

Informe final* del Proyecto UM001
Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del Sitio de interés Norte de la
Península de Yucatán

Responsable:	Dr. Jorge Alfredo Herrera Silveira
Institución:	Centro de Investigación y estudios avanzados - Mérida
Correo electrónico:	jorge.herrera@cinvestav.mx
Fecha de inicio:	15 de abril de 2023
Fecha de término:	22 de julio de 2025
Principales resultados:	Informe final y bases de datos en Excel.
Forma de citar** el informe final y otros resultados:	Herrera-Silveira J.A., Cinco-Castro S., Moreno-Martínez A., Us-Balam H., Ku-May R., 2025. Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Unidad Mérida. Informe Final, Proyecto UM001. Ciudad de México.

Resumen:

En respuesta a la convocatoria realizada por CONABIO y WWF-México en 2022, con la finalidad de fortalecer el Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM), se propone dar seguimiento a algunos sitios de manglar monitoreados durante los proyectos FN009 y KN003, e incorporar nuevos sitios en la costa de Yucatán y Quintana Roo. El enfoque del proyecto pretende aportar información para la toma de decisiones relacionadas con la conservación y restauración de los ecosistemas de manglar para reducir la vulnerabilidad y hacer frente a los efectos del cambio climático. En este sentido, dar seguimiento a las variaciones en las características hidrológicas, edafológicas y estructurales de los manglares con diferente grado de conservación permite comprender su funcionamiento, resistencia y vulnerabilidad. Para este fin, el proyecto propone la evaluación en diferentes épocas climáticas (lluvias y secas) de variables estructurales de la vegetación, de las características hidrológicas con muestreos discretos y continuos del agua y del contenido de nitrógeno total, fósforo total y carbono total en los suelos a diferentes profundidades, haciendo énfasis en la capacidad que tienen estos compartimentos para almacenar carbono. Los resultados en un periodo de 18 meses incluyen: informes técnicos con los hallazgos de campo y laboratorio, bases de datos detalladas de acuerdo con lo establecido por CONABIO, así como anexos fotográficos de los sitios, especies y actividades realizadas que cumplan con las características especificadas. Si bien el presupuesto destinado por CONABIO para este fin es insuficiente, existe el interés genuino de CINVESTAV como centro de investigación por generar conocimiento de los manglares de la Región Península de Yucatán y continuar contribuyendo con el SMMM.

-
- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
 - ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.



Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)



CONABIO
COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)

INFORME FINAL – ABRIL 2024

Coordinador: Dr. Jorge A. Herrera Silveira.

Autores: Jorge A. Herrera-Silveira, Siuling Cinco-Castro, Heimi G. Us-Balam, Ameyali Moreno-Martínez, Reymundo Ku-May.

Participantes en muestreo de campo y bases de datos: Ameyali Moreno-Martínez, Heimi G. Us-Balam, Reymundo Ku-May, Lucia Guerra-Cano, Pedro Robles-Toral, Luis Avila Castro.

Forma de citar: Herrera-Silveira J.A., Cinco-Castro S., Moreno-Martínez A., Us-Balam H., Ku-May R., 2025. Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Unidad Mérida. Informe Final, Proyecto UM001. Ciudad de México.



CONABIO
COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD



RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe final describe los resultados del proyecto "Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)", desarrollado entre 2023 y 2025, con el objetivo de dar seguimiento a variables estructurales, hidrológicas y edafológicas en ocho Unidades de Muestreo (UM) permanentes distribuidas en la costa norte de la Península de Yucatán. Este conjunto de actividades pretende dar continuidad a los proyectos FN009 y KN003, y busca generar conocimiento técnico-científico que permita comprender las características, funcionalidad y respuesta de los manglares ante el cambio climático.

Durante el proyecto se realizaron tres campañas de muestreo representativas de las temporadas climáticas regionales de lluvias, secas y nortes. Se llevaron a cabo mediciones *in situ* de variables fisicoquímicas (salinidad, temperatura, pH, potencial redox), estructurales de la vegetación (altura, DAP, mortalidad, regeneración), y del suelo (carbono orgánico, nitrógeno, humedad, densidad aparente, entre otros). Adicionalmente, se instalaron sensores automáticos para monitorear las características del hidropériodo. Las actividades realizadas en campo permitieron recopilar una gran diversidad de datos en las UM, a pesar de incidentes de vandalismo en algunos equipos de medición.

Los resultados muestran una alta variabilidad espacial y temporal en las condiciones ambientales y estructurales de los manglares, influenciada por factores geomorfológicos, climáticos y antrópicos. Se observaron diferencias en la estructura vegetal entre las UM y, en algunos casos, se pudieron identificar efectos de eventos hidrometeorológicos y de procesos de degradación o restauración. Los parámetros fisicoquímicos y edáficos revelaron contrastes importantes entre UM, destacando la importancia del monitoreo continuo para entender la dinámica y salud del ecosistema de manglar.

En conclusión, el proyecto logró todos los objetivos propuestos y generó una línea base sólida para el seguimiento ecológico de los manglares del norte de la Península de Yucatán. La información obtenida constituye un insumo relevante para la formulación de estrategias de conservación, restauración y manejo de estos ecosistemas frente al cambio climático. Asimismo, resalta la necesidad de fortalecer redes de monitoreo interinstitucionales, fomentar la participación comunitaria y promover el uso de datos de alta resolución para la toma de decisiones informadas.



CONTENIDO

GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1. Objetivo general del proyecto	1
2. Objetivos específicos del proyecto	1
3. Avances del proyecto	1
4. Logro de objetivos	2
5. Modificaciones en las etapas	2
5.1 Cambios en las coordenadas originales	3
6. Productos obtenidos en el proyecto	5
I. INTRODUCCIÓN	7
II. ANTECEDENTES	9
III. JUSTIFICACIÓN	10
IV. ÁREA DE ESTUDIO	12
1. Dzilam de Bravo	14
2. Río Lagartos	16
3. Yum Balam	17
V. MÉTODOS	18
1. Diseño de muestreo	18
2. Variables estructurales	21
3. Variables hidrológicas	22
4. Variables edafológicas	23
5. Análisis de laboratorio	24
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
1. Variables estructurales	26
1.1 Unidad de Muestreo 20x20	29
1.2 Subunidad 10x10	33
1.3 Subunidad 4x4	34
1.4 Subunidad 1x1	36
2. Variables hidrológicas	38
2.1 Salinidad	38
2.2 Temperatura	39
2.3 pH	40
2.4 Potencial redox	41

2.6 Hidroperíodo	46
3. Variables edafológicas.....	48
3.1 Caracterización del suelo	48
3.2 Peso húmedo	52
3.3 Peso seco	53
3.4 Porcentaje de humedad	54
3.5 Densidad aparente	54
3.5 Carbono total	55
3.6 Carbono orgánico	56
VII. CONCLUSIONES	58
ANEXO I	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impactos antrópicos (construcción de carreteras) en zonas de manglar en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Unidad Mérida.....	8
Figura 2. Ubicación geográfica de las UM para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	14
Figura 3. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Dzilam para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	15
Figura 4. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Río Lagartos para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	17
Figura 5. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Yum Balam para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	18
Figura 6. Esquema y delimitación de la unidad y subunidades de muestreo para el monitoreo y caracterización estructural, ambiental y edafológica en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Los puntos negros representan la ubicación de la colecta de núcleos de suelo y los puntos azules la colecta de muestras para el registro de parámetros de agua intersticial. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.....	20
Figura 7. Medición de variables estructurales (Altura y DAP) en UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Dzilam Las Bocas (A y C), Río Lagartos (B). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	21
Figura 8. Colecta y medición de parámetros fisicoquímicos del agua intersticial en la UM de Dzilam Las Bocas, en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	22
Figura 9. Instalación de medidores automáticos del nivel de agua y temperatura para el monitoreo de las variables del hidroperíodo en la UM de Chiquilá, en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	23
Figura 10. Colecta de muestras de suelo en las UM de Dzilam Las Bocas (A), Chiquilá (B) y Chiquilá 2 (C), en el sitio Norte de la Península de Yucatán Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	24
Figura 11. Análisis de muestras de suelo de 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Determinación de peso húmedo (A), secado de las muestras en la mufla por 72 h a 70°C (B), determinación de peso seco (C). Posteriormente las muestras se tamizaron y homogeneizaron (D) para el análisis LOI (E) y combustión seca (F). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	25
Figura 12. Estructura de la vegetación de las UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán durante la temporada de lluvias. Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C), San Felipe (D). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	27

Figura 13. Estructura de la vegetación de las UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán durante la temporada de lluvias. Río Lagartos (E), El Cuyo (F), Chiquilá 1 (G) y Chiquilá 2 (H). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.....	28
Figura 14. Árboles muertos en pie en la UM de Dzilam WWF 2, en el sitio Norte de la Península de Yucatán reubicado durante la temporada de nortes. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	28
Figura 15. Altura promedio de los árboles de manglar en la UM (20x20) en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias (muestreo 1: 2023), secas (muestreo 2: 2024) y nortes (muestreo 3: 2025). Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total del proyecto considerando todas las UM y todos los muestreos.....	29
Figura 16. DAP promedio de los árboles de manglar en la UM (20x20) en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias (muestreo 1), secas (muestreo 2) y nortes (muestreo 3). Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	30
Figura 17. Relación altura – DAP en árboles de manglar en el sitio Norte de la Península de Yucatán en la época de lluvias (A) y nortes (B). Los sitios corresponden a: Dzilam Pueblo (1A y 1B), Dzilam WWF (2A), Dzilam Las Bocas (3A y 3B), San Felipe (4A y 4B), Río Lagartos (5A y 5B), El Cuyo (6A y 6B), Chiquilá (7A y 7B), Chiquilá 2 (8A y 8BH).....	32
Figura 18. Altura promedio de los individuos de manglar en la subunidad 10x10 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.	33
Figura 19. DAP promedio de los individuos de manglar en la subunidad 10x10 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.....	34
Figura 20. Altura promedio de los individuos de manglar en la subunidad 4x4 en el sitio Norte de la Península de Yucatán en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.....	35
Figura 21. DAP promedio de los individuos de manglar en las subunidades 4x4 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.	36
Figura 22. Altura promedio de las plántulas de manglar en las subunidades 1x1 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.....	37
Figura 23. Salinidad intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	39
Figura 24. Temperatura intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	40
Figura 25. pH intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 9 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM en todos los muestreos.	41
Figura 26. Potencial redox intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.....	42
Figura 27. Relación del pH – Potencial Redox de 7 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de lluvias en el sitio Norte de la Península de Yucatán.....	43

Figura 28. Relación del pH – Potencial Redox de 7 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de secas en el sitio Norte de la Península de Yucatán.	44
Figura 29. Relación del pH – Potencial Redox de 6 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de nortes en el sitio Norte de la Península de Yucatán.....	45
Figura 30. Nivel de inundación en 6 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán: Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C), San Felipe (D), Río Lagartos (E) y El Cuyo (F) durante el periodo de lluvias y secas (octubre 2023 a marzo 2024). La línea roja representa el valor 0 (nivel del suelo). La línea punteada amarilla representa la fecha del paso del huracán Milton.....	47
Figura 31. Suelo colectado en las UM de manglar: Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C) y San Felipe (D) en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	51
Figura 32. Suelo colectado en las UM de manglar: Río Lagartos (A), El Cuyo (B), Chiquilá (C) y Chiquilá 2 (D) en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.	52
Figura 33. Peso húmedo promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.....	53
Figura 34. Peso seco promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. La línea roja representa el promedio total....	53
Figura 35. Porcentaje de humedad promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	54
Figura 36. Densidad aparente promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	55
Figura 37. Porcentaje de carbono total promedio en suelo correspondiente en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.....	56
Figura 38. Porcentaje de carbono orgánico promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	57
Figura 39. Porcentaje de carbono inorgánico promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	57
Figura 40. Porcentaje de nitrógeno total promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Avance de actividades comprometidas en el proyecto “Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del Sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)”.	2
Tabla 2. Tipos de clima presentes en la zona costera del estado de Yucatán (CENAPRED, 2013).	10
Tabla 3. Ubicación de una coordenada de referencia (centroide o vértice) de las UM para caracterización y muestreo de variables estructurales, hidrológicas y edafológicas de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán (2023-2025). Las UM marcadas con * representan sitios monitoreados previamente en el marco del SMMM.	17
Tabla 4. Variables medidas o información colectada durante las tres campañas de muestreo.	18
Tabla 5. Descripción de las características para el monitoreo de variables estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán.	19
Tabla 6. Descripción de las características para el monitoreo de variables extracción y mortalidad de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán.	20
Tabla 7. Descripción de las especies de manglar registradas en la UM y subunidades en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las UM marcadas con * representan sitios monitoreados previamente en el marco del SMMM.	25
Tabla 8. Promedio de nivel de inundación en centímetros por cada UM durante todo el proyecto. Mediciones: media, inundación mínima (mín) e inundación máxima (máx).	40
Tabla 9. Descripción de las características edafológicas in situ del suelo de manglar del sitio Norte de la Península de Yucatán.	41

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1. Objetivo general del proyecto

Dar seguimiento a variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de los manglares en 8 unidades de muestreo (UM) permanentes en el Sitio Norte de la Península de Yucatán (NPY), teniendo en cuenta los antecedentes metodológicos de la caracterización y monitoreo de los proyectos FN009 y KN003, financiados por Fideicomiso Fondo para la Biodiversidad y las adecuaciones correspondientes dentro del marco de colaboración con WWF. Esto se llevará a cabo considerando criterios para comprender la función, resistencia y vulnerabilidad de estos ecosistemas y las comunidades humanas asociadas ante el cambio climático.

2. Objetivos específicos del proyecto

- I. Caracterización y monitoreo de variables hidrológicas de los manglares en 8 UM permanentes en la costa Norte de la Península de Yucatán.
- II. Caracterización y monitoreo de variables edafológicas, incluyendo contenido de carbono orgánico, de los manglares en 8 UM permanentes en la costa Norte de la Península de Yucatán.
- III. Caracterización y monitoreo de variables estructurales de los manglares en 8 UM permanentes en la costa Norte de la Península de Yucatán.

3. Avances del proyecto

Durante el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo mediciones *in situ* de variables estructurales, variables fisicoquímicas y caracterización de suelos. Las fechas de muestreo de las unidades (23 al 27 de octubre de 2023, 11 al 16 de marzo de 2024 y 17 al 21 de febrero de 2025) corresponden a la temporada de lluvias, secas y nortes, respectivamente. Durante la primera salida, además de las mediciones *in situ*, se realizó la colecta de 3 núcleos de suelo en cada uno de los sitios, los cuales fueron procesados en el Laboratorio de Producción Primaria del Cinvestav Mérida. Se capturaron los datos obtenidos de variables fisicoquímicas (salinidad, temperatura, pH y potencial redox) y de las variables estructurales (especie, altura, DAP, altura del fuste limpio, entre otros) para su análisis. Los resultados de las características estructurales de la vegetación, parámetros fisicoquímicos del agua intersticial, características del suelo e hidrología (hidroperiodo) de las tres temporadas en las 8 UM se reportan en el presente informe final.

4. Logro de objetivos

Los indicadores de éxito para las actividades de la primera, segunda y tercera etapa indican que se cumplió con los objetivos establecidos (Tabla 1). Los 8 medidores automáticos se instalaron en la primera etapa, pero en la segunda etapa un equipo dejó de funcionar. Por este motivo durante la segunda y tercera etapa del proyecto se realizó la descarga de datos de los 7 medidores automáticos del nivel de agua y temperatura de la marca HOB0 (100% de avance). Adicionalmente, se realizaron los 3 muestreos de campo para el registro de datos de las variables estructurales y la medición de los parámetros fisicoquímicos de agua intersticial en las 8 UM, obteniendo un 100% de avance con respecto al total del proyecto. Se completó la captura y análisis de datos correspondientes. El análisis de muestras de suelo en el laboratorio se realizó en un 100%. Los resultados obtenidos de todos los componentes se reportan en este informe final.

Tabla 1. Avance de actividades comprometidas en el proyecto “Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del Sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)”.

Actividad	1er. semestre	2do. semestre	3er. semestre	Avance Total
Adquisición de equipo	0%	0%	0%	0%
Salidas de campo	33%	33%	34%	100%
Instalación de equipo de medición continua	100%	100%	100%	100%
Descarga de información del equipo de medición continua	NA	50%	50%	100%
Registro de variables fisicoquímicas del agua intersticial	100%	100%	100%	100%
Registro de variables estructurales	33%	33%	33%	100%
Colecta de muestras de suelo	100%	100%	100%	100%
Análisis de muestras en laboratorio	30%	40%	30%	100%
Captura y procesamiento de datos	33%	33%	34%	100%

Los colores indican el grado de avance de las actividades comprometidas para cada semestre del proyecto: verde=se cumplió en su totalidad, amarillo = se cumplió parcialmente, rojo = no se cumplió.

5. Modificaciones en las etapas

Debido a temas administrativos (retrasos en la apertura de cuenta bancaria para la disposición y manejo del recurso destinado para este proyecto), los muestreos para la primera etapa del proyecto, que originalmente se llevarían a cabo durante la temporada de secas del 2023, fueron desplazados a la temporada de lluvias del mismo año, teniendo que ajustar los siguientes muestreos a la variabilidad climática de la región, es decir, el segundo muestreo se llevó a cabo durante la temporada de secas del 2024 y el tercer muestreo se realizó en la

temporada de nortes de 2025. Por otro lado, considerando que las coordenadas de las UM habían sido colocadas sin visita de campo y que estaban sujetas a cambio, excepto aquellas que han sido establecidas previamente para su monitoreo dentro del Sistema de Monitoreo de Manglares de México (SMMM) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), durante el primer muestreo se reubicaron los sitios de Chiquilá, Chiquilá 2, San Felipe, Dzilam WWF y Dzilam Las Bocas. Para esta reubicación se consideraron condiciones similares de manglar, y la seguridad del equipo de medición instalado (medidores automáticos), y en algunos casos, la accesibilidad al sitio. Las nuevas coordenadas son proporcionadas en la tabla 3 del presente informe final. Las modificaciones descritas corresponden a la primera etapa del proyecto y fueron aprobadas en su momento por CONABIO, excepto las que corresponden al sitio Dzilam_WWF. Éstas fueron consultadas con el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés). Como resultado de la consulta y debido a que este sitio tiene como objetivo el monitoreo de procesos de restauración, la UM fue reubicada dentro del polígono de interés durante la salida de campo de la temporada de nortes de 2025, la cual se nombró Dzilam WWF 2.

En la segunda etapa no hubo modificaciones con respecto a lo establecido. Sin embargo, la colecta de datos de los medidores automáticos del nivel de agua y temperatura de la marca HOBO se llevó a cabo en 7 de las 8 UM. Esto debido a que el equipo correspondiente a la UM Chiquilá 2 fue vandalizado y extraído del sitio de monitoreo. En los resultados parciales mostrados en el segundo informe se reportan datos de 6 UM (Dzilam Pueblo, Dzilam WWF, Dzilam Las Bocas, San Felipe, Río Lagartos y El Cuyo) debido a que el medidor de la UM Chiquilá registró datos anormales, por ejemplo, se registraron niveles de inundación de -980 cm, probablemente porque el dispositivo fue intervenido. Para la tercera etapa y final, además de los medidores vandalizados con anterioridad, el equipo HOBO en la UM de San Felipe fue vandalizado, pero se recuperó la información. En la UM de Dzilam WWF 2 el equipo dejó de funcionar totalmente, por lo que no se reportan datos. En resumen, durante la implementación del proyecto tres de los medidores automáticos (San Felipe, Chiquilá y Dzilam WWF 2) dejaron de funcionar correctamente y fueron retirados para su revisión y mantenimiento por un servicio profesional, mientras que uno de ellos desapareció (Chiquilá 2).

5.1 Cambios en las coordenadas originales

En la siguiente tabla se da respuesta a cada uno de los comentarios hechos por parte de CONABIO. Las 3 parcelas del proyecto previo KN003 comparten la misma justificación.

Tabla 2. Justificación del cambio de coordenadas de las UM del proyecto “Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del Sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)”.

Comentario CONABIO	Justificación
Parcelas KN003	
UM Dzilam Pueblo. Sólo coincide un vértice. No hay sobreposición entre las parcelas KN003 y UM001. Revisar y en su caso corregir las coordenadas.	Para realizar la nueva delimitación de las UM de 20 x 20 m de las parcelas KN003, se consideraron las coordenadas correspondientes a uno de los vértices derivadas del proyecto KN003. La ubicación del primer vértice varía con respecto a la ubicación original, debido a la precisión del GPS por las condiciones del clima y la vegetación.
Río Lagartos Río Lagartos. Las coordenadas tienen un desplazamiento máximo de 17 m respecto a la UM KN003. Revisar y en su caso corregir las coordenadas.	El trazo y ubicación de la UM 20x20 se realizó con base a las evidencias que se encontraron en el sitio, como árboles marcados con aerosol y/o placas, con el objetivo de remedir los individuos marcados. No se omite mencionar que, después de 5 años del último monitoreo las condiciones del sitio cambiaron, dificultando la ubicación original de la parcela. Para facilitar en un futuro el remuestreo o monitoreo de al menos la misma parcela, el trazo se realizó con un longímetro y una brújula para trazar los 20 m y con la ayuda de este último instrumento uno de sus lados se orientó hacia el norte, excepto el sitio de Dzilam Pueblo, que se orientó al NE con la finalidad de incluir y contabilizar individuos marcados. Con base en lo anterior, se mantienen las coordenadas proporcionadas en este informe, las cuales corresponden a las áreas muestreadas en el terreno durante este proyecto, pero se sugiere no modificar las coordenadas del proyecto KN003.
Río Lagartos El Cuyo. Las coordenadas tienen un desplazamiento máximo de 16 m respecto a la UM KN003. Revisar y en su caso corregir las coordenadas.	
Parcelas nuevas UM001	
UM Dzilam WWF. La distancia de la línea punteada es de 136 m. La localización original se fundamentó en que se trata de un sitio de restauración de interés para WWF. Sin embargo, se observan densidades arbóreas diferentes entre la parcela propuesta y la registrada en campo.	Durante el primer muestreo, la UM se movió a un sitio con cobertura arbórea, considerando que los sitios CONABIO corresponden a sitios de manglar sin perturbación evidente (conservado) con el fin del monitoreo de los cambios en la estructura de la vegetación. Adicionalmente, se buscó facilitar el acceso al sitio para posteriores monitoreos. Sin embargo, para poder generar información en un sitio de restauración, esta parcela fue reubicada hacia dentro del polígono de restauración establecido para el tema, en otro proyecto en colaboración Cinvestav-WWF.

<p>UM Dzilam Las Bocas. La distancia de la línea punteada es de 11.8 km.</p> <p>Originalmente se propuso en la barra y se movió fuera de ésta.</p>	<p>La UM que originalmente se propuso se nombró Las Bocas, precisamente porque se ubicaría en el sitio denominado con el mismo nombre. Sin embargo, durante la salida de campo se tomó la decisión de mover la UM al sitio que originalmente se le conoce como “Las Bocas”. Una vez en campo se intentó trazar la parcela de muestreo, sin embargo, dadas las dimensiones no fue posible. Por ello, la UM se ubicó en una franja expuesta a la constante salida y entrada de agua y a la influencia de las mareas.</p>
<p>Río Lagartos San Felipe. La distancia de la línea punteada es de 133 m. Se movió de un lado al otro del camino. Parece no haber inconveniente en su reubicación, sin embargo, es necesario detallar en el documento.</p>	<p>Se consideró ubicar la UM en un sitio seguro para futuros monitoreos, así como salvaguardar el equipo instalado (Hobo). Además, el sitio que originalmente se propuso es propiedad privada y con mayor tránsito de personas, lo cual representa un riesgo para la permanencia del equipo.</p>
<p>Yum Balam Chiquilá. La distancia de la línea punteada es de 63 m. No se observa ningún inconveniente en cambiar la ubicación.</p> <p>Yum Balam Chiquilá 2. La distancia entre la UM en el convenio y la UM registrada en campo es de 1.8 km.</p>	<p>El sitio que originalmente se propuso es propiedad privada y con mayor tránsito de personas y exposición del equipo instalado (Hobo).</p> <p>La reubicación de la nueva UM principalmente se realizó con el fin de facilitar la accesibilidad al sitio de muestreo, así como evitar el uso de embarcaciones para monitoreos a futuro.</p>
<p>La distancia entre Chiquilá y Chiquilá 2 es de 798 m y se necesita una mayor distribución espacial o de tipología de suelo o de manglar para la estimación de carbono. Justificar la cercanía entre ellas.</p> <p>La UM propuesta al inicio, aparentemente tiene una densidad y textura de manglar diferente respecto a la UM registrada en campo.</p>	<p>Por ello, se eligió un sitio cercano al poblado de Chiquilá para hacer eficiente el uso de los recursos y facilitar la accesibilidad.</p> <p>Esta selección se realizó considerando que el tipo de manglar es diferente al de sitio Chiquilá 1, con respecto al estrato, estructura, densidad y cobertura de la vegetación.</p>

6. Productos obtenidos en el proyecto

- Tablas de datos de variables ambientales (físicoquímicos) del primer, segundo y tercer muestreo correspondiente a la época de lluvias, secas y nortes de las 8 UM de manglares de la costa Norte de la Península de Yucatán.
- Tablas de datos con datos de hidroperiodo de octubre de 2023 a febrero de 2025 correspondientes a la época de lluvias, secas y nortes en 5 UM de manglares de la costa Norte de la Península de Yucatán.

- Tablas de datos de variables biológicas (estructura) del primer, segundo y tercer muestreo correspondiente a la época de lluvias, secas y nortes de las 8 UM de manglares de la costa Norte de la Península de Yucatán.
- Tablas de datos de variables de la caracterización y nutrientes (carbono y nitrógeno) del suelo de las 8 UM de manglares de la costa Norte de la Península de Yucatán.
- Archivo fotográfico de las actividades de caracterización y muestreo correspondiente a la época de lluvias, secas y nortes en las 8 UM de manglar de la península de Yucatán y fuera de ellas.
- Informe final que incluye resultados de las fases de caracterización inicial (octubre 2023) y de seguimiento (marzo 2024 y febrero 2025) de las 8 UM de manglares de la Costa Norte de la Península de Yucatán.

I. INTRODUCCIÓN

Los manglares son un ecosistema esencial para el desarrollo y funcionamiento de las zonas costeras. Este ecosistema está dominado por árboles tolerantes a la inundación y a la salinidad, crecen en ambientes caracterizados por ser fuertemente influenciados por mareas, descargas subterráneas y superficiales (ríos), por lo que sus suelos se encuentran permanentemente húmedos e inundados por largos periodos de tiempo (Cinco-Castro y Herrera-Silveira, 2020). Su desarrollo está en función de factores climáticos, edafológicos, hidrológicos y geomorfológicos locales y regionales (Alongi, 2009; Valderrama-Landeros *et al.*, 2017) que tienen como resultado diferentes tipos ecológicos de manglar y diferencias en la provisión de servicios ecosistémicos (beneficios obtenidos de forma directa o indirecta del ecosistema) tanto a escala local como regional (Menéndez *et al.*, 2020). Estos beneficios incluyen: i) protección de la línea de costa ante fenómenos hidrometeorológicos como nortes, huracanes y el incremento del nivel medio del mar (Scavia *et al.*, 2002); ii) filtración y mantenimiento de la calidad de agua, ya que funcionan como amortiguadores de elementos contaminantes (Twilley y Rivera-Monroy, 2005; Molina *et al.*, 2019); iii) hábitat de amplia diversidad de especies acuáticas, terrestres y aves de importancia turística, comercial y de especies en peligro de extinción (Lee *et al.*, 2014); iv) estabiliza el suelo, evitando la erosión de playas (Beers *et al.*, 2019); v) sumideros de carbono, ya que juegan un papel importante como almacén y transformador de carbono en regiones costeras tropicales y subtropicales (Bouillon *et al.*, 2008); vi) son de vital importancia para las cadenas tróficas y, por tanto, sostén de pesquerías artesanales e industriales (Beers *et al.*, 2019).

La interacción de los contrastes ambientales sobre los procesos ecológicos incluye gradientes reguladores, gradientes de recursos e hidroperíodo sobre el crecimiento del manglar (Twilley y Rivera-Monroy, 2005; Twilley *et al.*, 2017). El hidroperíodo (tiempo, frecuencia y nivel de inundación) es una característica primordial en el funcionamiento de los manglares; determina el tipo, crecimiento, reproducción y desarrollo de la vegetación (Twilley y Rivera-Monroy, 2005).

La Península de Yucatán (PY) presenta el 60% (544,169 ha) de la extensión total de manglar de México (905,086 ha). Quintana Roo es el estado con mayor extensión de manglares a nivel nacional (247,017 ha). Durante el último informe cartográfico de la extensión de manglares en México realizado por Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), se rectificó la cobertura de manglar en la zona de ANP de Sian Ka'an y Uaymil, que en años anteriores había sido clasificada como "otros humedales" (Velázquez-Salazar *et al.*, 2021).

En México se estima que en el periodo 2015 al 2020 la superficie de pérdida de manglar estimada a nivel nacional es de 37 724 ha, siendo los estados con mayor pérdida: Sinaloa, con 5 258 ha (6.4%); Baja California Sur, con 1 068 ha (4%); y Nayarit, con 247 ha (0.4%). A pesar de que la PY es la región con mayor extensión de manglar con 544 169 ha (60% a nivel nacional), también es de las regiones más amenazadas, con 940 ha de manglar perturbado (Valderrama *et al.*, 2014; Velázquez-Salazar *et al.*, 2020). Entre los principales impactos se encuentran las actividades turísticas y portuarias (apertura de puertos de abrigo) sin planeación adecuada, así como la privatización de terrenos en la línea de costa (LANRESC, 2020). Adicionalmente la construcción de conjuntos habitacionales, vialidades, rellenos y dragado, entre otros (Herrera-Silveira *et al.*, 2022a) (Fig. 1). Aunado a esto, las zonas de manglar se han visto impactadas por eventos hidrometeorológicos como huracanes, sequías y nortes (Herrera-Silveira *et al.*, 2019; 2022). Dichos impactos han propiciado la modificación de los patrones hidrológicos de estos ecosistemas, impactando negativamente la dinámica ecológica de distribución y composición de especies vegetales y animales. El resultado de estos cambios es la degradación, muerte y pérdida del manglar y los servicios ecosistémicos que provee.

Con el fin de la recuperación de las condiciones ecológicas, estructurales y funcionales de la vegetación y el suelo y lograr su auto sostenibilidad, resiliencia y provisión de servicios ecosistémicos, en la PY se han implementado acciones de rehabilitación y/o restauración en zonas de manglar perturbadas. Estas acciones incluyen, por ejemplo, la rehabilitación hidrológica tomando en cuenta las condiciones locales y regionales de cada sitio (Teutli-Hernández *et al.*, 2020).



Figura 1. Impactos antrópicos (construcción de carreteras) en zonas de manglar en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Unidad Mérida.

II. ANTECEDENTES

En la actualidad, la velocidad en la que se pierden los bosques de manglar es mayor que la velocidad en la que se genera información ecológica para promover su conservación y recuperación. Por ello, los estudios sobre el ecosistema de manglar responden a la necesidad de implementar estrategias de conservación y manejo de los ecosistemas frente a los efectos derivados del cambio climático y la presión ejercida por el desarrollo costero (Rivera-Monroy *et al.*, 2004; Lovelock *et al.*, 2022; Sievers *et al.*, 2023). A partir del reconocimiento de la importancia que tienen los manglares en la reducción de la vulnerabilidad ante efectos derivados del cambio climático, en la PY se han emprendido esfuerzos relacionados con la conservación, restauración y manejo de manglares con financiamientos federales y estatales.

Los proyectos FN009 y KN003 financiados por el Fideicomiso Fondo para la Biodiversidad (FFB), así como otros proyectos de investigación desarrollados en la región, representan los cimientos para el establecimiento de la línea base de la condición de los manglares y han dado pauta al establecimiento de sistemas de monitoreo de indicadores de la salud de estos ecosistemas. En este sentido, la toma de decisiones sobre la conservación o mejoramiento del estado de salud de los manglares de la PY debe estar enfocada en la información técnico-científica para cada sitio generada con anterioridad y contempla esta información a diferentes escalas espaciotemporales. Por esta razón, se destaca la importancia del proyecto de caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar en los sitios del norte de la Península de Yucatán como insumo para complementar la información preventiva generada. Esto representa una selección adecuada y concertada entre grupos de investigación regionales de indicadores ecológicos a diferentes escalas espaciales y temporales que permita un monitoreo efectivo. Con este proyecto se pretende dar continuidad al monitoreo de los sitios de interés derivados de proyectos anteriores, e incluir nuevos sitios que, por su cercanía con las comunidades humanas, representan una oportunidad para la implementación de medidas de adaptación al cambio climático para las instituciones y organizaciones responsables en el tema, sobre todo si se toma en cuenta el componente subterráneo de los ecosistemas.

La caracterización y monitoreo se plantea en un marco dinámico donde la generación de nuevo conocimiento servirá de referencia a grupos organizados e instituciones en la implementación de proyectos, programas y políticas de conservación, rehabilitación, restauración y uso sustentable de los manglares. Asimismo, el monitoreo servirá como un identificador de la problemática que tiene cada sitio, la cual debe abordarse desde una perspectiva ecológica para

generar información crítica para el manejo sustentable de los bosques de manglar, contribuyendo así al conocimiento nacional e internacional de estos ecosistemas.

Es necesario el esfuerzo interinstitucional para formar redes de monitoreo a largo plazo, que contemplen la participación de diferentes instituciones y se comprometan a dar seguimiento temporal a las mediciones de variables ambientales y ecológicas de estos ecosistemas en un contexto geográfico amplio, abarcando áreas representativas del litoral de la República Mexicana. Esta red de monitoreo regional debe integrarse a otras redes nacionales e internacionales para compartir información crítica acerca del funcionamiento de los ecosistemas y para modelar sus respuestas a cambios naturales e inducidos por las actividades humanas.

En la Península de Yucatán se han generado este tipo de esfuerzos, donde trabajan de la mano, gobierno, instituciones, organizaciones y comunidades en pro de la restauración de los manglares. Entre los que destaca el Cinvestav – Unidad Mérida, como institución pública mexicana dedicada al desarrollo de la ciencia, tecnología y educación con excelencia académica, que en colaboración con otras instituciones como ENES-UNAM Mérida y Programa Mexicano del Carbono A. C. (PMC) tienen amplia experiencia en los ecosistemas costeros de la PY.

En términos de investigación, Cinvestav – Unidad Mérida y PMC coordinan la síntesis de carbono azul en manglares de México, considerando los cinco compartimentos sugeridos por el IPCC, lo que los ha posicionado como pioneros en este tema a diferentes escalas. Se han realizado asesorías científicas relacionadas con las estimaciones de almacenes y flujos de carbono en manglares para WWF, INECC, PNUD, SEMARNAT, entre otras instituciones, destacando la importancia que tiene la generación del conocimiento a nivel local (datos nivel TIER 3) para reducir la incertidumbre en las estimaciones. Estas interacciones y las necesidades específicas de cada proyecto, han llevado a la institución a realizar acuerdos de colaboración con dependencias estatales y nacionales como la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Yucatán (SDS), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), así como con ONG locales y regionales, para trabajar de manera coordinada en temas de conservación y manejo sustentable de los recursos naturales, investigación, capacitación, protección, restauración y educación ambiental.

III. JUSTIFICACIÓN

Los manglares, por poseer características particulares como vegetación con adaptaciones a condiciones de inundación y salinidad, proveen una gran cantidad de servicios ambientales (Yañez-Arancibia *et al.*, 1998; Valiela *et al.*, 2001; Alongi, 2008; Gilman *et al.*, 2008).

Específicamente en la costa de la PY, las actividades económicas dependen de los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proveen. Sin embargo, también se reciben amenazas naturales y antrópicas (Batllori *et al.*, 1999; Euan-Ávila y Witter, 2002; Herrera-Silveira y Teutli-Hernández, 2014; CONAGUA, 2020; Teutli-Hernández *et al.*, 2020) que impactan el ecosistema y, por lo tanto, la provisión de servicios ecosistémicos.

En la actualidad, el problema radica en que los cambios provocados por el cambio climático son más rápidos que otros impactos y que la capacidad de recuperación del ecosistema. En gran medida, esta aceleración se ha derivado de las actividades humanas, sobre todo de aquellas relacionadas con las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y cambio de uso de suelo. Si bien los manglares son pieza clave en el combate del cambio climático, los estudios previos relacionados con estos ecosistemas están enfocados en la caracterización y monitoreo ecológico de variables importantes para conocer y tomar decisiones acertadas con respecto a su conservación, restauración y manejo.

Actualmente, los estudios basados en la ecología de manglares deben ir más allá de los temas abordados con anterioridad. Estos deben orientar la información generada en propuestas que permitan desarrollar nuevas estrategias de conservación y restauración enfocadas en la priorización de actividades encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad para hacer frente al cambio climático y a la presión que tienen estos ecosistemas por el desarrollo costero. En este sentido, el tema de mayor importancia es la dinámica del carbono en los manglares y los co-beneficios que de él se derivan.

Por esta razón, en este proyecto, además de continuar registrando información de base prioritaria en los manglares (estructura vegetal, hidrología y caracterización de suelo), se pretende establecer la línea base de los almacenes de carbono subterráneo mediante la aplicación de una metodología estandarizada en ubicaciones que tienen un seguimiento previo (Dzilam, cerca de la localidad y Río Lagartos) y en nuevas ubicaciones con diferentes características, pero con relación estrecha con las comunidades (Dzilam WWF sitio de manglar degradado, Las Bocas de Dzilam, San Felipe, Yum Balam). Esto permitirá llevar la información generada en campo y laboratorio a una nueva escala espacial y servirá como referencia a instituciones y grupos organizados para la implementación de proyectos, programas y políticas relacionadas con la interacción con los manglares y su capacidad para remover carbono de la atmósfera y almacenarlo en sus componentes aéreos y subterráneos.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la costa Norte de la Península de Yucatán (NPY), e incluye áreas naturales protegidas a nivel federal y estatal, desde la Reserva Estatal de Dzilam de Bravo hasta el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Yum Balam (Fig. 2). Los ocho sitios se encuentran distribuidos en esta región geográfica colindando con el Golfo de México, entre el estado de Yucatán y parte de Quintana Roo. En esta región, parcialmente se distribuye un alto porcentaje de manglar (40%) de la PY.

En la zona costera del estado de Yucatán dominan los climas secos muy cálidos (BS_0), semisecos muy cálidos (BS_1) y cálido subhúmedo (Aw_1 y Aw_0). En el área donde se localizan las UM, el clima predominante es el semiseco muy cálido (CENAPRED, 2013).

Tabla 2. Tipos de clima presentes en la zona costera del estado de Yucatán (CENAPRED, 2013).

Unidad climática	Descripción
Seco muy cálido $BS_0(h')w(x')$	Es el más seco de los semiáridos, muy cálido con lluvias en verano y un mayor porcentaje de lluvia invernal.
Seco muy cálido $BS_1(h')w(x')$	Es el menos seco de los semiáridos, muy cálido con un porcentaje de lluvia invernal mayor.
Seco muy cálido $BS_1(h')x'$	Es el menos seco de los semiáridos, muy cálido, con lluvias escasas todo el año.
Cálido subhúmedo Aw_0	Cálido el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano.
Cálido subhúmedo $Aw_0(x')$	Cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, así como alto porcentaje de lluvia invernal.
Cálido subhúmedo $Aw_1(x')$	Cálido, subhúmedo, con lluvias en verano, pero alto porcentaje de lluvia invernal.

La temperatura media anual oscila de 25 a 26°C con una media mínima de 20°C y máxima de 31°C. Sin embargo, se han registrado temperaturas > 31°C durante los meses de febrero a octubre y valores < 20°C de noviembre a enero (SMN, 2022).

En la franja costera de Yucatán, la precipitación anual oscila entre 500 y 1,000 mm (Posada Vanegas et al., 2013). Mientras que en la reserva de Yum Balam alcanzan los 1,200 mm de precipitación anual. La precipitación de la zona costera presenta una marcada estacionalidad, dando origen a tres temporadas climáticas: secas, lluvias y nortes. La temporada de secas se presenta de febrero a mayo, en donde la precipitación media mensual es de 30 mm; la temporada de lluvias va de junio a octubre y la precipitación media mensual es de 96 mm; y la temporada de nortes se presenta de noviembre a enero con una precipitación media mensual de

37 mm (SMN, 2022). Esta época se caracteriza por vientos que pueden llegar a ver de los 90 km/hr (Ortiz-Pérez y de la Lanza Espino, 2006).

La zona costera de la PY está delimitada por unidades fisiográficas y geomorfológicas representadas por un cierto grado de homogeneidad morfogenética y ambiental (Zinck, 1988; Bautista et al., 2005; Bautista et al., 2011, Rovai et al., 2018). Se localiza en el borde externo continental, en una transición entre el continente y el océano. Se forma de los sedimentos continentales y marinos, con impactos de las olas, mareas y la deriva litoral (Ihl et al., 2006). Esta zona tiene una formación geológica kárstica, donde las aguas subterráneas actúan como un conector transversal entre los ecosistemas distribuidos a lo largo del continuo tierra-mar (Morales-Ojeda, 2018).

La zona costera consta de diferentes geoformas. Las diferentes unidades geomorfológicas se basan en el relieve (alto relieve, transición y bajo relieve), la morfología (elevaciones, elevaciones aisladas, llanuras costeras e islas) y otros procesos ambientales (Frausto, 2008). La conjugación de estos factores da como resultado las geoformas como: islas de barrera, lagunas costeras, ciénagas, petenes y otros ecosistemas de inundación (selva inundable, sabanas, tulares, pastizales, entre otros) (Frausto, 2008).

Las islas de barrera se ubican cerca de la costa con alturas muy bajas sobre el nivel del mar (hasta 15 m), abarcando varios kilómetros de longitud. Aparecen paralelas a la costa, separando el mar de las lagunas costeras y ciénega. Representan un área de alto depósito de sedimentos arenosos, siendo importante para el desarrollo de la vegetación de duna costera; cumplen con la función de barrera rompe vientos y protegen a los humedales de los embates marinos y la erosión. En la costa de Yucatán, la mayor porción de la isla de barrera se ubica entre San Felipe-El Cuyo con 70 km y en menor proporción en Dzilam de Bravo con 23 km. Sin embargo, han sido afectados por daños antrópicos.

Las lagunas costeras son depresiones paralelas a la costa, separadas del mar por una isla de barrera, son generalmente ambientes salobres por la influencia que tienen de la mezcla de agua dulce y salada. La deposición de sedimentos a través de la acción de las olas y las corrientes costeras contribuye a su formación (Lankford, 1977). Las lagunas costeras son áreas exportadoras de materia orgánica, por lo que inciden en la productividad de la plataforma costera (Herrera-Silveira *et al.*, 2002). La pérdida de conectividad hidrológica (obstrucción de flujos de agua y pérdida de manantiales) promueve procesos de sedimentación, inhibe la capacidad de transporte de nutrientes y puede finalmente llevar a la hipersalinización y/o desecación de estos ambientes (Herrera-Silveira *et al.*, 1998; Herrera-Silveira, 2006). En el área de estudio se ubican dos lagunas costeras importantes: Laguna Bocas de Dzilam y Laguna de Río Lagartos.

El clima, la hidrología y la geomorfología son las variables que interactúan entre sí e influyen en la distribución y características estructurales de los manglares. En la PY esta interacción es responsable en gran parte en el caso de Yucatán, de las diferencias de los tipos de manglar estado de conservación y sensibilidad a los cambios en la precipitación a escala regional. Las 8 UM se ubican a lo largo de la Costa Norte de la Península de Yucatán, a continuación, se describe cada una de las localidades.

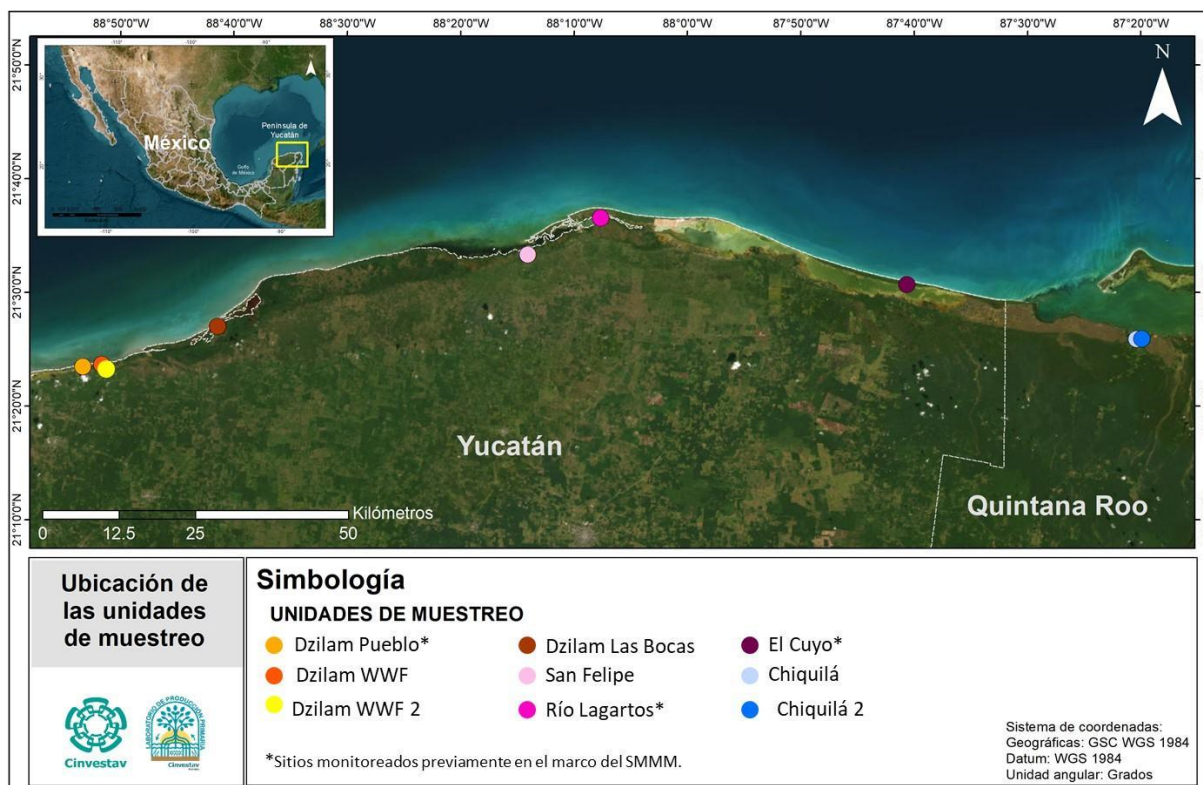


Figura 2. Ubicación geográfica de las UM para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

1. Dzilam de Bravo

Se localiza en el área central de la zona costera del estado de Yucatán, está situado aproximadamente en los 21°24' latitud norte y 88°53' longitud oeste. La superficie del territorio se clasifica como llanura de barrera con piso rocoso, caracterizándose el extremo norte por playas de laderas tendidas. En el margen costero se presentan manantiales de agua subterránea de dimensiones variables (0.25 a 1 m de diámetro).

Dzilam cuenta con una laguna costera permanentemente comunicada con el mar por medio de fracturas de la barra arenosa. En esta zona no se presentan corrientes superficiales de agua dulce permanentes, sin embargo, en época de lluvias se forma corrientes superficiales intermitentes que desembocan en los ecosistemas costeros. Se localiza en el complejo de sistema de corrientes subterráneas del anillo de cenotes del noreste del estado de Yucatán, lo cual significa que esta zona recibe importantes aportes de agua dulce y nutrientes inorgánicos disueltos a manera de manantiales u “ojos de agua”, como se les conoce localmente.

En esta zona se presenta vegetación de duna costera, petenes compuestos por manglar, selvas bajas y medianas, marismas, y comunidad de manglar, la cual ocupa una amplia franja de 2 a 6 km de ancho a lo largo de la costa, presentando las 4 especies registradas para Yucatán: *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus* (Vázquez-Lule *et al.*, 2022). Sin embargo, esta localidad cuenta con zonas impactadas por huracanes, pero con significativos indicios de recuperación.

Dentro de esta localidad se consideraron inicialmente 3 sitios (Dzilam Pueblo, Dzilam WWF y Dzilam Las Bocas). Posteriormente, Dzilam WWF fue sustituida por la UM Dzilam WWF 2. Estos sitios han tenido impactos de eventos hidrometeorológicos e influencia urbana (Fig. 3).

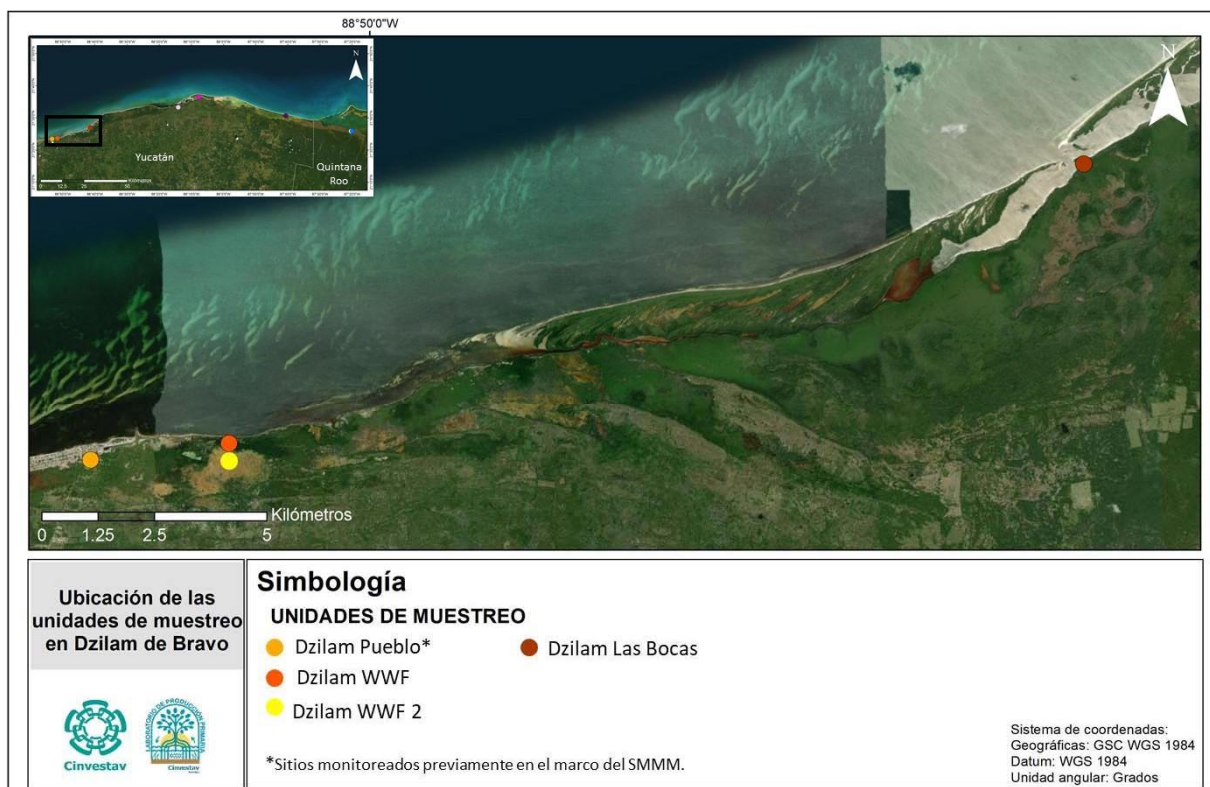


Figura 3. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Dzilam para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

2. Río Lagartos

La Reserva de la Biosfera Ría Lagartos (RBRL) se ubica en el extremo oriente de la franja litoral del estado de Yucatán, en las coordenadas extremas 21° 37' 29.56" y 21° 23' 00.96" latitud norte; 88° 14' 33.35" y 87° 30' 50.67" longitud oeste. El estero Ría Lagartos se orienta de oeste-noroeste a este-sureste. Presenta cuatro conexiones con el mar: dos son naturales (la boca de San Felipe y la boca de Chipepte), mientras que las otras dos son artificiales (el canal de San Felipe y el canal de Río Lagartos). La amplitud de la Ría varía de 25 metros a 3.5 kilómetros y la longitud es de aproximadamente 74 km. El borde norte está formado por una isla de barrera resultado de la sedimentación de arena provocada por la acción marina.

Presenta una gran diversidad de ecosistemas como selva mediana subperennifolia, selva mediana subcaducifolia, selva baja (caducifolia, caducifolia espinosa e inundable), manglares, matorral de dunas costeras, pastizales inundables y pastos marinos (CONANP, 2007), así como formaciones características de las zonas costeras de la Península de Yucatán denominadas petenes. Se distribuyen las 4 especies de manglar *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Conocarpus erectus*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans* (Vázquez-Lule *et al.*, 2022).

La tala de vegetación nativa es una práctica común. La pérdida de cobertura vegetal ha afectado a manglares, duna costera y selvas. En gran medida, las causas han sido el crecimiento urbano de los poblados más grandes (San Felipe y Río Lagartos) y el cambio de uso de suelo de selvas a ganadería, la cual es precedida por la roza, tumba y quema (Carranza y Molina, 2003). Dentro de esta localidad se consideraron 3 UM: San Felipe, Río Lagartos y El Cuyo (Fig.4).



Figura 4. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Río Lagartos para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

3. Yum Balam

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

El paisaje lo dominan ecotonos y ecosistemas con una gran biodiversidad neotropical, que contienen especies endémicas, amenazadas y en peligro de extinción. Se encuentran selvas tropicales medianas, bajas y bajas inundables; bosques de manglar chaparro o mangle rojo; esteros; grandes zonas inundables; lagunas como la de Conil y Chaak Mo Chuc; mares someros que la limitan al norte y al este. Para el año 2003 fue incluida dentro de la lista de humedales de importancia internacional para la Convención de los Humedales, firmada en Ramsar, Irán, en 1971 (RAMSAR) criterio adicional que contribuye a consolidar la idea de que el Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam está imbuida de una relevancia ecológica. Los impactos

directos identificados sobre los ecosistemas en la Reserva de Yum Balam son: deforestación (tala de manglar), transformación del uso del suelo para actividades alternativas, aumento en la tasa de sedimentación y alteraciones directas sobre la flora y la fauna de la región, así como aumento de la actividad turística. Otros impactos que tienen efectos de manera indirecta son cambios en los patrones hidrológicos, construcción de infraestructura carretera, contaminación de los cuerpos de agua, aguas residuales y desechos municipales; el crecimiento de los asentamientos humanos no planificados, etc. (Vázquez-Lule *et al.*, 2009). Dentro de esta localidad se incluyeron dos sitios de muestreo: Chiquilá y Chiquilá 2 (Fig. 5).

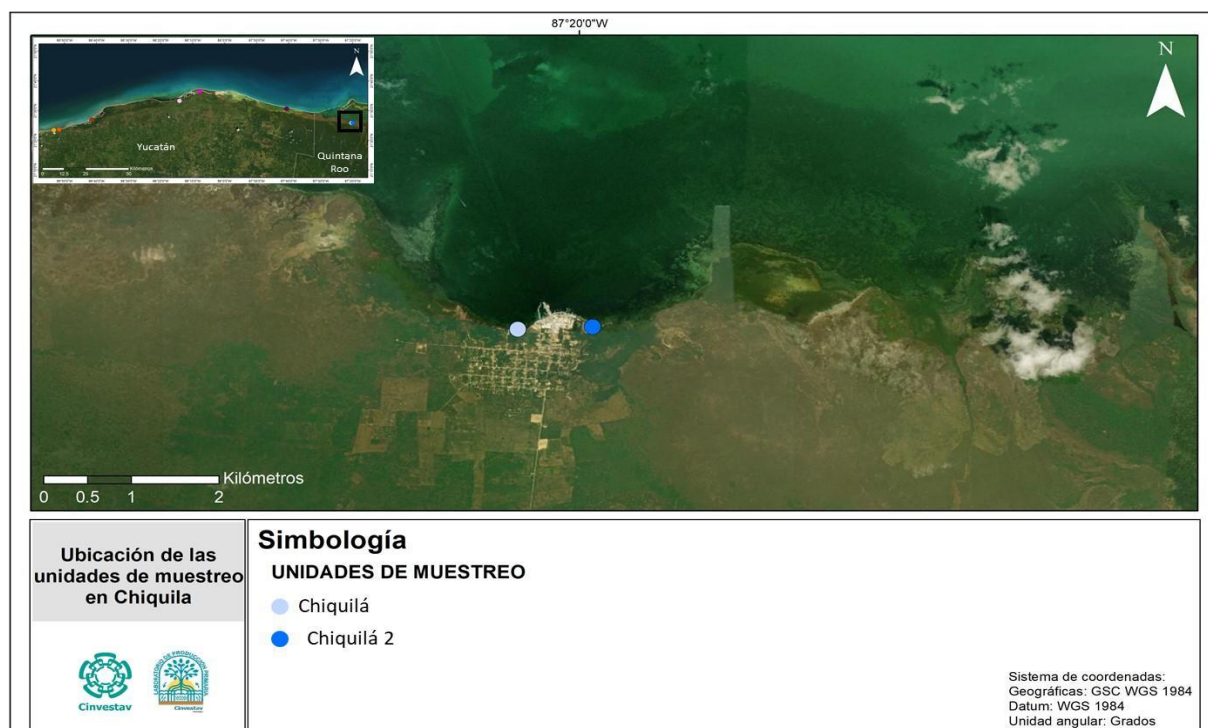


Figura 5. Ubicación geográfica de las UM en la localidad de Yum Balam para caracterización y monitoreo de variables hidrológicas, edafológicas y estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán 2023-2025. Elaboración: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

V. MÉTODOS

1. Diseño de muestreo

Se establecieron ocho unidades de muestreo (UM) para el monitoreo de la estructura, hidrología y edafología del manglar: tres unidades establecidas previamente en el proyecto KN003 (Dzilam Pueblo, Río Lagartos y El Cuyo) y cinco nuevas unidades (Tabla 3).

Tabla 3. Ubicación de una coordenada de referencia (centroide o vértice) de las UM para caracterización y muestreo de variables estructurales, hidrológicas y edafológicas de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán (2023-2025). Las UM marcadas con * representan sitios monitoreados previamente en el marco del SMMM.

Localidad	Sitio_UM	Nombre de la UM en Proyecto FN009	Nombre de la UM en Proyecto KN003	Latitud Y	Longitud X
Dzilam de Bravo	Pueblo*	Pueblo	Pueblo	21.391277	-88.889108
	WWF	NA	NA	21.394575	-88.861445
	WWF 2	NA	NA	21.393051	-88.861988
	Las Bocas	NA	NA	21.450539	-88.690688
Río Lagartos	San Felipe	NA	NA	21.555540	-88.235157
	Río Lagartos*	Río Lagartos	Río Lagartos	21.609530	-88.127684
	El Cuyo*	El Cuyo	El Cuyo	21.511722	-87.677760
Yum Balam	Chiquilá 1	NA	NA	21.431661	-87.339671
	Chiquilá 2	NA	NA	21.431927	-87.331973

Cada UM se estableció con extensión de 400m² (20x20 m), y subunidades de 10x10 m, 4x4 m y 1x1 m para la medición de las variables estructurales, parámetros fisicoquímicos y colecta de núcleos de suelo durante la temporada de lluvias (muestreo 1) (Fig. 6).

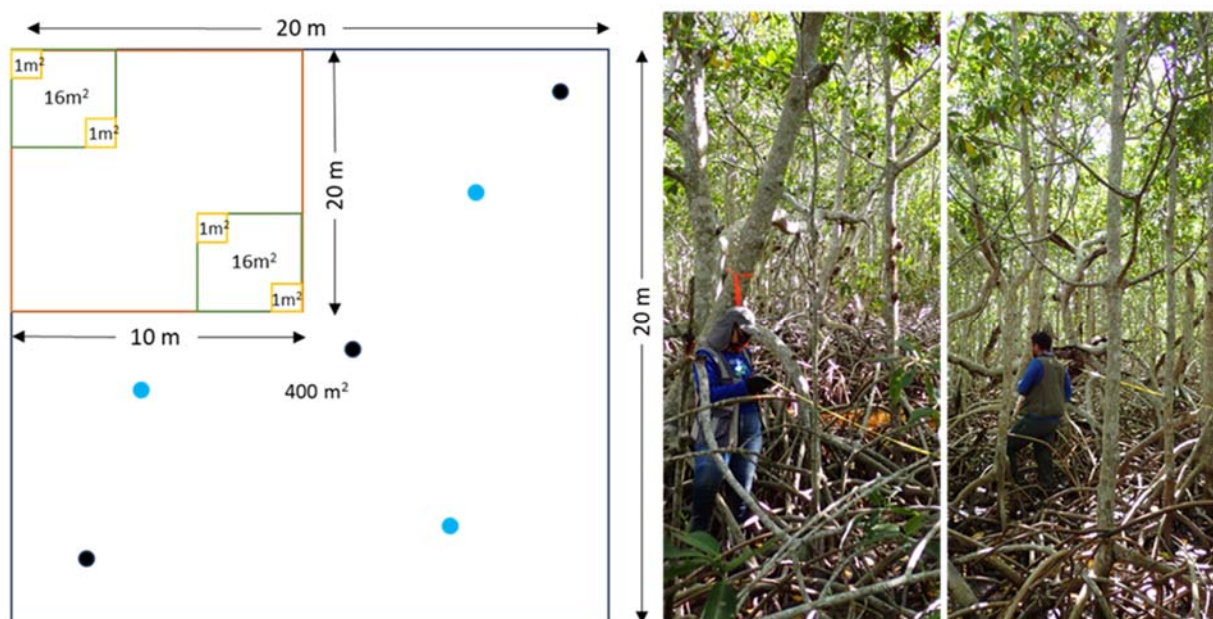


Figura 6. Esquema y delimitación de la unidad y subunidades de muestreo para el monitoreo y caracterización estructural, ambiental y edafológica en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Los puntos **negros** representan la ubicación de la colecta de núcleos de suelo y los puntos **azules** la colecta de muestras para el registro de parámetros de agua intersticial. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

Durante el proyecto se establecieron 3 campañas de muestreo en cada UM abarcando las tres temporadas climáticas: lluvias, secas y nortes. La información de variables registrada en cada muestreo se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Colecta de datos durante las tres campañas de muestreo.

Variable	1er muestro	2do muestreo	3er muestro
Estructurales			
UM 20x20			
UM 10x10			
UM 4x4			
Fisicoquímicos			
Salinidad			
Temperatura			
pH			
Redox			
Hidroperíodo			
Suelo			

Los colores identificadores: azul= se midió/colectó como estaba comprometido, rojo= no se midió/colectó porque no estaba comprometido, verde=colecta de datos adicionales a los comprometidos.

2. Variables estructurales

Durante los muestreos correspondientes a la temporada de lluvias, secas y nortes, en cada UM se registraron *in situ* las variables estructurales de cada individuo de manglar, considerando las especificaciones para las subunidades de muestreo (Tabla 5). Las variables medidas fueron: i) especie, identificación del nombre científico; ii) diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), estandarizado a 1.3 m sobre el nivel del suelo; iii) altura (H, m), distancia vertical entre la base del tronco y punta de la copa del árbol (Fig. 7).

Tabla 5. Descripción de las características para el monitoreo de variables estructurales de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán.

Unidad de muestreo	Características para el monitoreo de variables estructurales
UM 20x20	Especie, altura, DAP, altura de la raíz (<i>R. mangle</i>) y altura de fuste limpio. Todos los individuos mayores o iguales a 2.5 cm de DAP.
Subunidad 10x10	Especie, altura, DAP, altura de la raíz (<i>R. mangle</i>) y altura de fuste limpio. Individuos mayores a 1.3 m de altura, DAP mayor y menor a 2.5 cm.
Subunidad 4x4	Especie, altura, DAP, altura de la raíz (<i>R. mangle</i>) y altura de fuste limpio. Individuos menores a 2.5 cm de DAP y altura mayor a 1.30.
Subunidad 1x1	Especie y altura. Individuos menores a 1.30 m, pero mayores a 30 cm de altura, así como el total de individuos menores a 30 cm de altura.

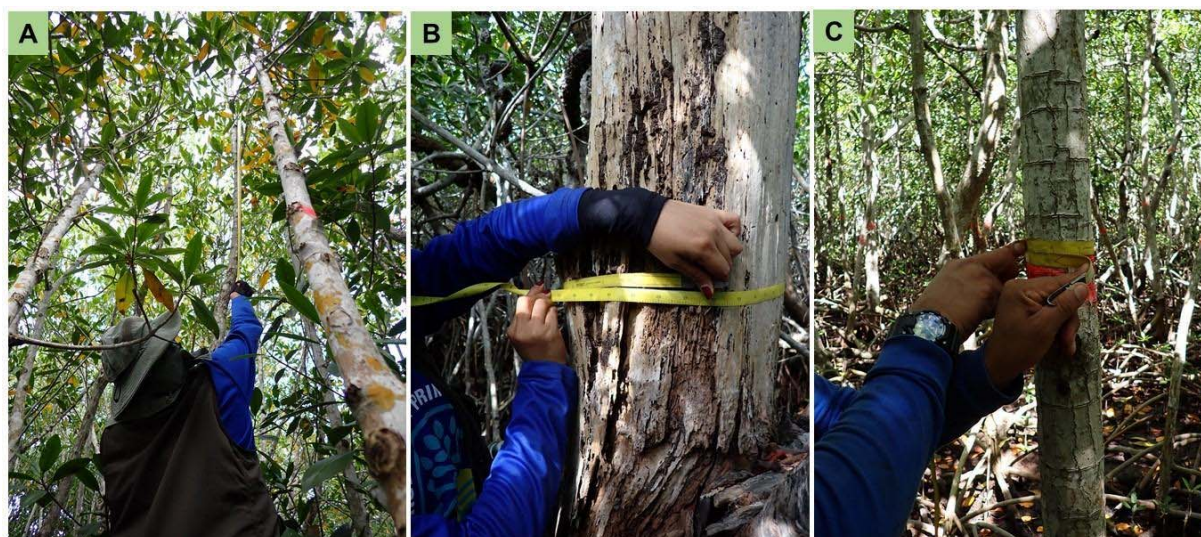


Figura 7. Medición de variables estructurales (Altura y DAP) en UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Dzilam Las Bocas (A y C), Río Lagartos (B). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

El análisis de los datos registrados de estructura forestal de manglar en las UM monitoreadas se realizó mediante el empleo de fórmulas estandarizadas, las cuales se describen en el ANEXO I. Adicionalmente, se realizó la medición de las variables de extracción y mortalidad de vegetación siguiendo las características estructurales registradas en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de las características para el monitoreo de variables de extracción y mortalidad de manglares en el sitio Norte de la Península de Yucatán.

Variable	Características para el monitoreo de las variables tal
Extracción	Especie y diámetro del tocón a la altura donde fue cortado o el remanente que quedó posterior a la extracción.
Mortalidad	Especie y DAP a la altura de 1.30 m, cuando sea posible medirlo.

3. Variables hidrológicas

Durante todos los muestreos correspondientes a las temporadas de lluvias, secas y nortes, en cada UM se monitorearon las variables reguladoras del suelo mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial: salinidad, temperatura, pH y potencial redox (Fig. 8). Se obtuvieron tres réplicas de agua intersticial a 30 cm de profundidad utilizando un tubo de acrílico, manguera y una jeringa de 60 ml. Los primeros 20 ml extraídos de cada réplica se desecharon para su posterior lectura. Las mediciones se realizaron *in situ* con un refractómetro (salinidad) y un multiparamétrico ULTRAMETER II-6 PFC (temperatura, pH y potencial redox).

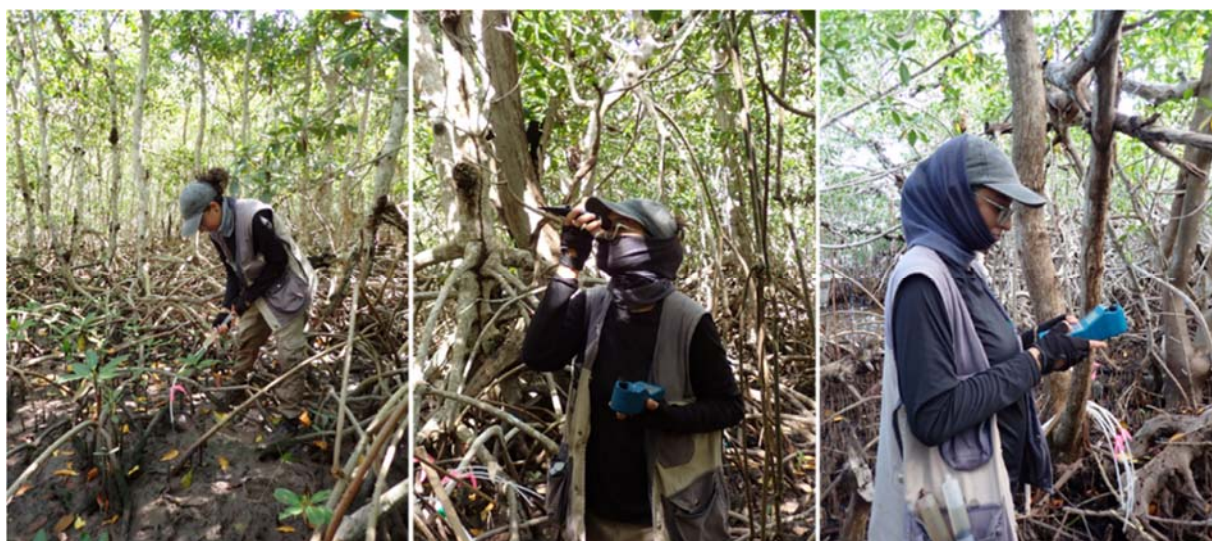


Figura 8. Colecta y medición de parámetros fisicoquímicos del agua intersticial en la UM de Dzilam Las Bocas, en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

Adicionalmente, en el centro de cada UM (20x20) se instalaron medidores automáticos del nivel del agua y temperatura de la marca HOBO para la medición de las variables del hidroperíodo (nivel, frecuencia y duración de inundación). Cada instrumento se colocó dentro de un tubo de PVC de 4 pulgadas, el cual penetra el suelo entre 0.5 y 1 m de profundidad (Fig. 9). Los datos de hidroperíodo registrados desde su instalación en temporada de lluvias (octubre

2023) a las fechas de colecta en las temporadas de secas y nortes (marzo 2024 y febrero 2025) fueron descargados para su posterior análisis.



Figura 9. Instalación de medidores automáticos del nivel de agua y temperatura para el monitoreo de las variables del hidroperíodo en la UM de Chiquilá, en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

4. Variables edafológicas

Durante el muestreo correspondiente a la temporada de lluvias, en cada UM (20x20) se colectaron tres núcleos de suelo (Fig. 10) siguiendo las metodologías propuestas por Kauffman *et al.* (2013) y Howard *et al.* (2014). Cada colecta se realizó con un nucleador de 1m de longitud y 5.25 cm de diámetro. El núcleo de suelo obtenido fue dividido en submuestras a diferentes perfiles de profundidad (0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm y 50-100 cm). Posteriormente, las submuestras se guardaron en bolsas herméticas previamente etiquetadas y se transportaron en frío para su análisis posterior en el Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.



Figura 10. Colecta de muestras de suelo en las UM de Dzilam Las Bocas (A), Chiquilá (B) y Chiquilá 2 (C), en el sitio Norte de la Península de Yucatán Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

5. Análisis de laboratorio

Para el análisis de muestras de suelo en el Laboratorio de Producción Primaria, se removieron restos de materiales como piedras, conchas, conchuela, entre otros, y cada muestra fue pesada en una balanza analítica para obtener el peso húmedo. Posteriormente, las muestras fueron secadas en un horno a 70° C por 72 h. Una vez transcurrido este tiempo se pesaron nuevamente para obtener el peso seco. El porcentaje de humedad se obtuvo de la relación entre el peso húmedo inicial y el peso seco final de cada muestra (Fig. 11).

Cada muestra se trituro, tamizó y homogeneizó para su análisis. La densidad aparente (DA) se calculó como el cociente entre el peso seco (g) y el volumen de la muestra (cm³) (Kauffman y Donato, 2012). El contenido de carbono y nitrógeno totales se obtuvo por el método de combustión seca empleando un auto-analizador elemental CHN FLASH-EA-2000 (Sollins *et al.*, 1999; Howard *et al.*, 2014).



Figura 11. Análisis de muestras de suelo de 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Determinación de peso húmedo (A), secado de las muestras en la mufla por 72 h a 70°C (B), determinación de peso seco (C). Posteriormente las muestras se tamizaron y homogeneizaron (D) para el análisis LOI (E) y combustión seca (F). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

Dada la condición kárstica de las UM de este estudio, adicionalmente se empleó el método Loss On Ignition (LOI; Dean, 1974; Bengtsson y Enell, 1986) para determinar el

porcentaje de carbonatos (CaCO_3). Este dato fue empleado para la determinación del porcentaje de carbono inorgánico (CI) y carbono orgánico (CO), con base en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Carbono inorgánico (\%)} \\ = \frac{\text{Carbono total (\%)} * \text{CaCO}_3 (\%) * 1.36}{100} \end{aligned} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\begin{aligned} \text{Carbono orgánico (\%)} \\ = \text{Carbono total (\%)} - \text{Carbono inorgánico (\%)} \end{aligned} \quad \text{Eq. 2}$$

El almacén de carbono orgánico se estimó utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Almacén de carbono orgánico (Mg ha}^{-1}\text{)} \\ = DA (\text{g cm}^{-3}) * \text{largo de segmento (cm)} * CO (\%) \end{aligned} \quad \text{Eq. 3}$$

Para determinar el fósforo total, las muestras secas y tamizadas fueron almacenadas y proporcionadas a la CONABIO, instancia de acompañamiento del proyecto, para su posterior análisis. La logística de entrega se determinó en su momento por acuerdo entre la CONABIO y el Laboratorio de Producción Primaria Cinvestav Mérida.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Variables estructurales

En las ocho UM de la costa norte de la PY se registraron cuatro especies de manglar reportadas para México (Velázquez-Salazar *et al.*, 2022) en diferente composición (Tabla 7).

Las distintas estructuras dan como resultado diferentes tipos ecológicos de manglar, y son explicadas por los diferentes patrones de mareas, descargas de agua dulce (puntual o difusa), vientos, precipitación y los diversos escenarios geomorfológicos de los sistemas costeros (Twilley *et al.*, 1986). De acuerdo con la clasificación de Lugo y Snedaker (1974), los tipos ecológicos de manglar en la PY son de franja, cuenca, chaparro, petén y ribereño (Adame *et al.*, 2015). En las UM del presente proyecto se identificaron los tipos ecológicos: franja y cuenca, sin embargo, cada UM con diferente configuración estructural (altura, DAP, densidad y dominancia de especies) (Fig.12 y 13). Además, la UM Dzilam WWF fue reubicada en la UM Dzilam WWF 2, la cual se caracteriza por ser un área de manglar degradado, con tocones y árboles muertos en pie (Fig. 14).

Tabla 7. Especies de manglar registradas en cada UM y subunidades en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las UM marcadas con * representan sitios monitoreados previamente en el marco del SMMM.

Localidad	Sitio_UM	Especies de manglar
Dzilam de Bravo	Pueblo*	<i>R. mangle</i> , <i>L. racemosa</i> y <i>A. germinans</i>
	WWF	<i>L. racemosa</i> , <i>R. mangle</i> y <i>A. germinans</i>
	WWF 2	<i>A. germinans</i>
	Las Bocas	<i>R. mangle</i>
Río Lagartos	San Felipe	<i>R. mangle</i> , <i>L. racemosa</i> , <i>A. germinans</i> y <i>C. erectus</i>
	Río Lagartos*	<i>R. mangle</i> , <i>L. racemosa</i> y <i>A. germinans</i>
	El Cuyo*	<i>C. erectus</i> y <i>A. germinans</i>
Yum Balam	Chiquilá	<i>A. germinans</i> , <i>R. mangle</i> y <i>L. racemosa</i>
	Chiquilá 2	<i>A. germinans</i> , <i>R. mangle</i> y <i>L. racemosa</i>



Figura 12. Estructura de la vegetación de las UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán durante la temporada de lluvias. Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C), San Felipe (D). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.



Figura 13. Estructura de la vegetación de las UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán durante la temporada de lluvias. Río Lagartos (E), El Cuyo (F), Chiquilá 1 (G) y Chiquilá 2 (H). Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.



Figura 14. Árboles muertos en pie en la UM de Dzilam WWF 2, en el sitio Norte de la Península de Yucatán reubicado durante la temporada de nortes. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

1.1 Unidad de Muestreo 20x20

El monitoreo en las UM se realizó durante las tres temporadas climáticas: lluvias 2023 (muestreo 1), secas 2024 (muestreo 2) y nortes 2025 (muestreo 3). Sin embargo, el monitoreo de la UM 20x20 en secas (muestreo 2) no estaba considerado en los “Términos de referencia” pero se decidió realizarlo e incluir la información en los resultados y en las bases de datos debido a los ajustes metodológicos acordados entre CONABIO y Cinvestav durante la primera fase del proyecto.

La altura promedio de los árboles de manglar en el Norte de la Península de Yucatán es de 5.7 m. De acuerdo con las variables estructurales establecidas para las UM 20x20 m, en la temporada de lluvias, la mayor altura promedio se registró en Dzilam WWF con 8.5 ± 2.8 m. La altura más baja promedio se registró en Río Lagartos y El Cuyo con 4.5 ± 1.2 y 4.6 ± 2.5 m, respectivamente (Fig. 15).

Durante la temporada de secas, el sitio de WWF registró la altura promedio más alta con 8.59 ± 8.8 m, seguido de Chiquilá 2 que registró una altura promedio de 7.85 ± 9.37 m. Los árboles con menor altura se registraron en Río Lagartos y El Cuyo con un promedio de 4.5 ± 6.2 y 4.6 ± 11.3 m, respectivamente. Para la temporada de nortes, Chiquilá 2 registró la altura promedio más alta con 7.5 m, mientras que la altura más baja fue medida en Dzilam WWF 2 con 0.3 m, el cual es un sitio con manglar degradado, con tocones y árboles muertos en pie (Fig. 15).

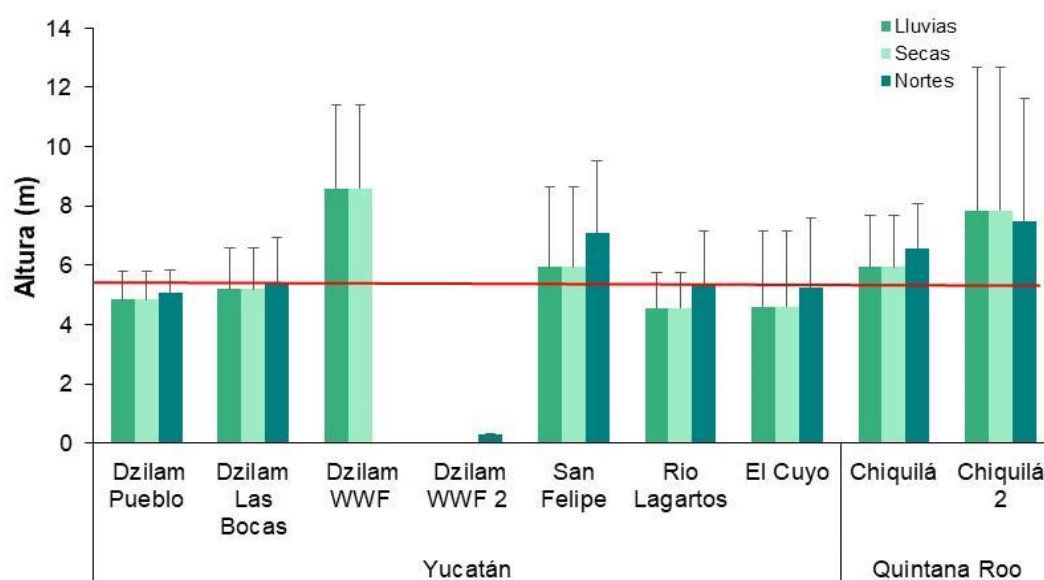


Figura 15. Altura promedio de los árboles de manglar en la UM (20x20) en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias (muestreo 1: 2023), secas (muestreo 2: 2024) y nortes (muestreo 3: 2025). Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total del proyecto considerando todas las UM y todos los muestreos.

El DAP promedio en el sitio Norte de la Península de Yucatán es de 7.5 cm. Para la temporada de lluvias, el mayor DAP promedio se registró en El Cuyo con 11.3 ± 2.5 cm y el menor se registró en Dzilam Pueblo con 4.3 ± 1 m (Fig. 16). Con respecto a la temporada de secas, El Cuyo registró los DAP más grandes con 11.3 ± 8.16 cm, seguido de Chiquilá 2 con 9.3 ± 4.87 cm. Los árboles con los DAP más pequeños se registraron en Dzilam Pueblo con 4.38 ± 1.31 cm. Para la temporada de nortes, El Cuyo registra el mayor DAP promedio con 10.56 ± 7.36 cm y el menor se identificó en WWF 2 con 3 ± 0.4 cm (Fig. 16). De forma temporal, no se registran diferencias notables en el DAP. Sin embargo, en Dzilam Pueblo, San Felipe y Chiquilá, existe un leve incremento de 0.15 cm en el DAP promedio del muestreo 1 al muestreo 3.

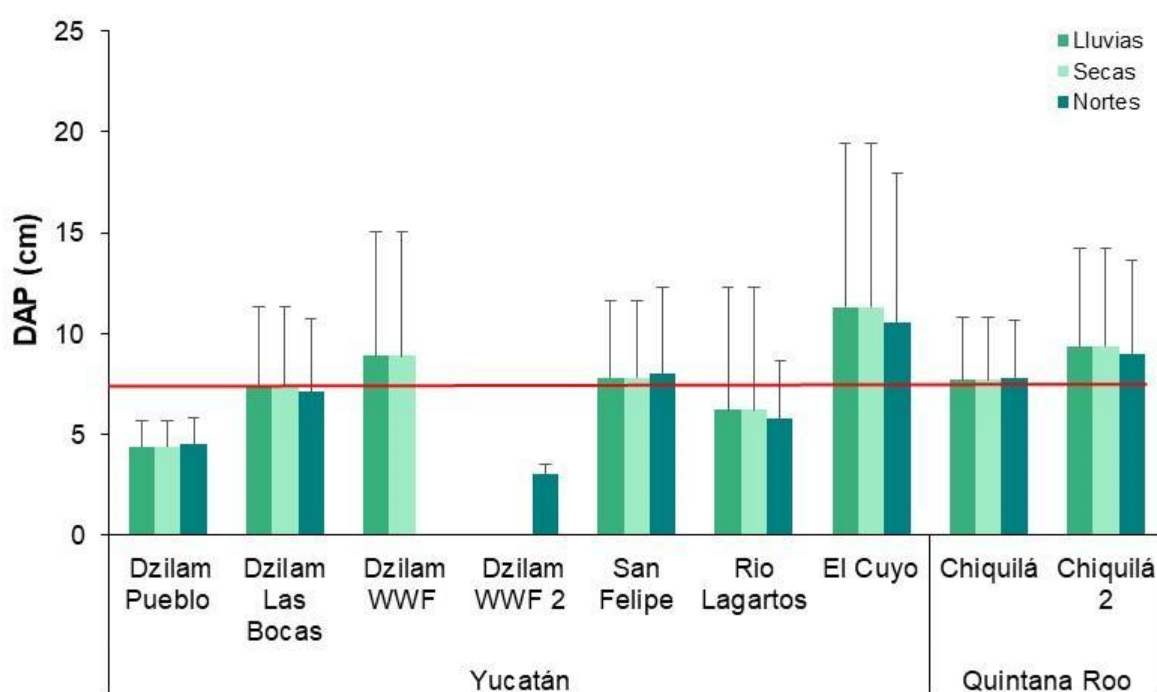


Figura 16. DAP promedio de los árboles de manglar en la UM (20x20) en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias (muestreo 1), secas (muestreo 2) y nortes (muestreo 3). Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

Con base en la caracterización estructural de los árboles, las UM de 20x20 m el sitio Norte de la Península de Yucatán, registran una alta heterogeneidad entre ellas, con características específicas con respecto a sus alturas promedio (0.3 – 7.5 m), DAP promedio (3 – 10.5 cm) y dominancia de especies. Es importante destacar que los resultados de las mediciones de diámetro y altura en diferentes temporadas climáticas no reflejan cambios drásticos de un muestreo a otro. Esto es debido a que las tasas de crecimiento en altura oscilan 0.2 a 1.5 m (Krauss et al., 2008) y las de DAP de 0.3 a 2.5 cm (Komiya et al, 2008) por año en árboles

jóvenes. Estas tasas de crecimiento disminuyen a medida que el bosque de manglar madura y, además, presentan variabilidad de acuerdo con la especie dominante y el escenario hidrológico en el que se desarrollan, evidenciando incluso el efecto de los cambios en el contenido de agua en el individuo durante las temporadas climáticas. Por esta razón, las metodologías específicas de caracterización y monitoreo de manglares recomiendan, con fines de eficiencia costo-beneficio, realizar las mediciones estructurales una vez al año (Rodríguez-Zúñiga et al., 2018; Kauffman et al., 2013).

1.1.1 Relación Altura – DAP

En la temporada de lluvias y nortes, la relación Altura – DAP (Fig. 17) en las UM indica que El Cuyo registró los mayores diámetros de tronco (Fig. 17 6A y 6B), en contraste con Dzilam Pueblo que registró los menores diámetros (Fig. 17 1A y 1B). Chiquilá 2 registró los árboles con las mayores alturas (Fig. 17 8A y 8B). De forma general se observa que la altura va en función con los diámetros, sin embargo, se registran árboles más bajos, pero con mayor DAP, así como mayor variabilidad en esta relación en Chiquilá (Fig. 17 7A, B) y Dzilam WWF (Fig. 17 2A). En relaciones forestales lineales, se espera que a medida que los árboles crezcan en altura, aumenten su diámetro (DAP). Sin embargo, en las UM de la Península de Yucatán, existe un punto en el cual los árboles tienden a engrosar más que a crecer en altura, por lo que la relación Altura-DAP en esta región es de tipo logístico. Este importante suceso podría considerarse como una estrategia de adaptación de los árboles frente a eventos meteorológicos (Carrillo Basto *et al.*, 2008). El comportamiento de esta relación indica también la gran heterogeneidad de los manglares en la costa de la Península de Yucatán.

La relación altura - DAP en los árboles de manglar en las UM del sitio Norte de la Península de Yucatán no registra una gran variabilidad entre las temporadas climáticas muestreadas, el paso del huracán Milton en octubre del 2024 (lluvias) no afectó en gran manera a esta relación en la estructura del bosque de manglar en las UM.

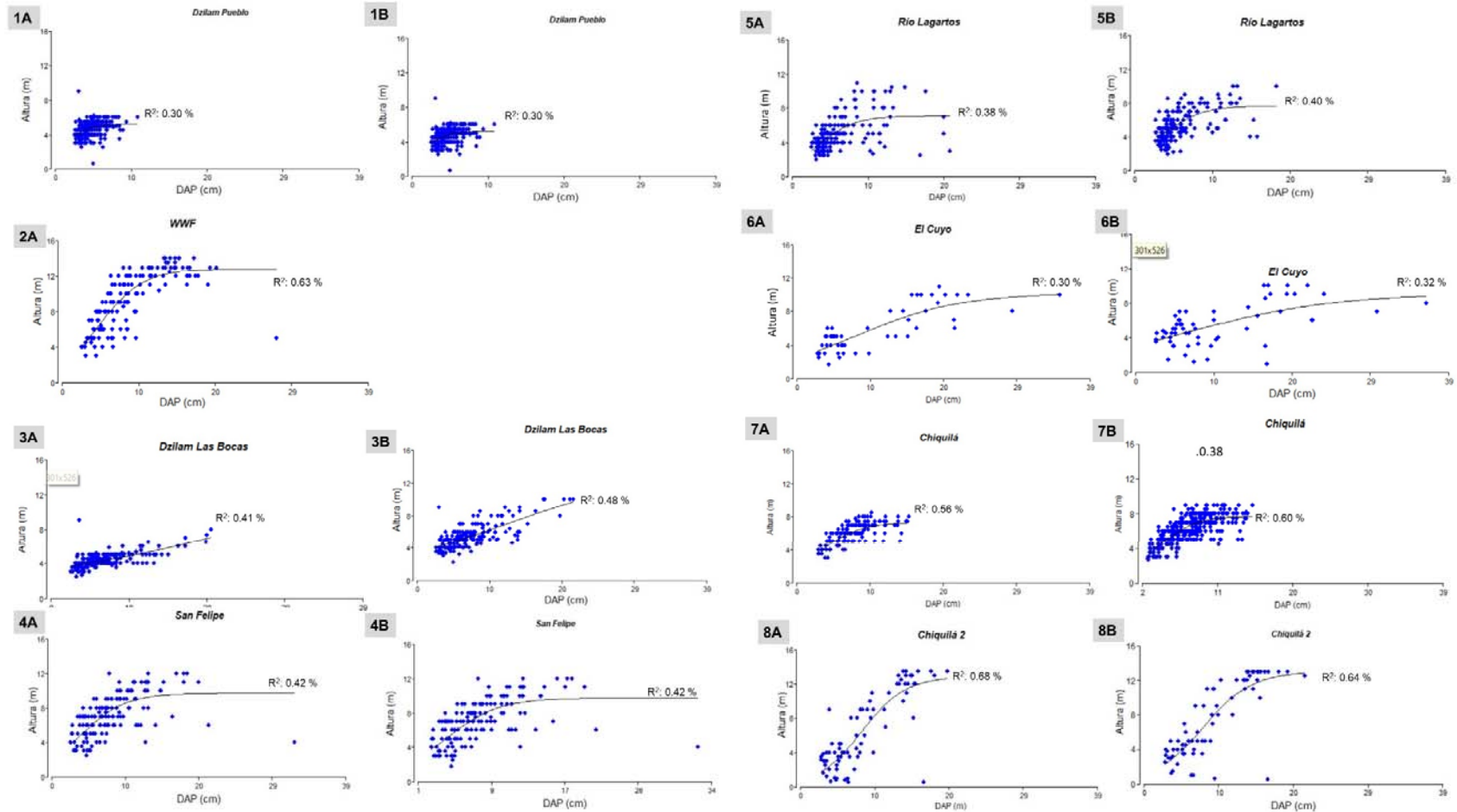


Figura 17. Relación altura – DAP en árboles de manglar en el sitio Norte de la Península de Yucatán en la época de lluvias (A) y nortes (B). Los sitios corresponden a: Dzilam Pueblo (1A y 1B), Dzilam WWF (2A), Dzilam Las Bocas (3A y 3B), San Felipe (4A y 4B), Río Lagartos (5A y 5B), El Cuyo (6A y 6B), Chiquilá (7A y 7B), Chiquilá 2 (8A y 8B).

1.2 Subunidad 10x10

En la temporada de lluvias (muestreo 1), en las subunidades de muestreo 10x10 m, las mayores alturas promedio se registraron en Dzilam Las bocas con 2.9 ± 0.36 m y la menor altura promedio en Chiquilá 2 con 1.8 ± 0.58 m. Cinco meses después, durante la temporada de secas (muestreo 2), las mayores alturas se registraron en Dzilam Las Bocas con 2.9 ± 0.77 m y las menores en Chiquilá 2 con 2 ± 0.59 m (Fig. 18). En las UM de San Felipe y Río Lagartos no se registraron individuos con las características de la clasificación dentro de la subparcela durante la temporada de secas. En la temporada de nortes (muestreo 3), Dzilam Las Bocas registró la mayor altura promedio con 2.9 ± 0.29 m, seguido de Dzilam Pueblo con 2.8 ± 1.6 m. Las menores alturas promedio se registraron en Chiquilá y Chiquilá 2 con 1.7 ± 1.2 m y 1.9 ± 1.7 m, respectivamente. La altura promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 2.4 ± 1.3 m (Fig. 18).

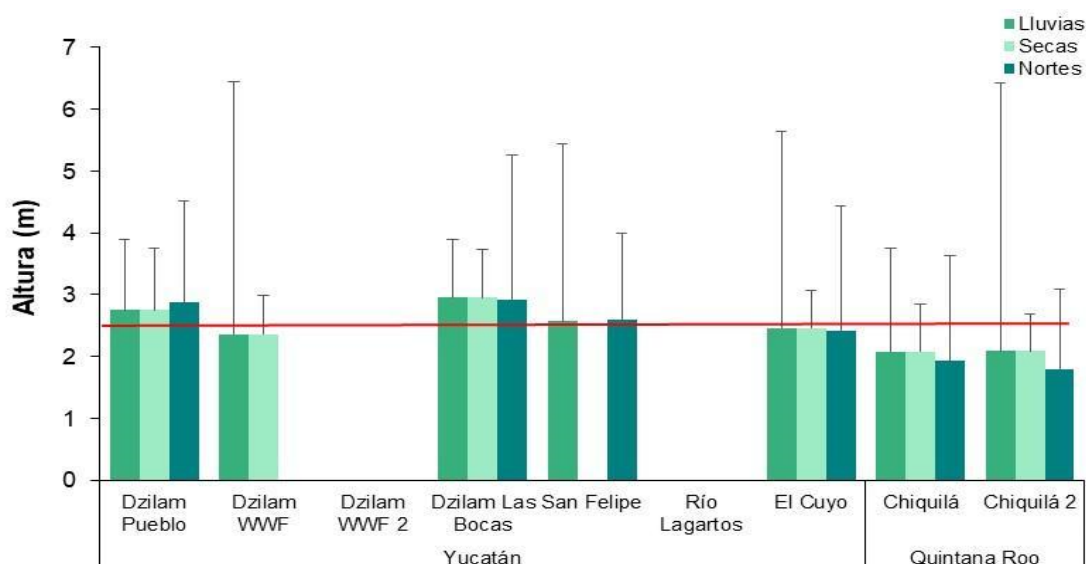


Figura 18. Altura promedio de los individuos de manglar en la subunidad 10x10 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.

Con respecto al DAP, el mayor DAP promedio se registró en Dzilam Las Bocas con 2.3 ± 0.38 cm y el menor en Dzilam WWF con 1 ± 0.32 cm. Durante la temporada de secas el DAP sigue el mismo patrón en ambos sitios (Dzilam Las Bocas; 2.9 ± 0.25 cm y Dzilam WWF $= 1 \pm 0.65$ cm) (Fig. 19). Durante el muestreo de la temporada de nortes, Dzilam Las Bocas registró un incremento en los DAP promedio con 2.3 ± 0.29 cm, seguido de El Cuyo con 2 ± 0.76 cm y los DAP más pequeños se registraron en Chiquilá 2 con 1.2 ± 0.48 cm. El DAP promedio en el Sitio

Costa Norte de la Península de Yucatán es de 1.2 ± 0.52 cm (Fig. 19). Las localidades Las Bocas, El Cuyo y Chiquilá registraron un incremento en el DAP entre el primer y el tercer muestreo.

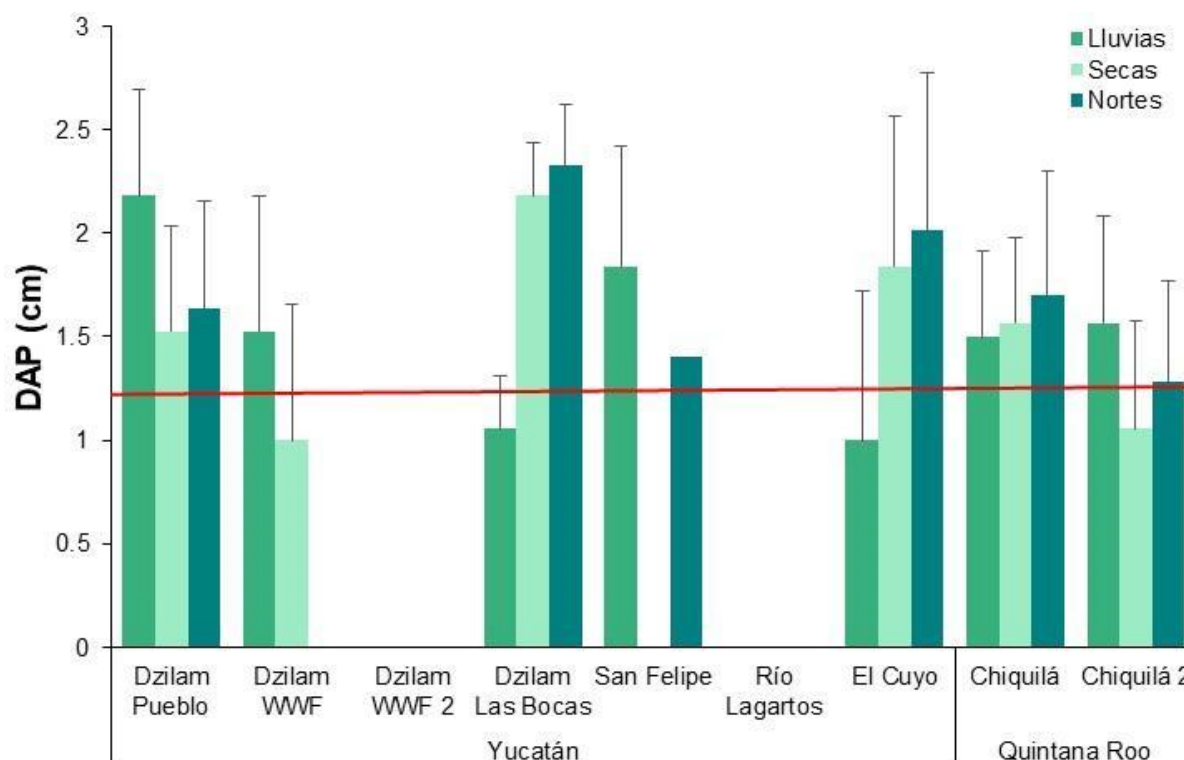


Figura 19. DAP promedio de los individuos de manglar en la subunidad 10x10 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

1.3 Subunidad 4x4

Para la temporada de lluvias, para las subunidades 4x4 m, las mayores alturas promedio se registraron en Dzilam WWF con 0.64 ± 0.27 m y la menor altura promedio en San Felipe con 0.37 ± 0.06 m. Durante esta temporada, se consideraron individuos con altura < 1.3 m (Fig. 20).

Posteriormente, de acuerdo con los ajustes metodológicos con CONABIO, se estableció medir dentro de esta subunidad los individuos mayores a 1.3 m. Para la temporada de secas las mayores alturas se registraron en Dzilam Pueblo con 2.69 ± 1.01 m y las menores en El Cuyo con $2.27 \pm .56$ m (Fig. 20). En la temporada de nortes, Dzilam Pueblo registra las mayores alturas con 2.7 ± 1 m y las más bajas en San Felipe con 1.85 m (con un solo individuo vivo registrado). La altura promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 1.6 ± 0.34 cm. En la temporada de nortes (muestreo 3) la altura de los individuos de manglar registró un crecimiento en las localidades de Dzilam Pueblo, El Cuyo y Chiquilá en comparación del muestreo de secas

(muestreo 2) (Fig. 20). Además, en la localidad de Dzilam Las Bocas se reclutaron nuevos individuos en esta subparcela, lo que es indicativo del crecimiento y desarrollo del manglar en el sitio. Este crecimiento podría relacionarse con la disponibilidad de recursos como el agua y la disminución del estrés hídrico, en comparación con la temporada de secas.

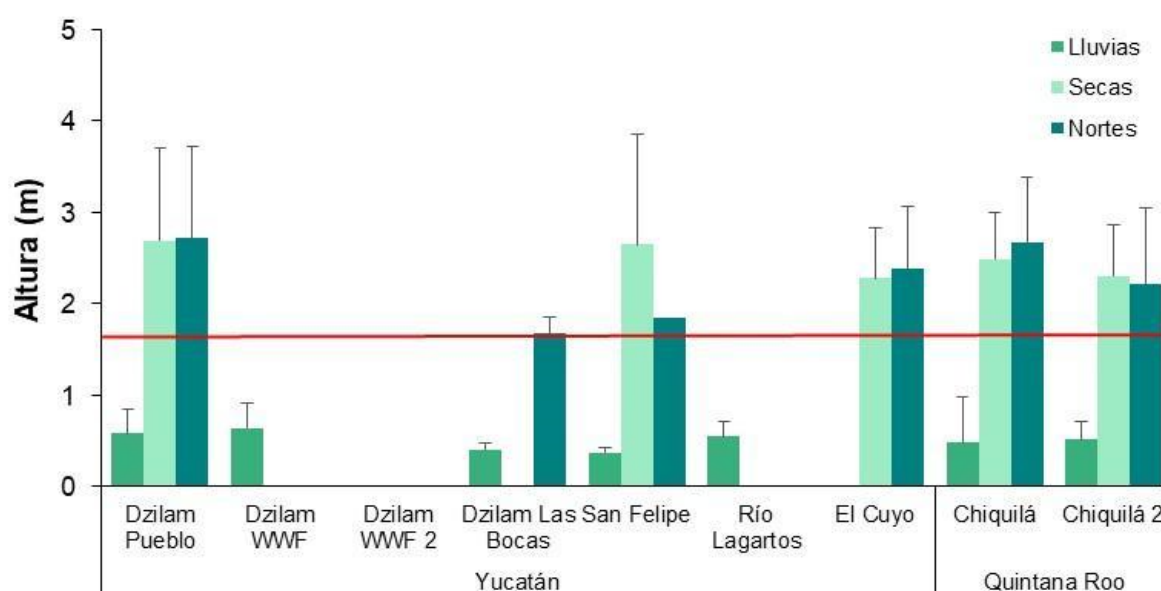


Figura 20. Altura promedio de los individuos de manglar en la subunidad 4x4 en el sitio Norte de la Península de Yucatán en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.

En la temporada de lluvias, el mayor DAP promedio se registró en Río Lagartos con 0.7 ± 0.3 cm y el menor DAP promedio en Dzilam Las Bocas y San Felipe con 0.4 ± 0.09 cm y 0.43 ± 0.15 cm respectivamente. Posteriormente para la temporada de secas el mayor DAP se registró en San Felipe 1.90 ± 0.71 cm y el menor en El Cuyo 0.96 ± 0.4 cm (Fig. 21). Se registró un incremento notable en los DAP en comparación con la temporada de lluvias. En esta temporada no se registraron individuos con las características estructurales definidas de la subunidad (Tabla 4) en las localidades de Dzilam WWF, Dzilam Las Bocas y Río Lagartos. Para la temporada de nortes, Chiquilá registró los DAP más grandes con 2 ± 0.68 cm y el menor DAP promedio en San Felipe con 1.1 cm. La altura promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 2.4 ± 1.3 cm (Fig. 21).

En cuanto a los cambios registrados, las subunidades en Dzilam Pueblo, El Cuyo, Chiquilá y Chiquilá 2 registraron un leve incremento en las alturas y DAP entre la temporada de secas-lluvias. En el caso de Dzilam Las Bocas se registró el reclutamiento de nuevos individuos durante la temporada de nortes. A escala temporal, en las localidades de Dzilam Pueblo, Las

Bocas, El Cuyo y Chiquilá es notable el crecimiento en el DAP, desde la temporada de secas (muestreo 1) a la temporada de secas (muestreo 2) y alcanzando el mayor DAP en la temporada de nortes (muestreo 3). Este crecimiento podría estar relacionado con las condiciones ambientales que prevalecen tras la temporada de lluvias y durante la temporada de nortes.

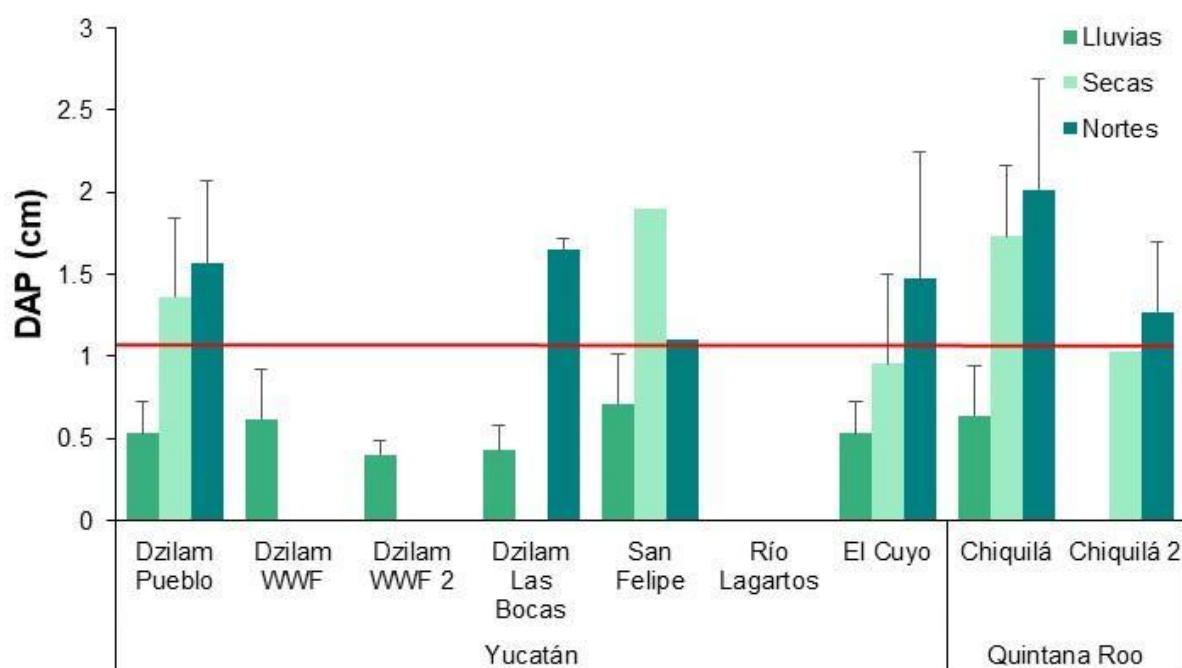


Figura 21. DAP promedio de los individuos de manglar en las subunidades 4x4 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.

1.4 Subunidad 1x1

Para la temporada de lluvias en las subunidades de 1x1m establecidas para las plántulas de manglar, se registraron las mayores alturas promedio en Chiquilá y Chiquilá 2 con 26 ± 2.7 cm y 24 ± 5.9 cm respectivamente. Las alturas promedio más bajas se registraron en San Felipe con 14.1 ± 4.9 cm. Para la temporada de secas las mayores alturas se registraron en Río Lagartos con 66 ± 48 cm y la menor altura en 35.3 ± 5.6 cm. Se registró un incremento en la altura de las plántulas de manglar con respecto a la temporada de lluvias (Fig. 22). Para la temporada de nortes, Chiquilá 2 registró las plántulas con mayor altura con 70 ± 29 cm y la menor altura en Río Lagartos con 31.6 ± 2.8 cm. La altura promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 38.1 ± 18.1 cm. La variabilidad en el crecimiento de las plántulas se debe a la

dinámica natural de la regeneración en los bosques de manglar en las diferentes temporadas, que nos permite evaluar el desarrollo del mismo.

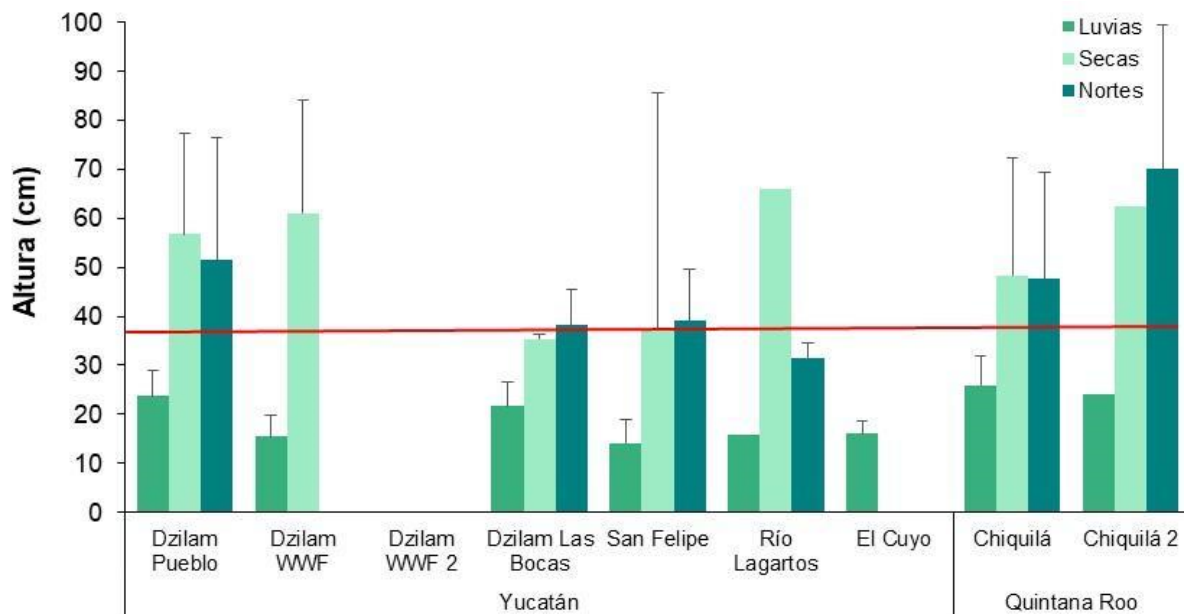


Figura 22. Altura promedio de las plántulas de manglar en las subunidades 1x1 en el sitio Norte de la Península de Yucatán, en temporada de lluvias, secas y nortes. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total

De manera general, la variabilidad registrada en altura y DAP en las subunidades de muestreo menores a 10x10, está dada en función específicamente de la edad de los individuos monitoreados. Los individuos jóvenes poseen tasas de crecimiento más altas que las de individuos adultos con mayor antigüedad. La dinámica de regeneración del bosque, en función de las características de los individuos más jóvenes, es indicador de la resiliencia del manglar. Por otro lado, la densidad, altura y DAP también reflejan las condiciones hidrológicas prevalecientes tras cada temporada climática. Sin embargo, se recomienda que el monitoreo de estos individuos jóvenes se realice en todas las temporadas climáticas durante el mismo año, durante varios años. Esto permitiría registrar la variabilidad intertemporal reduciendo el ruido que podría estar ocasionando la variación interanual. Sobre todo, cuando consideramos eventos climáticos que ocurren año con año.

2. Variables hidrológicas

2.1 Salinidad

Durante la caracterización y monitoreo de las UM, la salinidad promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 40 ± 4 UPS. En la temporada de lluvias la concentración de salinidad más alta se registró en Chiquilá 2 (64 ± 7 UPS), mientras que la salinidad más baja se registró en El Cuyo con 14 ± 3 UPS. Mientras que, en la temporada de secas, la concentración de salinidad más alta fue en Dzilam WWF (57 ± 8 UPS), y la salinidad más baja se registró en Chiquilá con 21 ± 10 UPS. En la UM de El Cuyo no se obtuvieron datos de salinidad porque el nivel del agua intersticial estaba por debajo de los 50 cm del suelo.

Para la temporada de nortes, la salinidad más alta se registró en Dzilam WWF 2 con 65 ± 8 UPS, en contraste con El Cuyo con la menor salinidad (7 UPS). En este sitio el agua intersticial es difícil de extraer por el tipo de suelo y el nivel del agua por debajo de 50 cm del suelo, por lo que solo se colectó una muestra de agua intersticial (Fig. 23).

De manera general, temporalmente, la salinidad más alta se registró en la temporada de secas (44 ± 4 UPS) y la más baja en nortes (35.6 ± 5 UPS). Esta dinámica es la respuesta al balance neto de agua en la región durante la temporada de secas, en la que no hay entrada de agua al sistema (precipitación) y en el que la evaporación es alta, ocasionando la concentración de sal. Por su parte, la temporada de lluvias provoca una disminución en la salinidad y este efecto, acumulado con la temporada de nortes, refleja los valores más bajos.

Espacialmente, los sitios de Quintana Roo tienen salinidades más altas que los de Yucatán. En este caso queda de manifiesto la influencia marina que tienen los primeros y la influencia del agua dulce que tienen los segundos. Se registra una tendencia de mayor salinidad a menor salinidad desde Dzilam WWF 2 a El Cuyo, incrementando nuevamente en dirección a Chiquilá. Esto puede estar influido por los aportes subterráneos de agua dulce. Sin embargo, se debe tomar en cuenta otros fenómenos que pueden influir en la variabilidad de la salinidad al interior de las localidades como es la hidrología local, en la que se incluyen los procesos de precipitación y evaporación, así como la dinámica de inundación/sequía y la fuente principal de agua (Fig. 23).

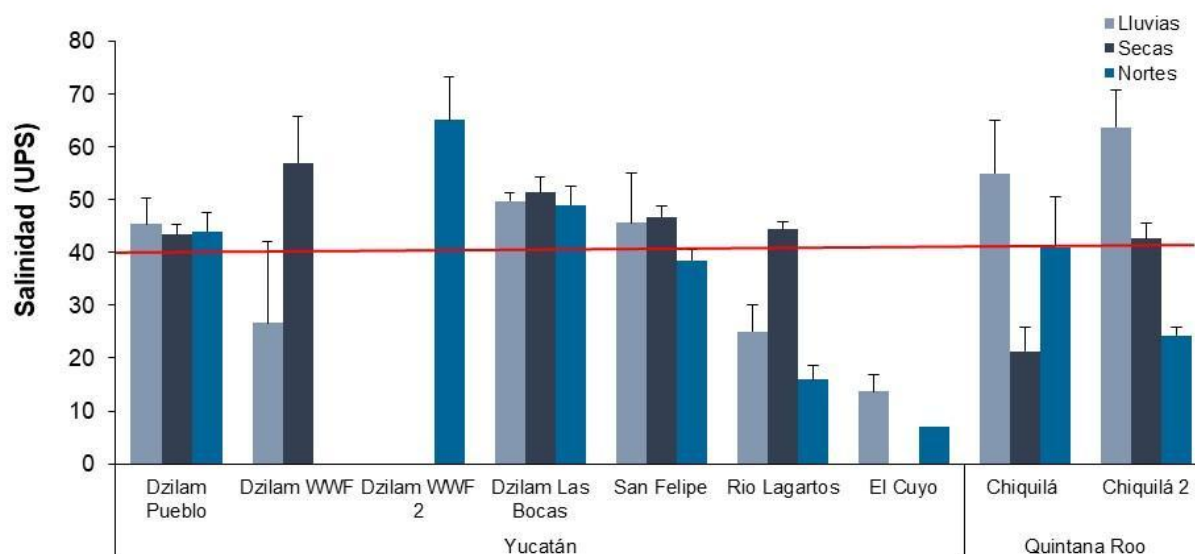


Figura 23. Salinidad intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

2.2 Temperatura

El promedio general de la temperatura del agua intersticial en los manglares de las UM es de 27.5 ± 0.8 °C. En la temporada de lluvias, la temperatura más alta registrada fue en Dzilam Pueblo (29.3 ± 0.4 °C), mientras que la temperatura más baja se registró en Río Lagartos con 27.4 ± 0.3 °C.

Para la temporada de secas, la temperatura más alta registrada fue en Dzilam Pueblo (29.9 ± 0.4 °C), mientras que la temperatura más baja se registró en Río Lagartos con 25.5 ± 0.3 °C. Los sitios de Quintana Roo en promedio tienen las temperaturas más altas (27.7 °C) que los de Yucatán (26.9 °C) (Fig. 24).

En la temporada de nortes, Río Lagartos registró la temperatura más elevada con 28.8 ± 0.3 °C, seguido de San Felipe 28.1 ± 0.1 °C. La temperatura más baja se registró en Chiquilá 2 con 24.8 ± 0.1 °C. La temperatura promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 27.5 ± 0.8 °C, la temporada de lluvias registró la temperatura más elevada (28.4 °C) en comparación de la temporada de secas (27.1°C) y nortes (27 °C). Este comportamiento puede

ser una respuesta a un Frente Frío que se presentó durante el muestreo de la temporada de lluvias.

Los sitios de Quintana Roo en promedio tienen las temperaturas más bajas (27.4°C) que los de Yucatán (27.4°C). Este comportamiento de la temperatura del agua responde a las condiciones locales del clima (Fig. 24).

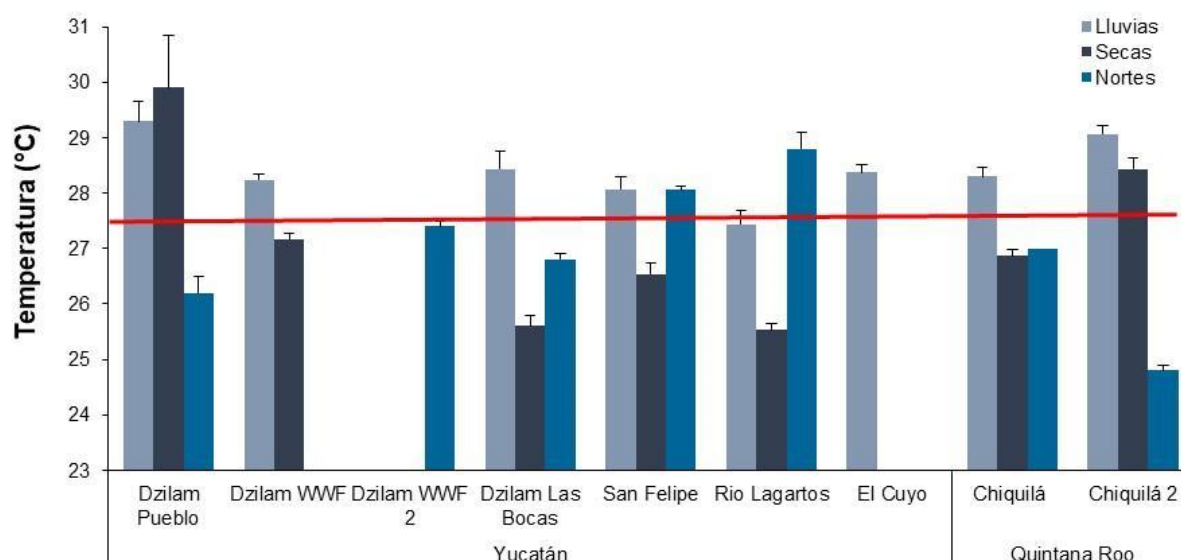


Figura 24. Temperatura intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

2.3 pH

El pH promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de 7.1 ± 0.1 °C, el pH más elevado se registró en la temporada de lluvias y nortes (7.19 ± 0.1), en comparación con la temporada de secas (7.03 ± 0.1) (Fig. 25). En la temporada de lluvias predominan sitios con valores de pH por debajo del promedio, es decir ligeramente ácidos, pero el mayor potencial de hidrógeno se registró en El Cuyo (7.89 ± 0.3), y el sitio con menor pH fue en Chiquilá 2 con 6.93 ± 0.1 (Fig. 25). Mientras que, durante la temporada de secas, el mayor potencial de hidrógeno se registró en Chiquilá (7.21 ± 0.2), y el sitio con menor pH fue en Dzilam Las Bocas con 6.85 ± 0.1 (Fig. 25).

Para la temporada de nortes el pH más bajo fue en Dzilam Las Bocas con 6.99 ± 0.1 y el más elevado en Río Lagartos con 7.49 ± 0.28 .

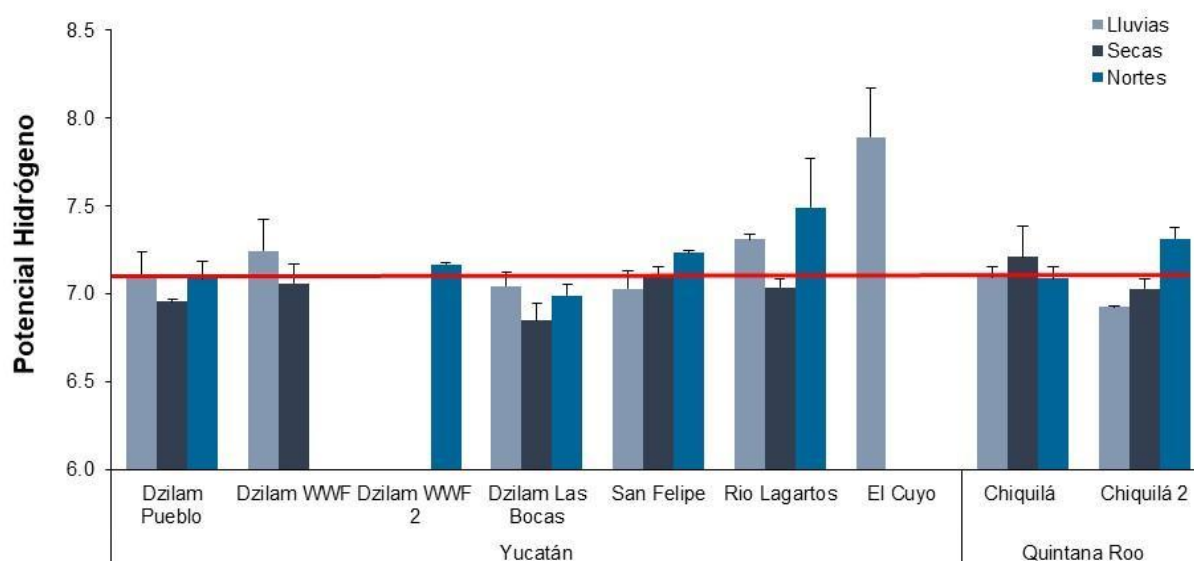


Figura 25. pH intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 9 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM en todos los muestreos.

En sitios como Dzilam Las Bocas y Río Lagartos, el pH tiene el mismo comportamiento que la temperatura. A pesar de la variabilidad temporal y espacial que presenta el pH en el agua intersticial de los manglares del norte de la PY, los valores se encuentran dentro del rango normal de ligeramente ácido a neutro (6.5 - 7.5) para manglares a nivel global (Macintosh y Ashton, 2002).

2.4 Potencial redox

El potencial redox promedio en el Sitio Norte de la Península de Yucatán es de -248 ± 22.6 mV. Durante la temporada de lluvias, el potencial redox promedio para las UM es de -241 ± 96 mV, variando desde suelos poco reducidos como los de Chiquilá 2 (-53 ± 29 mV) a muy reducidos como los de Río Lagartos (-304 ± 9 mV) (Fig. 26).

Para el muestreo de la temporada de secas, el potencial redox promedio para las UM es de -254 ± 18 mV, registrando suelos poco reducidos como los de Dzilam WWF (-108 ± 56 mV) a muy reducidos como los de Dzilam Pueblo (-296 ± 12 mV) (Fig. 26).

Para la temporada de nortes el potencial redox más reducidos se registró en Chiquilá con 331 ± 13 mV, seguido de Río Lagartos con -306 ± 11 mV y el menos reducido fue en Chiquilá 2 con -234 ± 27 mV.

Temporalmente, el potencial redox más reducido se registró en la temporada de nortes (-285 ± 26 mV), y valores menos reducidos en la temporada de lluvias (-242 ± 33 mV).

Espacialmente, los sitios de Quintana Roo en promedio tienen el potencial redox menos reducido (-245 mV) en comparación con los sitios de Yucatán con suelos más reducidos (-251 mV). Este comportamiento en el potencial redox se relaciona con las condiciones del suelo y la dinámica hidrológica espacial y temporal de cada UM (Fig. 26).

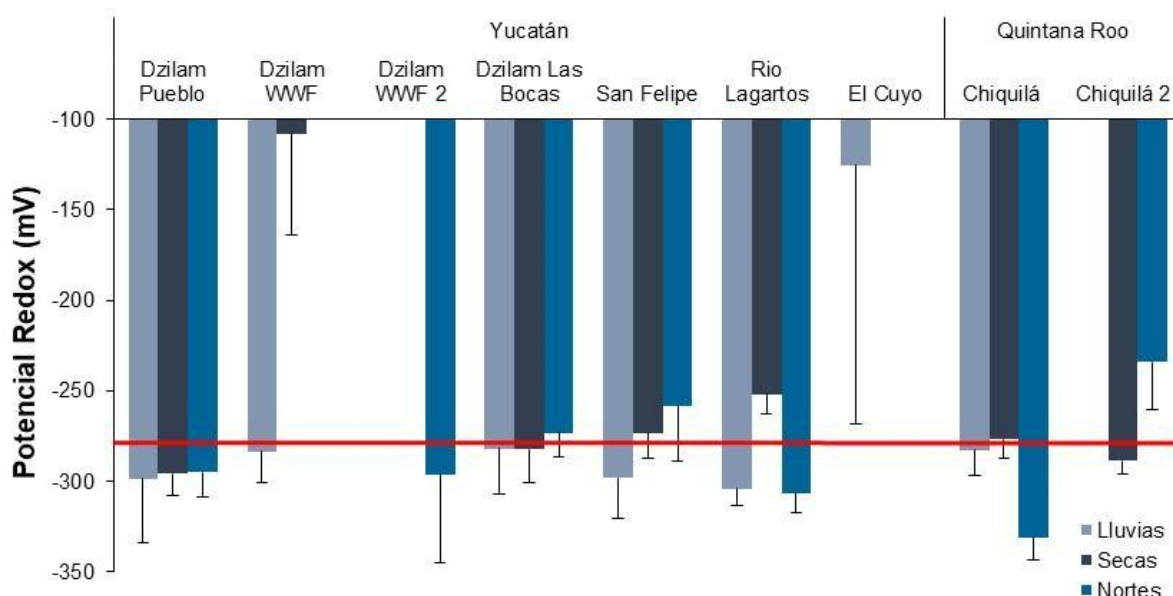


Figura 26. Potencial redox intersticial promedio correspondiente a la temporada de lluvias, secas y nortes en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total de todas las UM.

2.5 Relación pH – potencial redox

En todas las temporadas climáticas se observó una relación entre el potencial redox y el pH (Fig. 27). En suelos con largos periodos de inundación incrementan los sulfuros, causando una mayor acidez en el suelo, lo cual puede ocasionar estrés al manglar e inclusive su muerte. Este comportamiento se ve reflejado en 7 sitios (Fig. 27A), con una relación inversa entre el pH y potencial redox; con altos valores de pH y valores del redox menos reducidos. Con bajos valores de pH, los valores de potencial redox fueron más negativos, es decir, suelos más reducidos. Sin embargo, en el sitio de Chiquilá 2, no se identificó dicha relación entre ambas variables (Fig. 27B).

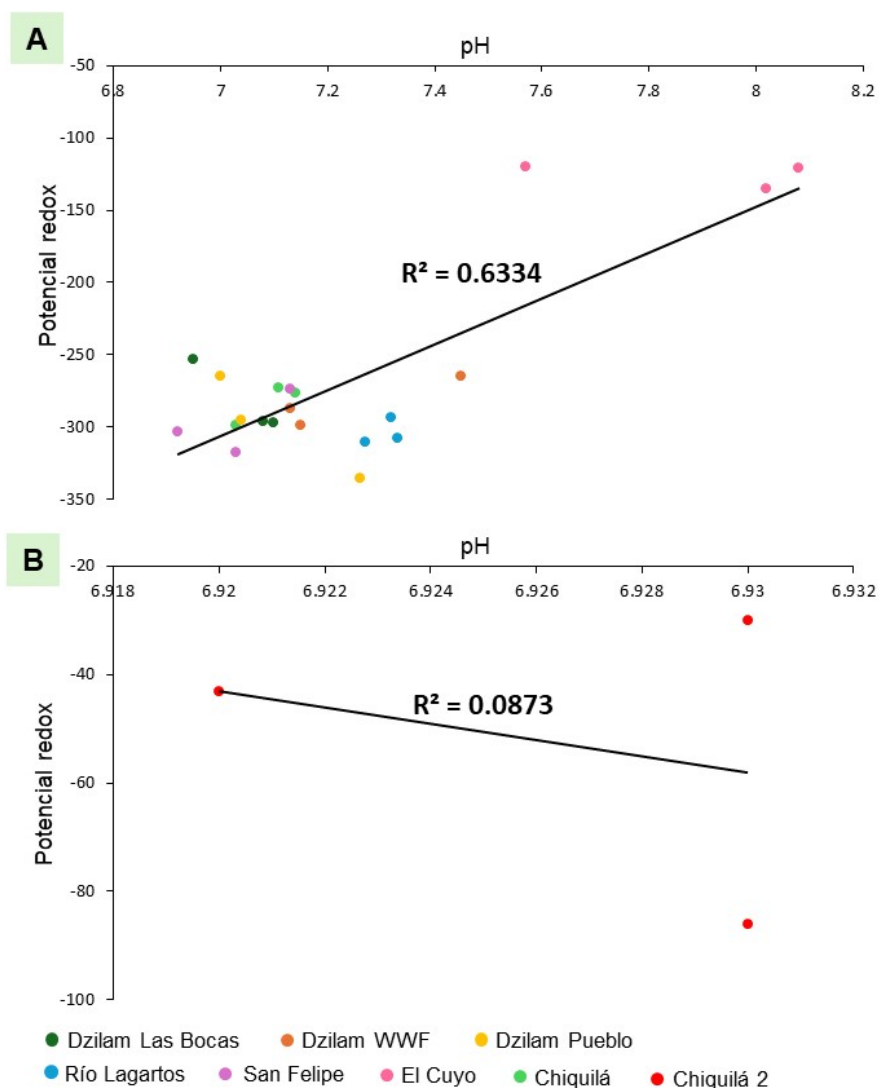


Figura 27. Relación del pH – Potencial Redox de 7 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de lluvias en el sitio Norte de la Península de Yucatán.

En la temporada de secas, se observó una nula relación entre el potencial redox y el pH en la mayoría de las UM, con excepción de la UM Chiquilá 2 (Fig. 28). Esta UM presentó una relación altamente inversa entre el pH y potencial redox, con altos valores de pH asociados a valores de potencial redox más reducidos (Fig. 28B). Es importante mencionar que durante este periodo no se obtuvieron datos en la UM El Cuyo, debido a que el nivel del agua intersticial no se pudo extraer estaba por debajo de los 50 cm del suelo.

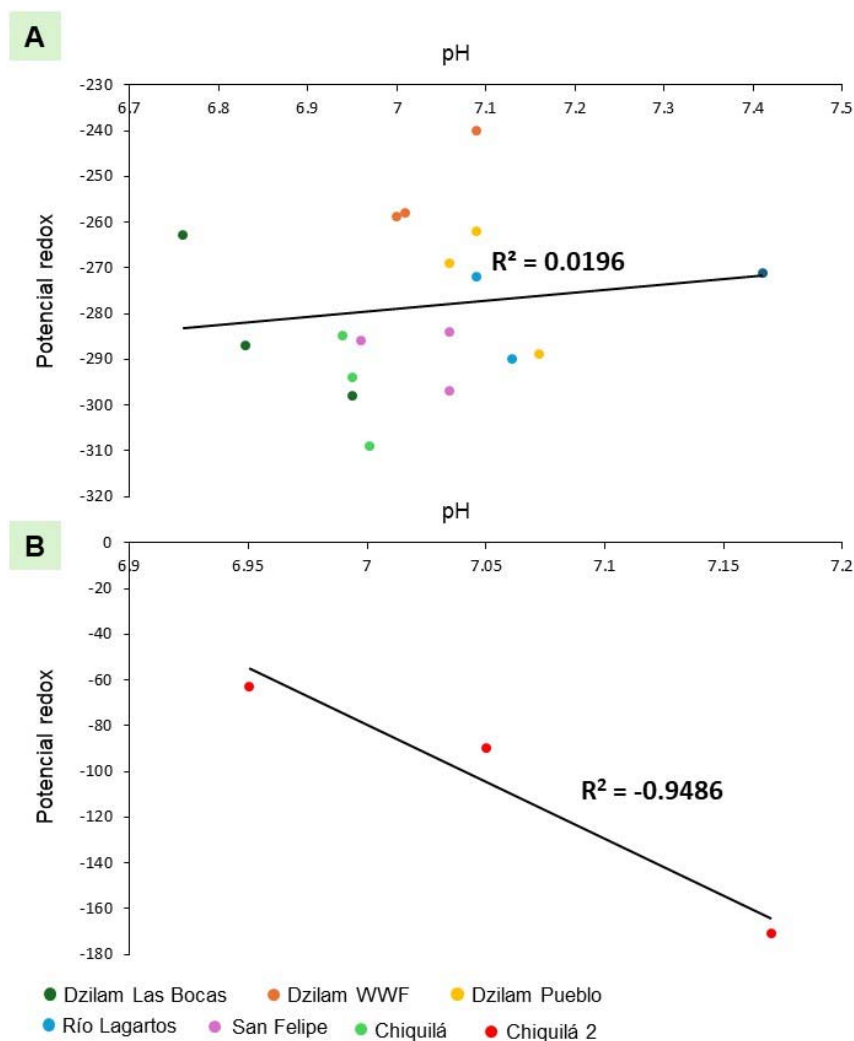


Figura 28. Relación del pH – Potencial Redox de 7 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de secas en el sitio Norte de la Península de Yucatán.

En la temporada de nortes los suelos de las UM presentaron con una relación inversa entre el pH y potencial redox; con altos valores de pH y valores del redox menos reducidos. Dicha relación fue baja en la mayoría de los sitios (Fig. 29A), con excepción de la UM Río Lagartos, donde presentó una relación inversa alta (Fig. 29B). Es importante mencionar que durante este periodo no se obtuvieron datos en la UM El Cuyo debido a que el nivel del agua se encontraba por debajo de los 50 cm del suelo.

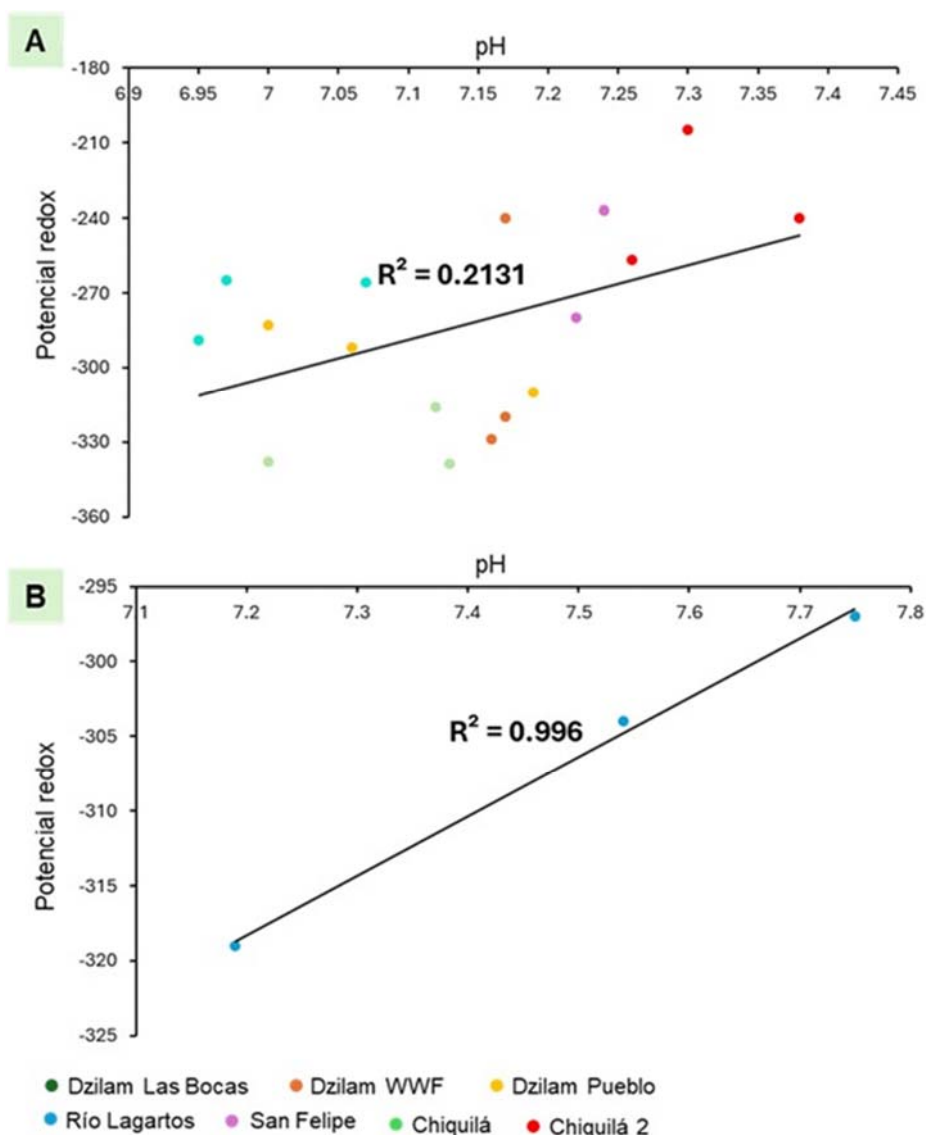


Figura 29. Relación del pH – Potencial Redox de 6 UM (A) y UM Chiquilá 2 (B) correspondiente a la temporada de nortes en el sitio Norte de la Península de Yucatán.

La relación pH - potencial Redox en manglares es importante para comprender algunos de los procesos que ocurren en el ecosistema. Sin embargo, esta relación está estrechamente relacionada con la hidrología local. De hecho, las condiciones reductoras son comunes en manglares debido a su dinámica de inundación, pero cuando las condiciones naturales se ven modificadas por algún evento, un potencial redox bajo puede provocar una baja en el pH (relación positiva).

2.6 Hidroperíodo

La caracterización del hidroperíodo se llevó a cabo a partir de datos provenientes de sensores automáticos de medición continua colocados en cada uno de los sitios de monitoreo. Las series de tiempo se normalizaron tomando como referencia el punto de instalación del sensor respecto al suelo y se ajustaron para abarcar la misma extensión temporal. Lo anterior permitió reconocer diferencias significativas en los niveles de inundación en los sitios bajo monitoreo, reconociendo los efectos de eventos hidrometeorológicos regionales, así como las variaciones estacionales y aquellas asociadas con las características de los sitios de muestreo.

El hidroperíodo está asociado a los niveles topográficos del sitio con respecto a las variaciones de la marea, y a la conexión que presenten con el cuerpo de agua al cual están asociados los manglares de cada sitio (laguna, mar, ciénega). Durante la temporada de lluvias-secas (octubre 2023 a marzo 2024), los sitios de Dzilam Pueblo y Dzilam Las Bocas fueron los que permanecieron con un periodo de inundación más prolongado.

Todos los sitios presentaron periodos tanto de inundación como de seca de forma variable, excepto el sitio de El Cuyo, donde se registraron periodos más secos de forma variable, pero con el patrón estacional de mayor inundación durante los meses de lluvias (Fig. 30).

Para la temporada de lluvias a nortes (abril 2024 a enero 2025), todos los sitios presentaron variaciones en el nivel de inundación. En todos los sitios se observó que los niveles de inundación incrementan durante la temporada de lluvias y nortes, mientras que los niveles más bajos se registraron en la temporada de secas (Fig. 30).

En octubre de 2024, durante el paso del huracán Milton cerca de la PY, la localidad de Dzilam de Bravo registró mayor precipitación (CONAGUA, 2024). De forma general se observa mayor inundación en las 8 UM durante el mes de octubre lo que se podría relacionar como parte de los efectos de este evento meteorológico. En las UM Dzilam Las Bocas y Dzilam WWF el nivel y el tiempo de inundación fueron mayores en este periodo (octubre). Es evidente el efecto de este evento ya que la localidad de El Cuyo registró una tendencia del nivel de agua por debajo del suelo, sin embargo, en octubre registró mayor nivel y tiempo de inundación (Fig. 30).

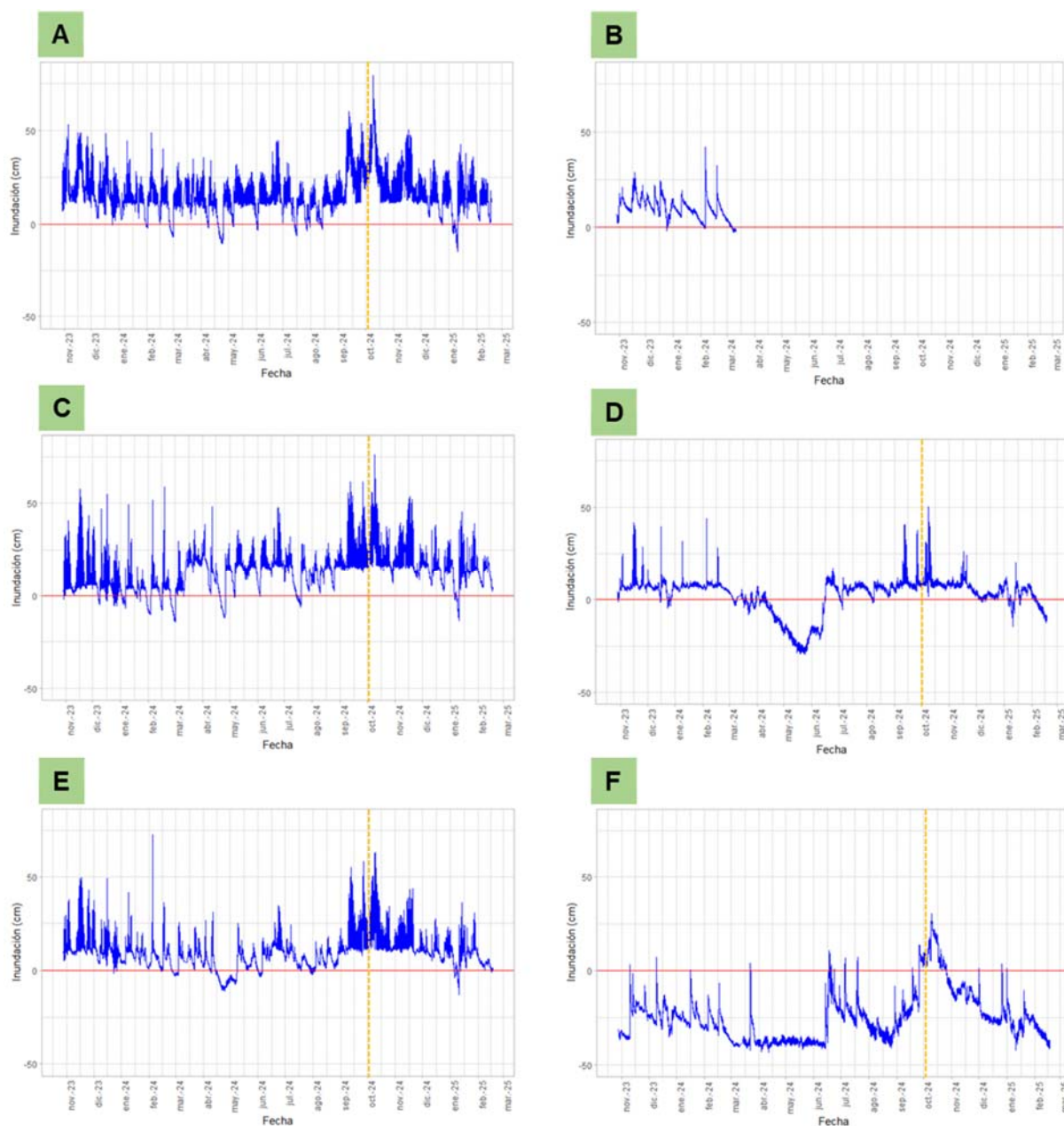


Figura 30. Nivel de inundación en 6 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán: Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C), San Felipe (D), Río Lagartos (E) y El Cuyo (F) durante el periodo de lluvias y secas (octubre 2023 a marzo 2024). La línea roja representa el valor 0 (nivel del suelo). La línea punteada amarilla representa la fecha del paso del huracán Milton.

En el mismo escenario, Dzilam Pueblo y Dzilam Las Bocas presentaron el mayor nivel medio de inundación con 0.16 m cada uno, mientras que en San Felipe se registró el nivel más bajo con 0.07 m (Tabla 8). En promedio se identificó que el sitio de Dzilam Pueblo, seguido por Dzilam Bocas tienen los niveles más elevados. Por otra parte, el sitio el Cuyo registró los niveles más bajos de inundación (-41 cm) (Tabla 8).

Tabla 8. Promedio de nivel de inundación en centímetros por cada UM durante todo el proyecto. Mediciones: media, inundación mínima (mín) e inundación máxima (máx).

Localidad	Sitio_UM	Media (cm)	Mín (cm)	Máx (cm)
Dzilam de Bravo	Dzilam Pueblo	16	-7	64
	Dzilam WWF	10	-3	52
	Dzilam Las Bocas	16	-4	97
Río Lagartos	San Felipe	7	-5	64
	Río Lagartos	10	-3	73
	El Cuyo	-26	-41	7

Los datos correspondientes al sensor colocado en el sitio Chiquilá localizado en Yum Balam fueron descartados debido a la manipulación del sensor por parte de un agente desconocido resultando en una alteración de los valores recopilados. Así mismo, el sensor de los sitios Dzilam WWF y Dzilam WWF 2 se descompuso perdiendo los datos correspondientes al periodo de monitoreo.

3. Variables edafológicas

3.1 Caracterización del suelo

A continuación, se describen las características de los núcleos de suelo colectados en cada UM (20x20). En la Tabla 9 se describe el largo del núcleo de suelo colectado, esto varió en función de las características de cada UM, tales como nivel de inundación, profundidad de la roca madre, etc.

Tabla 9. Descripción de las características edafológicas *in situ* del suelo de manglar del sitio Norte de la Península de Yucatán.

Localidad	Sitio_UM	Núcleo A	Núcleo B	Núcleo C
Dzilam	Pueblo	LT: 75 cm MO: 75 cm Color: 0-7 cm: café oscuro 7-13 cm: café 13-18 cm: café grisáceo 18-23 cm: café 23-75 cm: café grisáceo	LT: 66 cm MO: 66 cm Color: 0-14 cm: café oscuro 15-66 cm: café claro	LT: 92 cm MO: 92 cm Color: 0-12 cm: café oscuro 13-22 cm: gris oliva claro 23-92 cm: gris oliva
	WWF	LT: 50 cm MO: 50 cm Color: 0-3 cm: café oscuro 3-50 cm: café muy claro	LT: 45 cm MO: 0-45 cm Color: 0-45 cm: café oscuro	LT: 90 cm MO: 0-90 cm Color: 0-25 cm: café oscuro 26-31 cm: café oscuro grisáceo 32-59 cm: café oscuro 60-90 cm: café grisáceo muy oscuro
	WWF 2	LT: 60 cm MO: 0-60 cm Color: 0-8 cm: café oscuro 8-15 cm: café claro 15-56 cm: gris claro 56-60 cm: beige	ND	ND
	Las Bocas	LT: 85 cm MO: 0-85 cm Color: 0-37 cm: café oscuro 37-60 cm: café grisáceo 61-85 cm: café oscuro	LT: 85 cm MO: 0-85 cm Color: 0-40 cm: café oscuro 41-55 cm: café claro 56-85 cm: café oscuro	LT: 88 cm MO: 0-85 cm Color: 0-40 cm: café oscuro-café claro 41-55 cm: café 56-88 cm: café oscuro
Río Lagartos	San Felipe	LT: 54 cm MO: 0-54 cm Color: 0-5 cm: negro 6-54 cm: café claro	LT: 38 cm MO: 38 cm Color: 0-10 cm: café oscuro 11-16 cm: café claro 17-38 cm: gris claro	LT: 35 cm MO: 35 cm Color: 0-4 cm: café oscuro 5-10 cm: café claro 11-35 cm: gris claro
	Río Lagartos	LT: 80 cm MO: 0-80 cm Color: 0-10 cm: café oscuro 11-28 cm: café claro 29-38 cm: café muy claro 39-50 cm: café grisáceo 51-80 cm: gris claro.	LT: 90 cm MO: 0-90 cm Color: 0-5 cm: negro 6-58 cm: café oscuro 59-90 cm: gris claro	LT: 76 cm MO: 0-76 cm Color: 0-14 cm: café oscuro 15-48 cm: café claro 49-76 cm: gris claro
	El Cuyo	LT: 55 cm MO: 0-55 cm Color: 0-55 cm: café oscuro 6-40 cm: café muy oscuro 41-67 cm: café grisáceo	LT: 67 cm MO: 0-67 cm Color: 5-40 cm: café muy oscuro 41-67 cm: café grisáceo	LT: 60 cm MO: 0-60 cm Color: 0-3 cm: café muy oscuro 4-32 cm: café oscuro 33 a 40 cm: café grisáceo 41 a 60 cm: café claro

Yum Balam	Chiquilá	LT: 90 cm MO: 0-90 cm Color: 0-42 cm: café oscuro 42-90 cm: gris con beige 65 a 90 cm: gris	LT: 82 cm MO: 0-41 cm Color: 0-41 cm: café oscuro 42-52 cm: café claro 53-82 cm: beige	LT: 95 cm MO: 0-95 cm Color: 0-10 cm: café claro 11-20 cm: gris claro 21-50 cm: café claro 51-80 cm: gris 81-95 cm: café claro
	Chiquilá 2	LT: 60 cm MO: 0-60 cm Color: 0-25 cm: café con beige 26-60 cm: gris con beige	LT: 70 cm MO: 0-70 cm Color: 0-18 cm: café 18-36 cm: café claro 37-70 cm: gris con beige	LT: 60 cm MO: 0-60 cm Color: 0-20 cm: café 21-33 cm: café claro 34-60 cm: gris claro

LT= largo total del núcleo colectado. MO: largo de materia orgánica. ND: no hay dato, Color: tonalidad de los segmentos del núcleo.

Los suelos colectados presentaron diferencias, tales como largo total colectado, contenido de materia orgánica visible, tonalidades, presencia de raíces entre otros (Fig. 27, 28). Las tonalidades más oscuras, indicativo de presencia de materia orgánica, se presentaron en los sitios de Chiquilá, Río Lagartos, Dzilam Las Bocas y Dzilam WWF.

En la UM Dzilam Pueblo, se registró materia orgánica visible y tonalidades oscuras en la capa superficial del suelo, entre 0 y 15 cm (Fig. 31A), con presencia de raíces finas y gruesas, y restos de hojas.

En la UM Dzilam WWF, se advirtió materia orgánica visible en la totalidad del núcleo, con tonalidades más oscuras entre los 30 y 60 cm (Fig. 31B). Así como la presencia de raíces finas, gruesas y hojas con diferente grado de descomposición.

En la UM Dzilam WWF 2, el núcleo de sedimento solamente se observó una capa de materia orgánica en los 0 a 8 cm, con tonalidad de café oscuro (Fig. 31C). En el resto del núcleo se observan tonalidades grisáceas.

En la UM Dzilam Las Bocas el núcleo posee materia orgánica visible en la totalidad de su extensión, con tonos más oscuros en la fracción superior a los 56 cm, así como la presencia de raíces, finas, medianas y gruesas, y restos de hojas (Fig. 31D).

En la UM San Felipe solo se colectaron núcleos entre los 35 y 54 cm de profundidad, ya que a dicha profundidad se encontró laja¹. *In situ* se observó materia orgánica visible en los primeros 10 cm, y en el resto del núcleo la presencia de raíces finas y restos de hojas (Fig. 31E).

¹ Piedra calcárea de extrema dureza que puede encontrarse de forma superficial en Yucatán.



Figura 31. Suelo colectado en las UM de manglar: Dzilam Pueblo (A), Dzilam WWF (B), Dzilam Las Bocas (C) y San Felipe (D) en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

En la UM El Cuyo, se observan tonalidades grisáceas en la totalidad del núcleo con materia orgánica visible en los primeros 10 cm. La presencia de restos orgánicos como raíces y hojas fueron escasos en el sitio (Fig. 32A).

En la UM Río Lagartos, se tuvo la presencia de restos orgánicos (raíces gruesas y hojas) en la totalidad del núcleo, con mayor contenido visible en los primeros 60 cm (Fig. 32B).

En la UM Chiquilá, se registró materia orgánica visible en los primeros 42 cm, con presencia de restos de hojas, raíces finas y gruesas en la totalidad del núcleo (Fig. 32C).

En la UM Chiquilá 2, hay presencia de material orgánico en los primeros 10 cm, mientras que en el resto del núcleo este se registró en menor proporción (Fig. 32D).



Figura 32. Suelo colectado en las UM de manglar: Río Lagartos (A), El Cuyo (B), Chiquilá (C) y Chiquilá 2 (D) en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Fotografías: Laboratorio de Producción Primaria – Cinvestav Mérida.

En los núcleos de suelo donde se observan coloraciones oscuras mezcladas con coloraciones muy claras (beige o gris claro) (Fig.31A, D y E, 32A) puede ser un indicador del impacto de eventos meteorológicos o antrópicos en el área, los cuales influyen en la acumulación o pérdida de materia orgánica en el suelo.

3.2 Peso húmedo

El peso húmedo promedio de las muestras de suelo registrados en las UM varía entre 177 y 277 g (Fig. 33). Los valores más altos se registraron en la UM El Cuyo (277 ± 58 g), seguido por la UM WWF 2 2 (244.7 ± 36 g) y UM Chiquilá 2 (213 ± 33 g). Mientras que, los valores más bajos se registraron en la UM Dzilam WWF (117 ± 49 g).

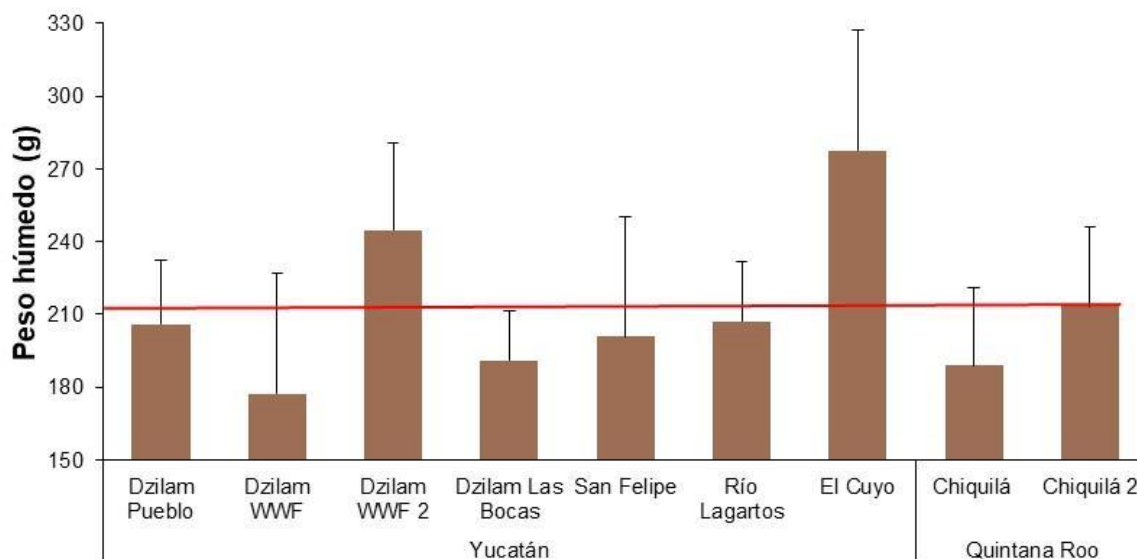


Figura 33. Peso húmedo promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

3.3 Peso seco

El peso seco promedio de las muestras de suelo registradas en las UM varía entre 50.95 y 209 g (Fig. 34). Los valores más altos se registraron en las UM El Cuyo (209 ± 46.4), Dzilam WWF 2 (128 ± 52.6 g) y Chiquilá 2 (114.18 ± 37.62 g). Los valores más bajos registrados fueron en la UM Dzilam Las Bocas (50.95 ± 15.11 g).

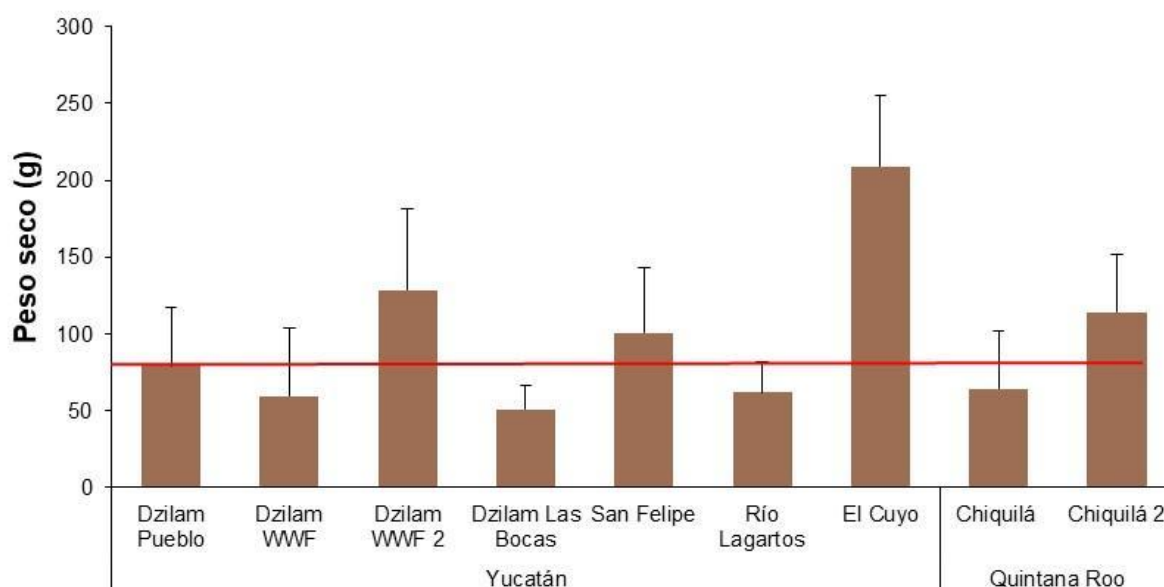


Figura 34. Peso seco promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. La línea roja representa el promedio total.

3.4 Porcentaje de humedad

En cuanto a la relación entre el peso húmedo y seco, el porcentaje de humedad promedio de las muestras de suelo de las UM varía entre 47.72 y 73.80 % (Fig. 35). Los valores más altos registrados fueron en las UM de Dzilam Las Bocas (73.80 ± 5.43 %) y Río Lagartos (70.70 ± 6.14 %). Mientras que los valores más bajos se registraron en El Cuyo (24.72 ± 1.84 %). El bajo porcentaje de humedad en los suelos de la UM de El Cuyo se relaciona con el tipo de suelo que es principalmente arenoso, el cual tiene una baja capacidad de retención de agua y la drena más rápidamente, en contraste con Dzilam Las Bocas que posee suelos principalmente arcillosos-limosos que retienen agua durante más tiempo.

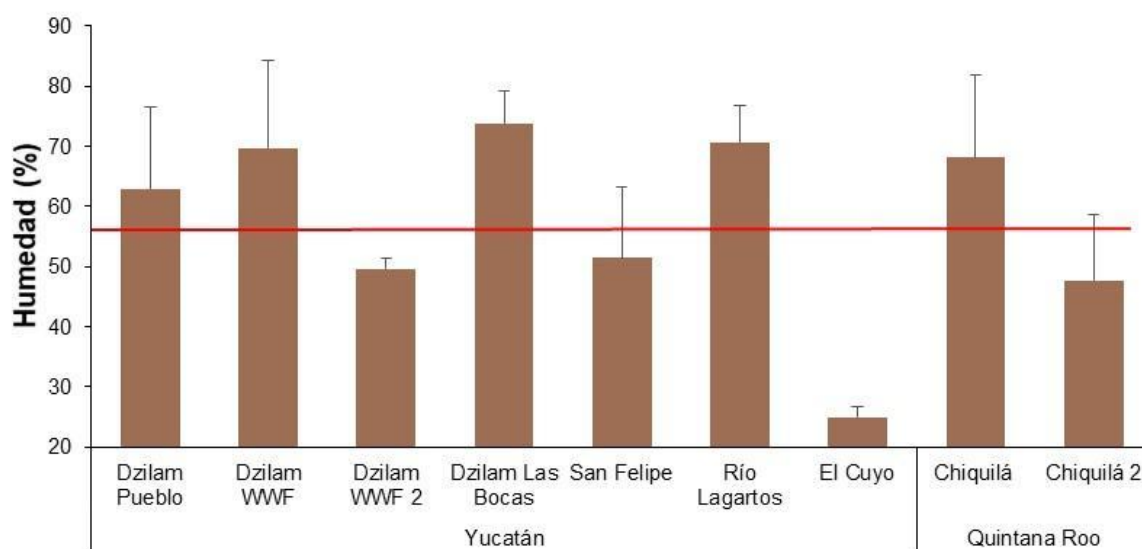


Figura 35. Porcentaje de humedad promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

3.5 Densidad aparente

La densidad aparente promedio registrada en las UM varía entre 0.47 y 1.93 g cm⁻³ (Fig. 36). Los valores más altos se registraron en la UM El Cuyo (1.93 ± 0.36 g cm⁻³), seguido por Chiquilá 2 (1.05 ± 0.24 g cm⁻³). Los valores más bajos se registraron en Dzilam Las Bocas (0.47 ± 0.14 g cm⁻³) y Dzilam WWF (0.55 ± 0.39 g cm⁻³).

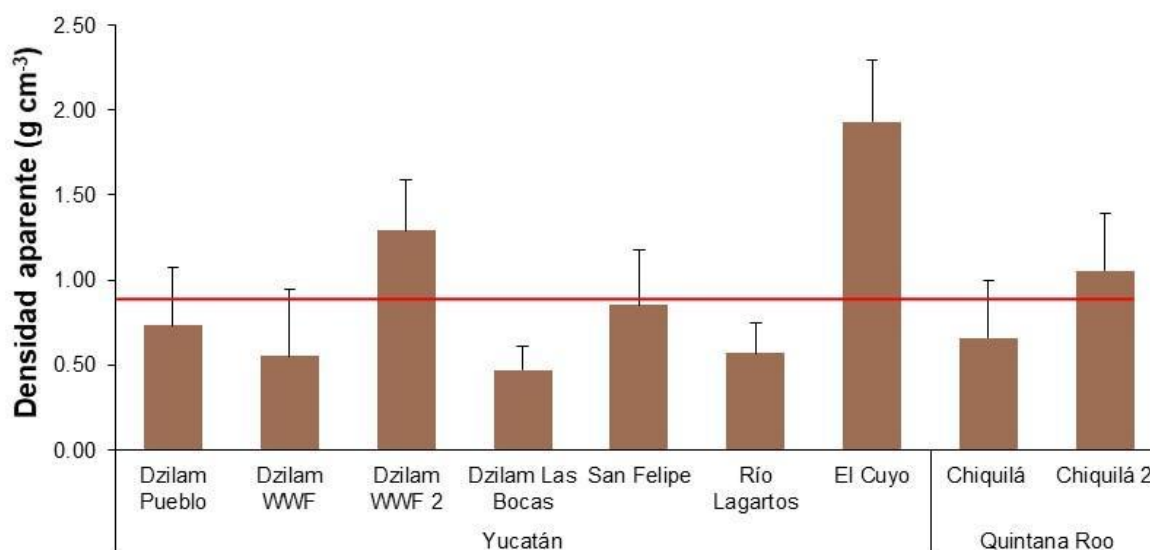


Figura 36. Densidad aparente promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

3.5 Carbono total

El porcentaje de carbono total promedio de las muestras de suelo de las 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán es de 16.5 ± 3.3 %, los valores oscilan entre 12.68 y 20.72 % (Fig. 37). Los valores más altos se registraron en las UM Río Lagartos (20.72 ± 3.29 %) y Dzilam Las Bocas (18.53 ± 2.85 %). Los valores más bajos corresponden a la UM El Cuyo (11.90 ± 0.33 %). Río Lagartos registró los suelos con menor DA, lo que podría relacionarse con su mayor porcentaje de carbono total, en contraste con El Cuyo registró que mayor DA, lo que se podría relacionar con su menor porcentaje de Carbono total.

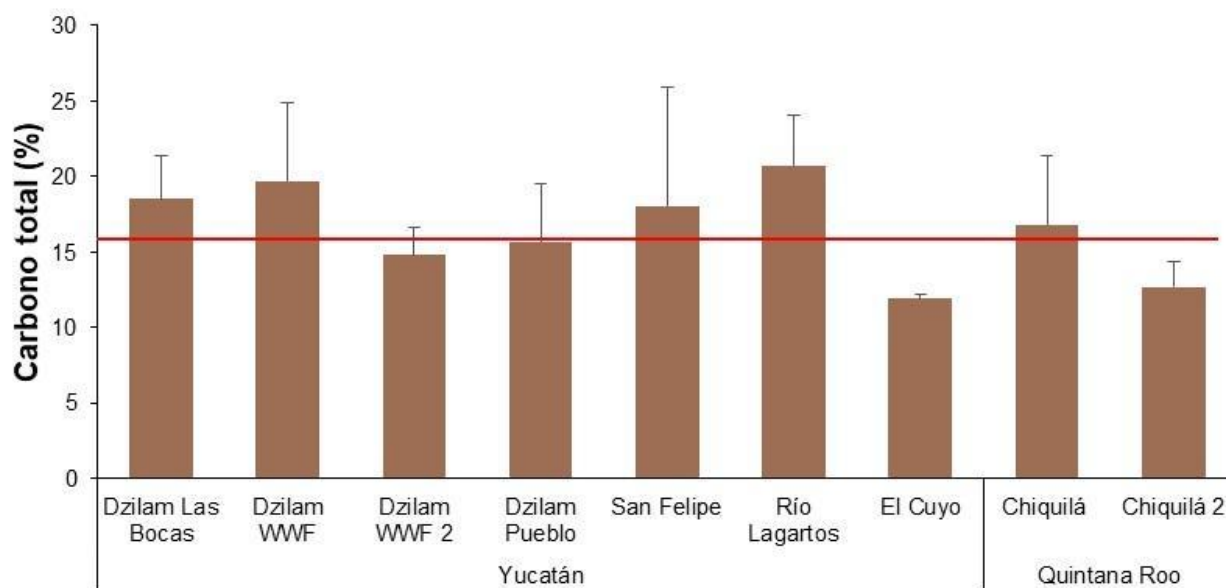


Figura 37. Porcentaje de carbono total promedio en suelo correspondiente en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total

3.6 Carbono orgánico

El promedio de carbono orgánico en el sitio Norte de la Península de Yucatán es de 11.2 ± 2.9 %. El porcentaje de carbono orgánico promedio en suelo de las UM varía entre 7.54 y 14.65 (Fig. 38). Los valores más altos se registraron en las UM Río Lagartos (14.65 ± 3.56 %) y Dzilam WWF (14.33 ± 6.02 %). El valor más bajo corresponde a la UM El Cuyo (6.51 ± 3.56 %).

El contenido de carbono orgánico menor en las UM de Dzilam pueblo, Dzilam WWF 2, El Cuyo y Chiquilá 2, podrían estar relacionadas con las características específicas del sitio como la hidrología, en Dzilam Pueblo, al ser cercano a la zona urbana y estar ubicado en un área continuamente afectado por eventos meteorológicos. La UM WWF 2 es un área de manglar degradado por lo cual no solamente en la vegetación se ha afectado, también en el contenido de carbono orgánico se ha perdido. El Cuyo registró suelos muy arenosos y densos con poco contenido de carbono orgánico. Chiquilá registra suelos densos y con bajo porcentaje de humedad, y la mayor parte de materia orgánica se localizó en la parte superficial del núcleo lo que podría relacionarse con algún evento meteorológico en años pasados (tormentas tropicales y huracanes) que derivan en la caída de hojas y restos orgánicos que son acumulados en el suelo. Dicha acumulación pudo ser producto de las tormentas y huracanes (Cristóbal, por ejemplo) del 2020, el año con mayor número de eventos hidrometeorológicos para el Golfo de México y el Caribe (Herrera-Silveira et al., 2022b). Sin embargo, para poder saber con exactitud el tiempo de acumulación se tendrían que realizar análisis con radioisótopos (^{210}Pb).

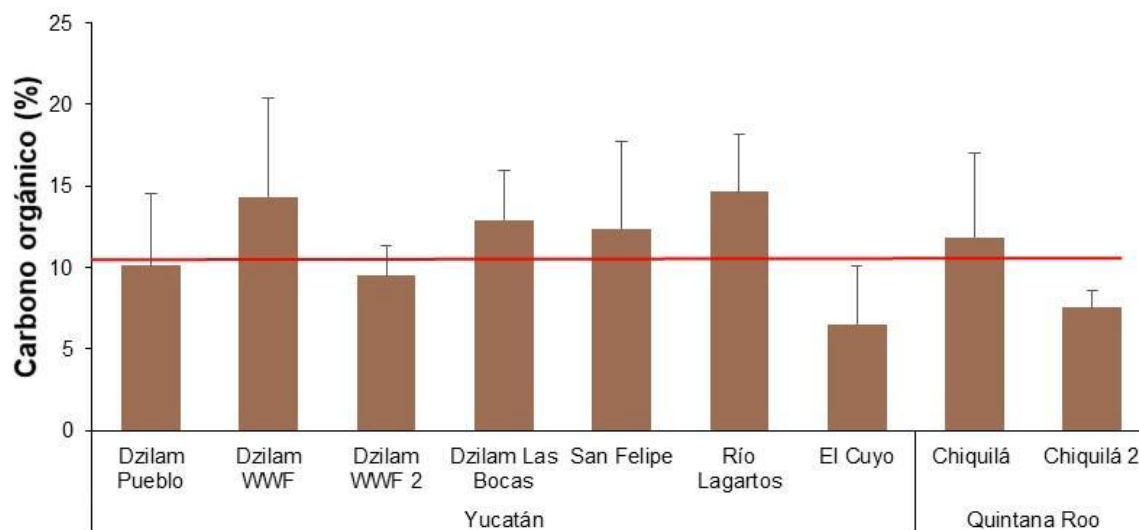


Figura 38. Porcentaje de carbono orgánico promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

3.7 Carbono inorgánico

El porcentaje de carbono inorgánico promedio en suelo de las UM varía entre 4.96 y 6.70 (Fig. 39). Los valores más altos corresponden a las UM Río Lagartos (6.70 ± 1.09) y San Felipe (5.69 ± 3.26 %). Mientras que los valores más bajos se registraron en la UM Chiquilá (4.96 ± 0.8 %) y Chiquilá 2 (5.1 ± 0.69 %). El porcentaje promedio de carbono inorgánico en el sitio Norte de la Península de Yucatán es de 5.5 ± 0.57 %. Se observa que el porcentaje de Carbono inorgánico en las UM, no registra gran variabilidad en comparación del carbono orgánico.

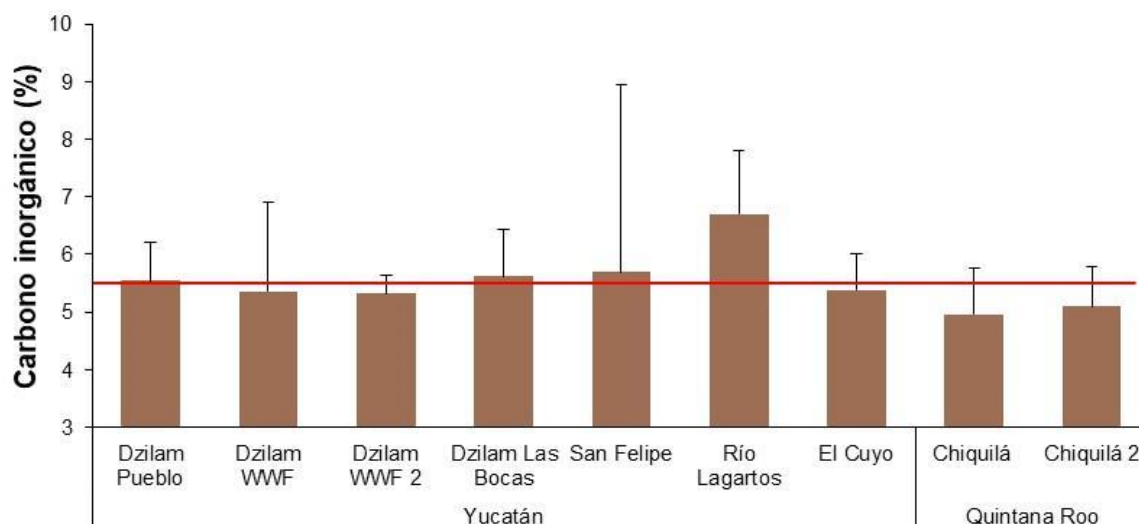


Figura 39. Porcentaje de carbono inorgánico promedio en suelo en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

3.8 Nitrógeno total

El porcentaje de nitrógeno total promedio en suelo de las UM varía entre 0.84 y 1.71 (Fig. 40). Los valores más altos se registraron en las UM Dzilam WWF (1.71 ± 0.67 %) y Dzilam Las Bocas (1.33 ± 0.34 %). Los valores más bajos corresponden a la UM WWF 2 (0.41 ± 0.18 %). Las características de los suelos en la UM de WWF y WWF 2 son evidentes, el primero con mayor cantidad de materia orgánica, y el segundo con menor cantidad, por lo que estas características influyen en el porcentaje de nitrógeno en el suelo.

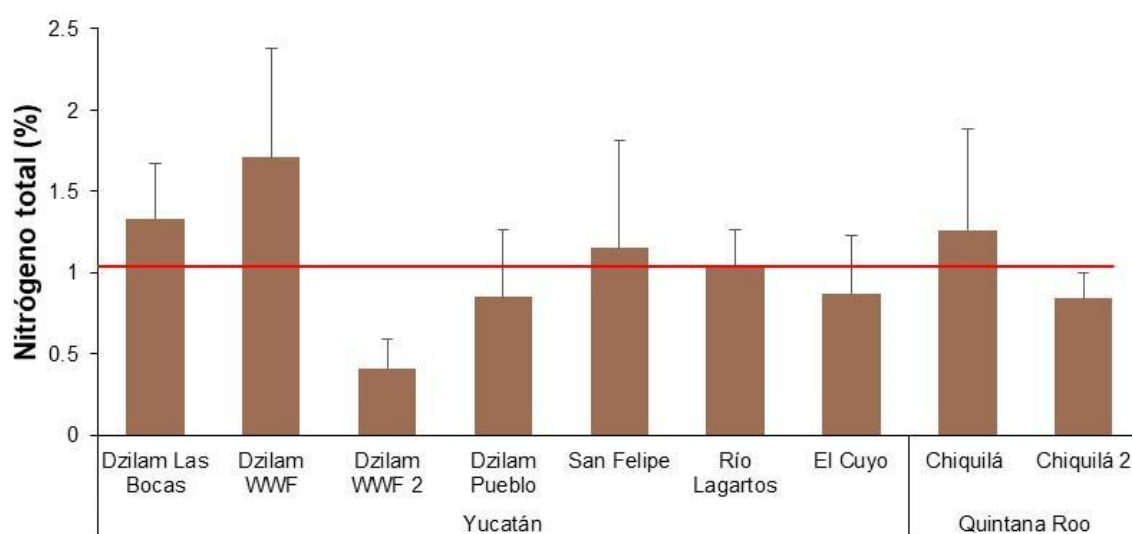


Figura 40. Porcentaje de nitrógeno total promedio en suelo correspondiente a la temporada de lluvias en 8 UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán. Las barras representan la desviación estándar. La línea roja representa el promedio total.

VII. CONCLUSIONES

Las características de la vegetación en las UM en el sitio Norte de la Península de Yucatán registran heterogeneidad a lo largo de la costa, sin embargo, espacialmente no se identifican patrones de comportamiento en las variables estructurales analizadas. Estas son influenciadas por las características ambientales específicas de cada sitio, las cuales están relacionadas con el clima, geomorfología e hidrología, tanto regional como local.

Las alturas promedio oscilan entre 0.3 m a 7 m con DAP promedio de 3 a 10.5 cm. Los árboles más altos se encuentran en zonas con fuentes de agua permanentes (Dzilam, San Felipe, Chiquilá 2). Las especies de manglar registradas en las UM fueron *A. germinans*, *R.*

mangle, *L. racemosa* y *C. erectus*, cuya dominancia y estructura varía entre ellas. Respecto a las formas de vida se registraron tanto árboles (vivos y muertos) como arbustos. Con respecto a la regeneración natural, en las UM se mantiene una dinámica natural (individuos vivos y muertos) así como nuevos reclutas durante las diferentes temporadas.

El monitoreo de las variables fisicoquímicas del agua permitió identificar cambios, los cuales son influenciados tanto por eventos climáticos puntuales como la dinámica climática estacional. La salinidad promedio más alta se registró en la temporada de secas (44 UPS) y la más baja en nortes (35.6 UPS). Los valores de la temperatura entre temporadas climáticas oscilaron entre 27 °C a 28.4 °C. Con respecto al pH, los valores promedio por temporadas se registraron neutros a ligeramente básicos (7.03 a 7.2). Sin embargo, para el potencial redox, se registró variabilidad entre temporadas con suelos más reducidos en temporada de nortes (-285 mV) y menos reducidos en la temporada de lluvias (-241 mV). Las variables fisicoquímicas monitoreadas en este proyecto reflejan las características climáticas de la Península de Yucatán, y su relación con la hidrología de cada sitio. En este sentido, las variables fisicoquímicas del agua y las del suelo tienen relación con las características estructurales.

Con respecto a las características del suelo, la longitud de los núcleos de suelo osciló entre 35 y 90 cm. Los suelos colectados presentaron diferencias en las características como contenido de materia orgánica visible, tonalidades y presencia de raíces/conchuela, entre otros. El suelo de las UM con los tonos más oscuros (*proxy* de mayor contenido de materia orgánica) fueron Río Lagartos, Dzilam Las Bocas, Dzilam WWF y Chiquilá. La densidad aparente varió entre 0.47 y 1.95 g cm⁻³, los suelos más densos se registraron en la UM El Cuyo, y los de menor densidad en la UM Dzilam WWF.

La UM de Río Lagartos registró el valor porcentual más alto de carbono total, carbono orgánico e inorgánico. La UM de El Cuyo registró los valores más bajos en el contenido porcentual de carbono total y carbono orgánico. Mientras que, la UM Chiquilá registró el valor más bajo de carbono inorgánico. El porcentaje de nitrógeno total promedio en el suelo de las UM varía entre 0.84 y 1.71 %, con valores bajos en la UM WWF 2 y más altos en la UM WWF.

Las UM monitoreadas durante el proyecto UM001 "Caracterización y monitoreo del ecosistema de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY)" registraron alta heterogeneidad con respecto a sus características estructurales, fisicoquímicas del agua intersticial y del suelo poniendo en evidencia las diversidad de grados de conservación y funcionalidad de los manglares en los sitios de la costa norte de la Península de Yucatán. Se identificó que en las UM de Chiquilá el manglar fue talado, en la UM de San Felipe durante el último muestreo se observó que se utiliza de basurero (basura y animales muertos). Estas UM

podrían estar más expuestas a las afectaciones antropogénicas debido a su cercanía con las comunidades costeras, aumentando su vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático.

La caracterización y monitoreo de los manglares realizadas durante el presente proyecto representan aproximación para identificar las condiciones ambientales e impactos de los ecosistemas de manglar del sitio de interés Norte de la Península de Yucatán (NPY) a escala regional y temporal de corto plazo. La condición general de los sitios (conservado, degradado, en riesgo) observada como resultado de la interacción entre impactos climáticos y antrópicos, es resultado del seguimiento de variables en el tiempo y espacio. La toma de decisiones sin el apoyo de este tipo de estudios puede limitarse a un listado de buenos deseos. Las decisiones respecto a las acciones de manejo específicas de los sitios deben estar soportadas con datos, información y conocimiento *in situ*. Esta información puede ser ampliada espacial y temporalmente con herramientas de percepción remota, pero, la verificación con información local no puede ser sustituida.

VIII. REFERENCIAS

- Alongi, D. M. 2008. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76(1): 1-13.
- Alongi, D. M. 2009. The energetics of mangrove forests. Amsterdam, The Netherlands: Springer.
- Batlloori, E., J.L. Febles, y J. Díaz. 1999. Landscape change on Yucatan northwest coastal wetlands (1948-1991). *Human Ecology Review*. 6(1): 8-20.
- Bautista, F., Palacio, G., Ortiz-Pérez, M., Batllori-Sampedro, D., Castillo-González, M., 2005. El origen y manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán, en Bautista, F., Palacio, G. (eds.), *Caracterización y Manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*: México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, 33-58.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico: *Geomorphology* 135, 308-321
- Beers, L., Crooks, S., May, C., and Mak, M. 2019. Setting the foundations for zero net loss of the mangroves that underpin human wellbeing in the North Brazil Shelf LME: Blue Carbon Feasibility Assessment. Report by Conservation International and Silvestrum Climate Associates.

- Bengtsson, L. y Enell, M. 1986. Chemical analysis. In B.E. Berglund (Ed): Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology, Wiley, Chichester 423-445.
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Smith III, T. J., Twilley, R. R., y Rivera-Monroy, V. H. 2008. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global biogeochemical cycles* 22(2): 1-12.
- Campos-Ríos, G., y Durán, R. 1991. La vegetación de la Península de Yucatán. *Apuntes del Curso-Taller para maestros "El Jardín Botánico como Herramienta Didáctica"*, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, México, 23-35.
- Carrillo-Bastos, A., Elizalde-Rendón, E. M., Torrescano Valle, N., & Flores Ortiz, G. 2008. ADAPTACIÓN ANTE DISTURBIOS NATURALES, MANGLAR DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MÉXICO. *Foresta Veracruzana*, 10(1), 31-38.
- Cinco-Castro, S., & Herrera-Silveira, J. 2020. Vulnerability of mangrove ecosystems to climate change effects: The case of the Yucatan Peninsula. *Ocean & coastal management*, 192, 105196.
- CONABIO. 2007. Los Manglares de México: Estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo: 1era. Etapa, 8-9.
- CONABIO. 2021. Dzilam, Yucatán PY60. Sitio de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM). México.
- CONAGUA. 2020. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán*. Ciudad de México.
- Dean, W. E. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research* 44(1): 242-248.
- Euan-Avila, J.I. y G.S. Witter. 2002. Promoting Integrated Coastal Management in the Yucatan Peninsula, México. *Journal of Policy Studies*, 12:1-16.
- Frausto, O., Mattes, L., Ihl, T.J., Cervantes, A., Giese, S. 2008. Groundwater quality monitoring on northeast Yucatan Peninsula, Mexico, en 20th Salt Water Intrusion Meeting, June 23-27, Naples, Florida, USA, Proceedings Book, 80-83, <http://www.swim-site.nl/pdf/swim20/file099-102.pdf>

- Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., & Field, C. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. *Aquatic botan y*, 89(2), 237-250.
- Herrera-Silveira, J.A.; J. Ramírez y A. Zaldívar. 1998. Overview and characterization of the hydrology and primary producers communities of selected coastal lagoons of Yucatan, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1:353-372
- Herrera-Silveira, J. A. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos* 19: 94-108
- Herrera-Silveira, J. A., Morales-Ojeda, S. M., Medina-Gómez, I., Ramírez-Ramírez, J., Moreno, I. O., Teutli-Hernández, C., y Camacho-Rico, A. 2019. *Almacenes y flujos en lagunas costeras: laguna celestún*. Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono.
- Herrera-Silveira, J. A., Teutli-Hernández, C., Zaldívar-Jiménez, A., Pérez-Ceballos, R., Cortés-Balán, O., Osorio-Moreno, I., Ramírez-Ramírez, J., Caamal-Sosa, J., Andueza-Briceño, M. T., Torres, R. y H. Hernández-Aranda. 2014. Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: Península de Yucatán. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. FN009. México D. F.
- Herrera-Silveira, J.A., Teutli-Hernández, C., Pérez-Martínez, O.J., Mendoza- Martínez, J.E., Robles-Toral, P.J., Flores-Puerto, J.I., Castillo-Infante, F.R., Mora-Ortiz, T.J., Cortés-Esquivel, J.L., Cisneros-de la Cruz, D.J., Cinco-Castro, S., Huechacona-Ruiz, H., Us-Balam, H.G., Pech-Poot, E.Y., Ramírez-García, S.A., Aguilar-López, Y., Guerra-Cano, L., Ku May, R., Morales- Castellanos, J.A., Moreno Martínez, A. 2022a. Sitios potenciales para la restauración de manglares en la costa del estado de Yucatán. PMC/ CINVESTAV-IPN/ENES-Mérida / Klimat X, Mérida, México.
- Herrera-Silveira, J. A., Teutli Hernandez, C., Secaira-Fajardo, F., Braun, R., Bowman, J., Geselbracht, L., Musgrove, M., Rogers, M., Schmidt, J., Robles-Toral, P. J., Canul-Cabrera, J. A., & Guerra-Cano, L. 2022b. "Daños a los manglares causados por huracanes. Técnicas y costos de reparación tras una tormenta". The Nature Conservancy, Arlington, Virginia.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (eds). 2014. Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, Intergovernmental

- Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.
- Kauffman, J. B., Donato, D. C., y Adame, M. F. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Bogor, Indonesia: Cifor.
- Kauffman, J. B., y Donato, D. C. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass, and carbon stocks in mangrove forests. Bogor, Indonesia: Cifor.
- Lankford, R.R. 1977. Coastal lagoons of Mexico. Their origin and clasification, p. 182-215. In: Wiley, M. (Ed.). Estuarine Processes. Academic Press, Inc., Nueva York, 2: 428 pp.
- LANRESC. 2020. <https://lanresc.mx/observatorios/laguna-de-terminos/>.
- Lee, S. Y., J. H. Primavera, F. Dahdouh-Guebas, K. McKee, J. O. Bosire, S. Cannicci, K. Diele, F. Fromard, N. Koedam, y C. Marchand. 2014. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global Ecology and Biogeography* 23:726-743.
- Lovelock, C. E., Barbier, E., y Duarte, C. M. 2022. Tackling the mangrove restoration challenge. *PLoS biology*, 20(10), e3001836.
- Macintosh, D. J., & Ashton, E. C. (2002). A review of mangrove biodiversity conservation and management. Centre for tropical ecosystems research, University of Aarhus, Denmark.
- Menéndez, P., Losada, I. J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., & Beck, M. W. 2020. The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
- Molina, E., Marín Medina, A., Lapo Calderón, B., González, V. H., & Lemus, M. 2019. Mercurio en raíces aéreas y absorbentes de *Rhizophora Mangle* L. localizada en el litoral costero de la provincia de El Oro, Ecuador. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 807-814.
- Ortiz Pérez, M. A. y G. de la Lanza Espino. 2006. Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional, Serie Textos universitarios, Instituto de Geografía, UNAM, p. 138.
- Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R. R., Bone, D., Childers, D. L., Coronado-Molina, C., Feller, I. C., ... & Weil, E. 2004. A conceptual framework to develop long-term ecological research and management objectives in the wider Caribbean region. *BioScience*, 54(9), 843-856.
- Rodríguez Zúñiga M. T., E. Villeda Chávez, A. D. Vázquez-Lule, M. Bejarano, M. I. Cruz López, M. Olgún, S. A. Villela Gaytán, R. Flores (Coordinadores). 2018. Métodos para la

- caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. 272 pp.
- Scavia, D., J.C. Field, D.F. Boesch, R.W. Buddemeier, V. Burkett, D.R. Cayan, M. Fogarty, M.A. Harwell, R.W. Howarth, C. Mason, D.J. Reed, T.C. Royer, A.H. Sallenger and J.G. Titus. 2002. Climate Change Impacts on U.S. Coastal and Marine Ecosystems. *Estuaries*. 25: 149-164.
- Sievers, M., Brown, C. J., McGowan, J., Turschwell, M. P., Buelow, C. A., Holgate, B., ... y Connolly, R. M. 2023. Co-occurrence of biodiversity, carbon storage, coastal protection, and fish and invertebrate production to inform global mangrove conservation planning. *Science of the Total Environment*, 904, 166357.
- Sollins, P., Glassman, C., Paul, E., Swanston, C., Lajtha, K., Heil, J. W., Elliott, E. T. 1999. Soil carbon and nitrogen: pools and fractions. En: Standard soil methods for long-term ecological research (ed. Robertson, G). Oxford University Press New York, NY.
- Teutli-Hernández C., J.A. Herrera-Silveira, D.J. Cisneros-de la Cruz., R. Roman-Cuesta. 2020. Guía para la restauración ecológica de manglares: Lecciones aprendidas. Proyecto, Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A multi-level approach (SWAMP). CIFOR/CINVESTAV-IPN/UNAM-Sisal/PMC. 42pp.
- Twilley, R.R., R. Chen, and V.H. Rivera-Monroy. 1999. Formulating a succession model of mangrove wetlands in the Caribbean and Gulf of Mexico with emphasis on factors associated with global climate change. *Current Topics in Wetland Biogeochemistry*. 3: 118-141.
- Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Troche-Souza, C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J. A., Vázquez-Balderas, B., Cruz-López, M. I., y Ressler, R. 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 130 pp.
- Valiela, I., Bowen, J. L., & York, J. K. 2001. Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments: At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments. *Bioscience*, 51(10), 807-815.

- Vázquez-Lule, A.D., J. A. Alcántara-Maya y M. T. Rodríguez-Zúñiga. 2022. Caracterización del sitio de manglar PY71. Ría Lagartos (Las Coloradas), en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Actualización con datos a 2020. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, CDMX.
- Velázquez-Salazar S., Rodríguez-Zúñiga M.T., Alcántara-Maya J.A., Villeda-Chávez E., Valderrama-Landeros L., Troche-Souza C., Vázquez-Balderas B., Pérez-Espinosa I., Cruz-López M. I., Ressler R., De la Borbolla D. V. G., Paz O., Aguilar-Sierra V., Hruby F. y Muñoa-Coutiño J. H. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México CDMX. Pp. 168.
- Velázquez-Salazar S., Rodríguez-Zúñiga M.T., Alcántara-Maya J.A., Villeda-Chávez E., Valderrama-Landeros L., Troche-Souza C., Vázquez-Balderas B., Pérez-Espinosa I., Cruz-López M. I., Ressler R., De la Borbolla D. V. G., Paz O., Aguilar-Sierra V., Hruby F. y Muñoa-Coutiño J. H. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México CDMX. Pp. 168
- Yáñez-Arancibia, A., Twilley, R. R., & Lara-Domínguez, A. L. 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y bosques*, 4(2), 3-19.
- Zinck, J. A. 1988. *Physiography and Soils. Soil Survey Courses*, International Institute for Aerospace and Earth Sciences, ITC, Enschede.

ANEXO I

Fórmulas para la estimación de parámetros estructurales de manglar

Promedio = $\frac{\sum a}{n}$ donde $\sum a$ es la suma de todos los datos y n es la cantidad de datos

Porcentaje: valor de la parte / valor total * 100

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$$

Donde: σ =desviación estándar poblacional, N = tamaño de la población, x_i = cada valor de la población, μ = media poblacional

Área basal (m²): (DAP²) * 0.00007854

Área basal (m²/ha): AB (m²) / Área (ha)

Densidad: Número de individuos / Área

Frecuencia relativa: Frecuencia de la especie / Frecuencia total de especies * 100

Densidad relativa: Número de individuos por especie / Número total de individuos * 100

Dominancia relativa: Dominancia por especie / Dominancia total de especies * 100

Índice de valor de importancia (IVI): Suma de la frecuencia relativa, la densidad relativa y la dominancia relativa de la especie (Rodríguez-Zúñiga et al., 2018).

Índice de complejidad de Holdridge: ICH = (d) (a) (h) (s) / 1000

Donde: d = Número de árboles /0.1 ha, a = Área basal (m²/0.1ha), h = Altura del rodal (m) s = Número de especies (Holdridge, 1976).