491	0.00028	32.5	0.8	18.3	0.8	2.8	0.4
HX10 06-07	23.48	0.01	0.01794	0.00043	11.5	1.2	10.4	0.5	31.3	1.1	0.05618	0.00029	15.2	0.8	18.3	0.8	3.4	0.4
HX10 07-08	24.14	0.01	0.01799	0.00044	11	1.2	11.1	0.5	27.9	1.1	0.05593	0.00029	15.5	0.8	18.7	0.8	2.7	0.4
HX10 09-10	25.32	0.02	0.01862	0.00045	11.1	1.2	14.4	0.5	39.4	1	0.06518	0.00031	18.3	0.8	18.2	0.8	4.6	0.4
HX10 10-11	25.88	0.02	0.01581	0.00049	8.5	1.3	12.3	0.5	35	1.1	0.05926	0.00029	16.3	0.8	19.1	0.8	3.5	0.4
HX10 11-12	26.77	0.02	0.02154	0.00049	10.8	1.2	12.2	0.5	36.7	1.1	0.0624	0.00031	16.8	0.8	19.3	0.8	3.6	0.4
HX10 12-13	26.75	0.02	0.0205	0.00048	12.4	1.2	11.9	0.5	31.3	1.1	0.05965	0.0003	16	0.8	18.5	0.8	4.3	0.4
HX10 13-14	27.1	0.02	0.01517	0.00051	5.9	1.2	12.6	0.5	46.3	1.1	0.06065	0.0003	36.7	0.9	19.9	0.8	4	0.4
HX10 14-15	26.6	0.02	0.01865	0.00047	10.6	1.2	13.4	0.5	33.2	1.1	0.06254	0.0003	18.8	0.8	18	0.8	4.5	0.4
HX10 15-16	27.67	0.02	0.01777	0.00047	12	1.2	11.9	0.5	33.9	1.1	0.05096	0.00027	14.3	0.8	20.2	0.9	3.3	0.4
HX10 16-17	27.32	0.02	0.01613	0.00045	11	1.2	11.3	0.5	36.1	1	0.0492	0.00027	15.4	0.8	19.4	0.8	4.3	0.4
HX10 17-18	28.06	0.02	0.01779	0.00048	13.5	1.2	11.9	0.5	29.1	1.1	0.05295	0.00028	14.9	0.8	19.3	0.9	3.6	0.4
HX10 18-19	27.69	0.02	0.0187	0.00048	11.4	1.2	12.3	0.5	36.1	1	0.05404	0.00028	15.6	0.8	19.9	0.8	2.6	0.4
HX10 19-20	27.13	0.02	0.01806	0.00046	13.2	1.2	12.5	0.5	39.8	1.1	0.06156	0.00029	24.1	0.9	16.6	0.8	3.9	0.4
HX10 20-21	27.75	0.02	0.01861	0.00048	11.8	1.2	12	0.5	38.5	1.1	0.05486	0.00029	14.3	0.8	18.9	0.8	2.9	0.4
HX10 21-22	27.76	0.02	0.01798	0.00047	12.7	1.2	12.7	0.5	36.8	1	0.0529	0.00028	15.3	0.8	18.8	0.8	3.6	0.4
HX10 22-23	28.86	0.02	0.01371	0.00052	4.6	1.3	12.2	0.5	37.8	1.1	0.05477	0.00029	16.5	0.8	19	0.9	2.2	0.4
HX10 23-24	28.96	0.02	0.01611	0.00047	9.4	1.2	12.5	0.5	38.8	1.1	0.05143	0.00028	18	0.8	18.1	0.8	3.7	0.4
HX10 24-25	28.02	0.02	0.01902	0.00048	11.7	1.2	13.3	0.5	37.8	1.1	0.05535	0.00029	14.8	0.8	18.1	0.8	4.6	0.4
HX10 29-30	27.91	0.02	0.01485	0.00045	11.1	1.2	12	0.5	34.9	1.1	0.05487	0.00028	26.2	0.9	19.4	0.9	3.3	0.4
HX10 39-40	27.53	0.02	0.01766	0.00047	13.5	1.2	12.6	0.5	37.1	1.1	0.05614	0.00028	27.2	0.9	20	0.9	3.6	0.4
HX10 49-50	27.37	0.02	0.01635	0.00046	13.2	1.2	13.6	0.5	36.4	1	0.05489	0.00028	24.5	0.9	18.6	0.8	4.8	0.4
HX10 56-57	27.25	0.02	0.01174	0.00042	9.5	1.1	13.2	0.5	31.7	1	0.04363	0.00025	26.7	0.9	18	0.8	8.4	0.4

ND = No detectado

Tabla 18. Concentraciones de Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Mo y Ag con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Elemento	Ga	Ga	As	As	Se	Se	Br	Br	Rb	Rb	Sr	Sr	Y	Y	Mo	Mo	Ag	Ag
Dimensión	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±
HX10 00-01	5.6	0.2	2.7	0.2	0.8	0.1	362.1	1	0.9	0.4	3100	2	5.5	0.2	4.9	0.4	ND	ND
HX10 01-02	5.6	0.2	2.7	0.2	0.7	0.1	375.4	1	0.9	0.4	3139	2	5.5	0.2	5.3	0.4	ND	ND
HX10 03-04	5.6	0.2	2.9	0.2	0.9	0.1	367	1	1.2	0.4	3302	2	5.8	0.2	6.3	0.4	7	3.8
HX10 04-05	5.3	0.2	2.2	0.2	0.7	0.1	342.9	1	1.1	0.4	3313	2	5.9	0.2	6.6	0.4	ND	ND
HX10 05-06	5.6	0.2	2.4	0.2	0.8	0.1	293.4	1	1.7	0.4	3504	3	6.2	0.3	5.9	0.4	ND	ND
HX10 06-07	5.3	0.2	1.4	0.2	0.9	0.1	263.9	0.9	1.4	0.4	3640	3	6.3	0.3	4.5	0.4	ND	ND
HX10 07-08	5.5	0.2	0.9	0.2	0.8	0.1	221.1	0.9	2.5	0.4	3691	3	6.4	0.3	5	0.4	ND	ND
HX10 09-10	5.3	0.2	0.5	0.2	0.8	0.1	201.8	0.8	2.1	0.4	4033	3	7.1	0.3	3	0.4	10.2	4.3
HX10 10-11	5.6	0.2	ND	ND	0.7	0.1	187.7	0.8	2.5	0.4	4136	3	7.6	0.3	2.8	0.4	11.5	4.5
HX10 11-12	6	0.2	ND	ND	0.9	0.1	186.7	0.8	3.1	0.4	4320	3	7.7	0.3	3.3	0.4	5.9	4.6
HX10 12-13	5.9	0.2	ND	ND	0.8	0.1	168.3	0.8	2.7	0.4	4261	3	7.5	0.3	2.2	0.4	ND	ND
HX10 13-14	6	0.2	ND	ND	1	0.1	168	0.8	2.9	0.4	4323	3	8.3	0.3	2.1	0.4	4.9	4.6
HX10 14-15	5.4	0.2	ND	ND	0.8	0.1	170.3	0.8	2.4	0.4	4253	3	7.5	0.3	2.6	0.4	ND	ND
HX10 15-16	5.4	0.2	ND	ND	0.8	0.1	157.4	0.8	3.1	0.4	4403	3	7.7	0.3	2.9	0.4	ND	ND
HX10 16-17	6.1	0.2	ND	ND	1	0.1	135.9	0.7	3	0.4	4277	3	8.4	0.3	1.9	0.4	ND	ND
HX10 17-18	5.9	0.2	ND	ND	0.8	0.1	149.2	0.8	2.5	0.4	4407	3	8	0.3	2.7	0.4	ND	ND
HX10 18-19	5.8	0.2	ND	ND	0.9	0.1	149.3	0.8	3.4	0.4	4385	3	8.3	0.3	2.8	0.4	4.6	4.6
HX10 19-20	5.4	0.2	ND	ND	0.9	0.1	144.1	0.7	2.9	0.4	4326	3	8	0.3	3.1	0.4	ND	ND
HX10 20-21	5.8	0.2	ND	ND	0.9	0.1	141.2	0.8	2.4	0.4	4354	3	8	0.3	1.7	0.4	ND	ND
HX10 21-22	5.7	0.2	ND	ND	0.8	0.1	126.9	0.7	2.8	0.4	4279	3	8.1	0.3	2.3	0.4	11.7	4.6
HX10 22-23	6	0.2	ND	ND	0.8	0.1	126.9	0.7	3.4	0.4	4511	3	8.4	0.3	1.9	0.4	ND	ND
HX10 23-24	6	0.2	ND	ND	0.9	0.1	113.1	0.7	2.7	0.4	4491	3	8.5	0.3	ND	ND	ND	ND
HX10 24-25	5.5	0.2	ND	ND	0.7	0.1	131.7	0.7	3.2	0.4	4345	3	7.9	0.3	1.9	0.4	ND	ND
HX10 29-30	5.3	0.2	ND	ND	0.8	0.1	128.2	0.7	2	0.4	4421	3	7.8	0.3	1.4	0.4	ND	ND
HX10 39-40	5.4	0.2	ND	ND	0.7	0.1	136.6	0.7	2.7	0.4	4433	3	7.7	0.3	3.5	0.4	9.1	4.5
HX10 49-50	5.2	0.2	ND	ND	0.8	0.1	141.7	0.8	2.7	0.4	4440	3	8	0.3	2.2	0.4	ND	ND
HX10 56-57	5.1	0.2	ND	ND	0.8	0.1	121.7	0.7	1.9	0.4	4287	3	7.9	0.3	1.9	0.4	9.8	4.5

ND = No detectado

Tabla 19. Concentraciones de Cd, Sn, Ba, La, Ce, W, Pb, Bi, Th y U con respecto a la profundidad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo

Elemento	Cd	Cd	Sn	Sn	Ba	Ba	La	La	Ce	Ce	W	W	Pb	Pb	Bi	Bi	Th	Th	U	U
Dimensión	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±	µg/g	±
HX10 00-01	4.5	0.9	ND	ND	41.8	7.3	ND	ND	ND	ND	1.4	0.3	2	0.2	3.8	0.5	1	0.3	2.4	0.1
HX10 01-02	4	0.9	ND	ND	40.1	7.5	2.9	2.2	ND	ND	1.2	0.3	2.5	0.2	3.5	0.5	ND	ND	2.8	0.1
HX10 03-04	6.2	1	ND	ND	49.6	7.3	ND	ND	ND	ND	1.5	0.2	1.9	0.2	4.4	0.5	ND	ND	3.3	0.1
HX10 04-05	6.8	1	ND	ND	38.9	7.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.9	0.2	3.7	0.5	ND	ND	2.4	0.1
HX10 05-06	2.9	0.9	ND	ND	29.8	6.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.9	0.5	ND	ND	3.1	0.1
HX10 06-07	4.4	1	ND	ND	30.4	6.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.2	0.1	3.5	0.5	ND	ND	2.7	0.1
HX10 07-08	5.8	1	22.8	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.7	0.2	3.5	0.5	ND	ND	2.7	0.1
HX10 09-10	6.6	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1	0.3	1.3	0.1	4	0.5	ND	ND	2.6	0.1
HX10 10-11	8.7	1.1	ND	ND	30.9	6.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.6	0.2	3.8	0.5	ND	ND	2.4	0.1
HX10 11-12	8	1.1	17.9	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1	0.3	1.3	0.1	3	0.5	ND	ND	2.8	0.1
HX10 12-13	8.3	1.1	ND	ND	15.5	6.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.7	0.2	3.3	0.5	ND	ND	1.7	0.1
HX10 13-14	5.9	1.1	ND	ND	33.3	6.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.1	0.5	ND	ND	1.5	0.1
HX10 14-15	5.1	1	ND	ND	23.6	6.3	ND	ND	ND	ND	1.2	0.3	1.2	0.1	3	0.5	ND	ND	1.4	0.1
HX10 15-16	5.2	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.1	0.3	1.3	0.1	3.3	0.5	ND	ND	1.6	0.1
HX10 16-17	10	1.1	20.8	1.4	26.5	6.1	8	4.4	100	43	1.4	0.2	ND	ND	4.6	0.5	ND	ND	3.1	0.1
HX10 17-18	4.9	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	104	45	1.1	0.3	1.1	0.1	3.2	0.5	ND	ND	3	0.1
HX10 18-19	6.6	1.1	18.1	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.2	0.2	ND	ND	3.9	0.5	ND	ND	2.8	0.1
HX10 19-20	3.4	0.9	22.6	1.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.7	0.5	ND	ND	2.1	0.1
HX10 20-21	5.1	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	40	40	1.1	0.2	ND	ND	3.1	0.5	ND	ND	2.3	0.1
HX10 21-22	7.5	1.1	18	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.5	0.5	ND	ND	1.2	0.1
HX10 22-23	5.4	1.1	28.4	1.6	32.2	6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.2	0.1	3.6	0.5	ND	ND	1.2	0.1
HX10 23-24	7.1	1.1	17.3	1.4	17	6	3.3	2	ND	ND	1.3	0.2	1	0.1	3.5	0.5	ND	ND	1.9	0.1
HX10 24-25	4.3	1	25.3	1.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.1	0.3	1.8	0.2	3.2	0.5	ND	ND	1.6	0.1
HX10 29-30	3.1	0.9	ND	ND	21.7	6	3.6	1.6	ND	ND	ND	ND	1.5	0.1	3.1	0.5	ND	ND	1.3	0.1
HX10 39-40	8.3	1.1	ND	ND	12	6.2	ND	ND	144	43	ND	ND	1.4	0.1	3.1	0.5	ND	ND	2.8	0.1
HX10 49-50	6.9	1.1	ND	ND	25.3	6.1	ND	ND	ND	ND	1	0.3	1.1	0.1	3	0.5	ND	ND	1.8	0.1
HX10 56-57	7.6	1	23.1	1.5	12.9	6.3	ND	ND	ND	ND	1.3	0.3	ND	ND	3.1	0.5	ND	ND	2.4	0.1

ND = No detectado

Tabla 20. Tasas de acumulación másica y sedimentaria con respecto a la profundidad y edad del núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

Sección	Profundidad (cm)	MAR (g/cm² yr)	+-	SAR (cm/yr)	+-
Hx10 0-1	0.5	0.14	0.02	0.41	0.06
Hx10 1-2	1.5	0.13	0.02	0.43	0.06
Hx10 2-3	2.5	0.11	0.01	0.29	0.04
Hx10 3-4	3.5	0.10	0.01	0.26	0.04
Hx10 4-5	4.5	0.09	0.01	0.15	0.02
Hx10 5-6	5.5	0.08	0.01	0.13	0.02
Hx10 6-7	6.5	0.08	0.01	0.12	0.02
Hx10 7-8	7.5	0.08	0.01	0.14	0.03
Hx10 8-9	8.5	0.08	0.02	0.10	0.02
Hx10 9-10	9.5	0.09	0.03	0.10	0.03
Hx10 10-11	10.5	0.08	0.03	0.12	0.05
Hx10 11-12	11.5	0.08	0.03	0.09	0.04
Hx10 12-13	12.5	0.07	0.04	0.09	0.05
Hx10 13-14	13.5	0.07	0.05	0.07	0.06
Hx10 14-15	14.5	0.07	0.08	0.08	0.10
Hx10 15-16	15.5	0.06	0.09	0.08	0.12
Hx10 16-17	16.5	0.05	0.09	0.05	0.09
Hx10 17-18	17.5	0.03	0.11	0.03	0.10

Tabla 21. Almacén de C del Núcleo HX10 de la laguna Yalahau, Holbox, Q. Roo.

	Sección	Densidad por sección (g/cm³)	±
1	0-1	0.013	0.003
2	01-02	0.015	0.003
3	02-03	0.017	0.004
4	03-04	0.019	0.004
5	04-05	0.020	0.005
6	05-06	0.020	0.005
7	06-07	0.020	0.005
8	07-08	0.020	0.005
9	08-09	0.020	0.005
10	09-10	0.019	0.004
11	10-11	0.019	0.004
12	11-12	0.019	0.004
13	12-13	0.018	0.004
14	13-14	0.018	0.004
15	14-15	0.017	0.004
16	15-16	0.017	0.004
17	16-17	0.017	0.004
18	17-18	0.016	0.004
19	18-19	0.016	0.004
20	19-20	0.015	0.003
21	20-21	0.015	0.003
22	21-22	0.015	0.003
23	22-23	0.015	0.003
24	23-24	0.015	0.003
25	24-25	0.015	0.003
26	25-26	0.014	0.003
27	26-27	0.013	0.003
28	27-28	0.012	0.003
29	28-29	0.012	0.003
30	29-30	0.011	0.002
31	30-31	0.012	0.003
32	31-32	0.013	0.003
33	32-33	0.014	0.003
34	33-34	0.016	0.004
35	34-35	0.017	0.004
36	35-36	0.017	0.004
37	36-37	0.018	0.004
38	37-38	0.018	0.004
39	38-39	0.019	0.004
40	39-40	0.019	0.004

41	40-41	0.019	0.004
42	41-42	0.019	0.004
43	42-43	0.018	0.004
44	43-44	0.018	0.004
45	44-45	0.017	0.004
46	45-46	0.019	0.004
47	46-47	0.021	0.005
48	47-48	0.023	0.005
49	48-49	0.025	0.006
50	49-50	0.027	0.006
51	50-51	0.027	0.006
52	51-52	0.027	0.006
53	52-53	0.026	0.006
54	53-54	0.026	0.006
55	54-55	0.025	0.006
56	55-56	0.018	0.004
57	56-57	0.010	0.002
58	57-58	0.018	0.004
59	58-59	0.018	0.004
60	59-60	0.018	0.004
61	60-61	0.018	0.004
62	61-62	0.018	0.004
63	62-63	0.018	0.004
64	63-64	0.018	0.004
65	64-65	0.018	0.004
66	65-66	0.018	0.004
67	66-67	0.018	0.004
68	67-68	0.018	0.004
69	68-69	0.018	0.004
70	69-70	0.018	0.004
71	70-71	0.018	0.004
72	71-72	0.018	0.004
73	72-73	0.018	0.004
74	73-74	0.018	0.004
75	74-75	0.018	0.004
76	75-76	0.018	0.004
77	76-77	0.018	0.004
78	77-78	0.018	0.004
79	78-79	0.018	0.004
80	79-80	0.018	0.004
81	80-81	0.018	0.004
82	81-82	0.018	0.004
83	82-83	0.018	0.004

84	83-84	0.018	0.004
85	84-85	0.018	0.004
86	85-86	0.018	0.004
87	86-87	0.018	0.004
88	87-88	0.018	0.004
89	88-89	0.018	0.004
90	89-90	0.018	0.004
91	90-91	0.018	0.004
92	91-92	0.018	0.004
93	92-93	0.018	0.004
94	93-94	0.018	0.004
95	94-95	0.018	0.004
96	95-96	0.018	0.004
97	96-97	0.018	0.004
98	97-98	0.018	0.004
99	98-99	0.018	0.004
100	99-100	0.018	0.004
	TOTAL	1.7895594	0.988
	(g/cm³)		
	MgC /	178.955939	98.769
	hectárea-cm		



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00044

Matrícula: 2161801469

ALMACENAMIENTO DE CARBONO AZUL EN PRADERAS DE PASTOS MARINOS EN LA LAGUNA YALAHAU DE LA RESERVA YUM BALAM (HOLBOX, QUINTANA ROO)

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:00 horas del día 16 del mes de julio del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. MARIANO GUTIERREZ ROJAS
DR. BENITO HERNANDEZ CASTELLANOS
DR. JUAN GABRIEL RIVERA MARTINEZ



DIANA BELEN HERVER HERNANDEZ
ALUMNA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: DIANA BELEN HERVER HERNANDEZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

- A PROBAR -

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JESUS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE

DR. MARIANO GUTIERREZ ROJAS

VOCAL

DR. BENITO HERNANDEZ CASTELLANOS

SECRETARIO

DR. JUAN GABRIEL RIVERA MARTINEZ