



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD DE LA ESPECIE
RHIZOPHORA MANGLE EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA “LOS
PETENES” ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

para obtener el grado de:
MAESTRO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PRESENTA EL

Biól. José Guadalupe García Casanova

CODIRECTORAS

Dra. Fabiola S. Sosa Rodríguez
Dra. Claudia M. Agraz Hernández

ASESORA

Dra. Margarita E. Gallegos Martínez

Ciudad de México a 03 de marzo de 2021

Comité Tutorial

Co-director:

Dra. Fabiola S. Sosa Rodríguez. Departamento de Economía. División de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Co-director:

Dra. Claudia Maricusa Agraz Hernández. Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía México. Universidad Autónoma de Campeche

Co-asesor:

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

Agradecimientos

La Maestría en Energía y Medio Ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por lo que cuenta con apoyo de Consejo con el convenio 003893. El alumno agradece a CONACYT el apoyo brindado al recibir una beca de posgrado para cursar sus estudios de maestría. También agradezco a la Dra. Claudia Agraz por los datos facilitados en la tesis que fueron parte fundamental de la misma.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi madre María Socorro González Sosa, quien siempre fue mi mayor apoyo, quien siempre estuvo ahí guiándome, aconsejándome y regañándome cuando se necesitaba, gracias mamá, sin ti no lo podría haber hecho. Te amo y no sabes lo gratificante es saber que pudiste ser partícipe de este gran logro y que sé que ahora desde el cielo te sientes orgullosa de mi.

Agradezco a mi familia con quienes conté en todo momento y nunca dudaron que lo lograría, Mary, Tere, Nivia, Gloria, Manuel y a todos, quienes me echaron porras cuando más lo necesitaba, gracias por siempre estar ahí. También a mis amigos de toda la vida, Fabiola, José y a los nuevos que construí durante este periodo, Marco, Blanca, Angelica, Laura, Karen y a todos aquellos que de alguna u otra forma tuve la fortuna de coincidir y crear memorias. Finalmente agradezco a la Dra. Fabiola por su apoyo incondicional y su guía académica que sin duda son dignar de profunda admiración.

Índice general

Resumen	13
I. Introducción	15
II. Marco Teórico	21
1. El ecosistema manglar	21
1.1. Generalidades	21
1.2. Adaptaciones morfofisiológicas	22
1.2.1. Salinidad	22
1.2.2. Inundación	23
1.2.3. Reproducción y propagación	24
1.3. Condiciones ambientales del ecosistema	25
1.3.1. Zonación	26
1.3.2. Clasificación del manglar	28
1.3.2.1. Clasificación fisonómica de los manglares	28
1.3.2.2. Clasificación de los manglares por sus características	30
1.4. Especies de manglar	31
1.4.1. Especies de manglares en México	35
1.4.1.1. <i>Rhizophora mangle</i> L. (Mangle rojo)	35
1.4.1.2. <i>Avicennia germinans</i> (L.) L. (Mangle negro)	36
1.4.1.3. <i>Laguncularia racemosa</i> (L.) Gaertn. f. (Mangle blanco)	38
1.4.1.4. <i>Conocarpus erectus</i> L. (Mangle botoncillo)	39
1.5. Servicios ecosistémicos prestados por los manglares	40
1.6. Manglares en el Mundo	44
1.7. Manglares en México	46
1.7.1. Pérdida de manglar en México y en el mundo	48
1.8. Amenazas e impactos	50
1.9. Conclusiones del capítulo	53
2. Cambio climático y los manglares	54
2.1. Cambio climático mundial	54
2.2. Cambio climático en México	60
2.3. Efectos e impactos del cambio climático en los manglares	63
2.3.1. Incremento en la temperatura	65
2.3.2. Cambios en los patrones de precipitación	66
2.3.3. Aumento en el nivel del mar	67
2.3.4. Incremento en las concentraciones de CO ₂	68
2.3.5. Respuestas de los manglares al cambio climático	69
2.4. Estudios del impacto del cambio climático sobre los manglares	70
2.5. Conclusiones del capítulo	74
3. Vulnerabilidad al cambio climático	75
3.1. Concepto de vulnerabilidad al cambio climático	75
3.1.1. Exposición	79
3.1.2. Sensibilidad	81
3.1.3. Impacto potencial	82

3.1.4. Capacidad adaptativa	84
3.2. Modelo teórico de la vulnerabilidad de los manglares al cambio climático	86
3.3. Conclusiones del capítulo	88
III. Metodología	90
4. Zona de estudio	90
4.1. Componentes del concepto de vulnerabilidad climática potencial futura	93
4.1.1. Estimación del componente de exposición ante la variabilidad de la temperatura y precipitación	93
4.1.2. Estimación del componente de sensibilidad: salinidad, pH, redox y temperatura intersticial	97
4.1.3. Estimación del modelo de impacto potencial	99
4.2. Pasos para validar el modelo de sensibilidad	102
4.3. Selección y elaboración de escenarios climáticos	103
4.4. Conclusiones del capítulo	106
IV. Resultados	108
5. Escenarios de vulnerabilidad para <i>Rhizophora mangle</i> ante el cambio climático	108
5.1. Comportamiento histórico de la temperatura y precipitación en la RBLP	108
5.2. Comportamiento de las variables fisicoquímicas en Petén Río Verde	110
5.3. Comportamiento de las variables fisicoquímicas en Petén Neyac	114
5.4. Resultados de los modelos estimados	117
5.4.1. Sensibilidad a los parámetros fisicoquímicos de <i>R. mangle</i> en la RBLP	117
5.4.2. Sensibilidad de los parámetros fisicoquímicos bajo los escenarios climáticos	120
5.5. Escenarios de vulnerabilidad de <i>Rhizophora mangle</i> con respecto a sus límites de tolerancia en Peten Rio Verde	130
5.5.1. PH	131
5.5.2. Salinidad	132
5.5.3. Potencial redox	134
5.6. Escenarios de vulnerabilidad de <i>Rhizophora mangle</i> con respecto a sus límites de tolerancia en Peten Neyac	135
5.6.1. PH	136
5.6.2. Salinidad	137
5.6.3. Potencial redox	139
V. Discusión	140
VI. Conclusión	145
VII. Referencias	147
ANEXO I. Modelo de sensibilidad y pruebas de validación	158
1. Resultados de la regresión	158
1.1. Regresiones para Peten Neyac	158
1.2. Regresiones para Peten Rio Verde	162

Índice de figuras

1. Tipos de raíces en manglares	24
2. Clasificación funcional del manglar	29
3. Distribución mundial de los manglares y especies presentes	44
4. Comparativa de estimaciones de cobertura mundial de manglar	45
5. Mapa de regionalización de los manglares en México	47
6. Tendencia de pérdida del manglar en México entre 1981 y 2015	50
7. Cadena de impactos del cambio climático sobre los manglares	65
8. Diagrama de la vulnerabilidad y sus componentes según Polsky (2007)	78
9. Impactos directos e indirectos que forman parte del componente de exposición	80
10. Esquema de la interacción entre el componente de exposición y sensibilidad para originar el impacto potencial	83
11. Ejemplo representativo de cada componente de la vulnerabilidad enfocado al ecosistema manglar	83
12. Modelo teórico conceptual de vulnerabilidad. En donde se incluyó el concepto de “Vulnerabilidad climática potencial” como un estimador aproximado de la vulnerabilidad	87
13. Cobertura de manglar en la Reserva de la Biosfera “Los Petenes”	92
14. Interfaz del visualizador de conjunto de datos GIOVANNI de la NASA	95
15. Capa de interpolación IDW con la ubicación espacial de las	

estaciones y su respectivo valor de precipitación	96
16. Localización espacial de los sitios de muestreo	98
17. Método de selección por percentiles utilizado	104
18. Escenarios climáticos de la Reserva de la Biosfera Petenes	105
19. Comportamiento de la temperatura atmosférica en la zona de estudio entre los años 2009-2016	109
20. Comportamiento de la precipitación en la zona de estudio dentro del periodo 2009-2016	109
21. Comportamiento del pH en el periodo 2009-2016 en Peten Río Verde	111
22. Comportamiento de la T° agua intersticial en el periodo 2009-2016 en Peten Río Verde	112
23. Comportamiento del REDOX en el periodo 2009-2016 en Peten Río Verde	113
24. Comportamiento de la salinidad en el periodo 2009-2016 en Peten Río Verde	113
25. Comportamiento del pH en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac	114
26. Comportamiento de la T° agua intersticial en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac	115
27. Comportamiento del REDOX en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac	116
28. Comportamiento de la salinidad en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac	117
29. Grafica de distribución normal y calculo de los limites inferior y superior	130
30. Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Río Verde	131
31. Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a	

sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Río Verde	132
32. Escenarios climáticos de la salinidad y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla interno de Peten Río Verde.	133
33. Escenarios de la salinidad y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Río Verde	133
34. Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla Peten Río Verde	134
35. Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Río Verde	135
36. Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac	136
37. Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac	137
38. Escenarios climáticos de la salinidad y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac	138
39. Escenarios climáticos de la salinidad y su comportamiento con respecto	

a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac	138
40. Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac	139
41. Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac	140

Índice de tablas

1. Número de familias y especies de manglar	31
2. Principales especies de manglar	32
3. Especies de manglares en el mundo por regiones geográficas	34
4. Servicios ecosistémicos prestados por los manglares	43
5. Países con mayor área de manglar del mundo.	46
6. Regionalización del ecosistema manglar en la República Mexicana y la cobertura por estado	48
7. Principales impactos sobre el ecosistema manglar	51
8. Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar.	57
9. Principales efectos del cambio climático mundial.	59
10. Efectos directos e indirectos del cambio climático en los manglares.	64
11. Principales respuestas del manglar ante los efectos del cambio climático.	70
12. Componentes de exposición, sensibilidad e impactos potenciales en los manglares.	86
13. Estaciones meteorológicas en el sitio de estudio.	94
14. Parcelas analizadas en el estudio	99
15. Escenarios de cambio climático seleccionados.	105
16. Clasificación de la salinidad y potencial redox en el agua intersticial en los bosques de manglares de Petenes	110
17. Significación estadística de los valores climáticos respecto a los valores físicoquímicos en los sitios de muestreo.	118
18. Coeficientes de sensibilidad (β) de las variables físicoquímicas	

ante la precipitación y temperatura en ambos sitios de muestreo.	119
19. Pruebas de validación del modelo Logit.	120
20. Comportamiento de las variables fisicoquímicas bajo el efecto combinado de distintos escenarios climáticos, en 3 horizontes de tiempo en Peten Neyac	121
21. Comportamiento de las variables fisicoquímicas bajo el efecto combinado de distintos escenarios climáticos, en 3 horizontes de tiempo en Rio Verde	122
22. Valores esperados totales para el escenario 2015-2039 en Peten Neyac.	124
23. Valores esperados totales para el escenario 2045-2069 en Peten Neyac.	125
24. Valores esperados totales para el escenario 2075-2099 en Peten Neyac.	126
25. Valores esperados totales para el escenario 2015-2039 en Peten Río Verde.	127
26. Valores esperados totales para el escenario 2045-2069 en Peten Río Verde.	128
27. Valores esperados totales para el escenario 2075-2099 en Peten Río Verde.	129
28. Límites mínimos y máximos de los parámetros fisicoquímicos en Peten Rio Verde.	130
29. Límites mínimos y máximos de los parámetros fisicoquímicos en Peten Neyac.	135

Resumen

En el presente estudio se construyeron y analizaron escenarios de vulnerabilidad de la especie *Rhizophora mangle* ante los efectos del cambio climático, resultado de las variaciones en la temperatura y la precipitación. Para dicho análisis, se construyeron modelos de sensibilidad (modelos Logit) que relaciona la variabilidad climática histórica (i.e., precipitación y temperatura media) de 2009 al 2016, con respecto a las variables fisicoquímicas en la zona de estudio como el pH, el potencial redox, la salinidad y la temperatura del agua intersticial.

Para conocer en qué medida el cambio climático podría afectar la especie *Rhizophora mangle*, a partir de los resultados de la sensibilidad de esta especie, se construyeron escenarios de vulnerabilidad que consideraron los resultados de cinco modelos de cambio climático para tres horizontes de tiempo (i.e., 2015-2039, 2045-2099, 2075-2099). Los resultados obtenidos muestran que los efectos del cambio climático serán de mayor magnitud a largo plazo (2075-2099), en particular para aquellos modelos con un RCP 8.5, asociados a escenarios en donde el crecimiento económico se basa en la quema de combustibles fósiles. Esto principalmente con el modelo GFDL-CM3, el cual proyecta los mayores impactos para la salud y conservación de los manglares en la Reserva de la Biosfera Los Petenes (RBLP).

Por otra parte, se establece que los parámetros fisicoquímicos del agua intersticial sobre los cuales el cambio climático posiblemente tendrá más impacto son el potencial redox y la salinidad, ya que ambos parámetros mostraron la mayor sensibilidad ante las variaciones proyectadas en la temperatura y la precipitación. La alteración de estos parámetros fisicoquímicos en la planta por el cambio climático tendrá consecuencias negativas, ya que esta especie tendrá que adaptarse a nuevos estresores mediante procesos fisiológicos que involucran un mayor gasto energético e hídrico. Por ejemplo, el aumento de la salinidad es una consecuencia del incremento en la temperatura y disminución de lluvias, además de modificaciones en la microtopografía derivadas de una disminución en el acarreo de sedimentos por la precipitación o la construcción de infraestructura. En el caso del potencial redox, éste se podría modificar principalmente por el aumento relativo del nivel mar y el aumento de la temperatura. Esto ocasionará que la superficie de inundación del manglar sea mayor tanto en área como en altura, imposibilitando a la especie *Rhizophora mangle* respirar. Lo anterior, favorecerá a la caída de hojas para evitar la pérdida de agua, y estas hojas serán el combustible para los organismos encargados de llevar a cabo la

respiración anaeróbica. A consecuencia de esto, el pH también se verá modificado, ya que este tipo de respiración genera compuestos ácidos que contribuyen a su acidificación. La acción conjunta de estos procesos estresores ponen en riesgo la salud e integridad del ecosistema. Es por ello, que esta investigación es de utilidad para conocer los posibles efectos que el cambio climático podría tener sobre el comportamiento de las variables climáticas y fisicoquímicas a mediano y largo plazo, lo cual permitirá poder reflexionar sobre las mejores estrategias para hacer frente al cambio climático y sus impactos en estos ecosistemas.

I. Introducción

El ecosistema manglar se ha identificado como uno de los ecosistemas más vulnerables ante los efectos del cambio climático, ya que dentro de los principales factores que dictan su crecimiento, salud y desarrollo destacan las variables climáticas; por lo tanto, alteraciones en estos patrones tendrán un impacto severo sobre las comunidades de manglar. El cambio climático con base en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ha sido definido, como: *‘un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a las actividades antropogénicas, que modifican la composición de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera por la quema de combustibles fósiles y la deforestación; este cambio se suma a la variabilidad natural del clima’* (CMNUCC, 1999; IPCC, 2018).

Dentro de los posibles escenarios que se manejan a nivel mundial (y que se abordarán en el capítulo 3, inciso 3.4), el aumento en la concentración de los GEI que se prevé, podría producir una reducción en la eficiencia con la cual la Tierra expulsa la energía recibida al espacio; como consecuencia, la temperatura de la superficie se elevará al retener más energía, lo cual modificará el balance radiativo del planeta, que es lo que mantiene estable el clima (Martínez et al., 2005). Además de las variaciones esperadas en la temperatura, el cambio climático también repercutirá en otras variables climáticas como la precipitación, la radiación y la evapotranspiración, que son variables que conforman los principales componentes climáticos. Las variaciones de estos parámetros son capaces de generar numerosos impactos en el manglar, al traducirse en cambios en la fisicoquímica del agua y el suelo, tales como alteraciones en el pH, la salinidad y el potencial redox (Mitra, 2007). Por ejemplo, cambios en la variabilidad de la precipitación afectarán la disponibilidad de agua tanto subterránea como superficial, la entrada de sedimentos y el reclutamiento de nuevos propágulos en el manglar. En el caso de los cambios en la temperatura, éstos modificarán la salinidad, y por ende, también la productividad del manglar. Por otro lado, el incremento del oleaje, el viento y las tormentas traerá consigo un daño forestal o la destrucción del mismo, además de favorecer la erosión o sofocación por el exceso de sedimentos (Ellison, 2012). Por último, el aumento en el nivel del mar, que tendrá efectos sobre la salinidad y el pH, podría provocar la migración del manglar tierra adentro, así como la muerte de otras especies de manglares menos tolerantes a la salinidad o que no hayan podido migrar tierra adentro por la presencia de barreras físicas (Ellison, 2015).

Los humedales, en especial los manglares, eran considerados como lugares insalubres y criaderos de fauna nociva, pero actualmente este concepto ha cambiado radicalmente y ahora se sabe que este ecosistema es uno de los más productivos y también con mayor número de servicios ecosistémicos prestados (e.g., protección a la costa contra huracanes, lugar de crianza de especies comerciales y prevención de la erosión costera). Estos servicios ecosistémicos benefician en buena medida a la población de las costas del mundo donde se localiza este ecosistema, principalmente a lo largo y ancho de la banda tropical/subtropical del planeta; aunque si las variables climáticas son las óptimas para su crecimiento, éstos pueden presentarse más allá de estas bandas.

Al inicio del siglo XXI, los manglares comprendían una extensión de 152,361 km² (Spalding et al., 2010); la mayor cantidad de manglares se encuentran ubicados en Asia (42%), seguidos por África (20%), América del Norte y Central (15%), Oceanía (12%) y América del Sur (11%). Se estima que aproximadamente 75% de los manglares están concentrados en 15 países, entre ellos, Indonesia, Australia, Brasil, México y Nigeria (Giri et al., 2011).

A pesar de todos los beneficios que estos ecosistemas proporcionan a la humanidad, la tasa de pérdida del manglar continua, estimándose que 20% del área total comprendida por los manglares ha desaparecido, lo cual equivale a 3.6 millones de hectáreas (ha) (FAO, 2007); en particular, en los países desarrollados, la tasa de pérdida de manglar alcanza una cifra de entre 35 y 86% en el último cuarto de siglo (Duke et al., 2007).

En el caso de México, es el cuarto país con mayor cobertura de manglar en el mundo, estando sólo por debajo de Indonesia, Australia y Brasil (Spalding et al., 2010). La CONABIO en su reporte de 2015 sobre manglares, estima que la cobertura de manglar en el país asciende a 7,755.55 km², siendo la región del país con más manglar la Península de Yucatán que comprende los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán; esta zona suma un total de 421,926 ha (Troche et al., 2016). Debido a la cantidad de manglar en México, la pérdida de este ecosistema es un gran problema ambiental que está afectando a nuestro país, estimándose una tasa de pérdida anual de 2.5%; de continuar los cambios en el uso del suelo en las zonas costeras del país, se calcula que para el año 2025 se podría perder entre 40 y 50% de la superficie total del manglar (INE, 2005). Por consiguiente, es prioritario implementar estrategias que eviten a toda costa que estos ecosistemas continúen degradándose o desapareciendo, dada su relevancia para el bienestar de la

población que habita en la zona costera, así como por el gran número de servicios ecosistémicos que prestan.

Esta investigación se enfoca en la Reserva de la Biosfera “Los Petenes” (RBLP), la cual se encuentra localizada en el estado de Campeche, entidad que cuenta con 198,853 ha de manglar; siendo la entidad federativa con la mayor cobertura de manglar en el país (Troche et al., 2016). La RBLP es una larga y estrecha franja costera con porciones terrestre y marina, localizada en la zona costera del estado; queda comprendida entre los 20°51’30” y 19°49’00” de latitud norte y los 90°45’15” y 90°20’00” de longitud oeste, con una extensión de 282,857 ha, de las cuales 51,026 ha corresponden al ecosistema manglar. En esta zona se identifican diversas especies entre las que se encuentran los tipos manglar de franja, manglar chaparro y manglar de cuenca (Villalobos, 2004). Las especies representativas de estos tipos de manglar son: *Rhizophora mangle* (tabche’), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (tsakolkom) y *Conocarpus erectus* (canche); estas especies son mangles de tipo arbóreo bajo con una altura promedio de 7.7 m (Vázquez-Lule et. al, 2009).

La importancia de esta reserva de la biosfera radica principalmente en las condiciones ambientales en las que se desarrollan las especies vegetales que ahí se presentan y la gran diversidad de flora y fauna. Se han estimado por lo menos 473 especies vegetales registradas: 22 endémicas para la Península, 4 especies amenazadas, 2 raras y 5 bajo protección especial. En cuanto a la fauna de la zona, se estiman 449 especies, de las cuales: 295 son aves (tanto migratorias como residentes), 65 de mamíferos terrestres, 68 de peces y 21 de reptiles, además de las muchas especies de invertebrados terrestres y acuáticos.

La Secretaría de Ecología del Estado de Campeche reporta que frente a las costas de los Petenes y Celestún circulan organismos representativos de 29 especies de cetáceos y una especie de sirénido (el manatí); de ellos los más comunes son las ballenas piloto, el cachalote enano, el cachalote pigmeo, y la ballena esperma o cachalote (Villalobos, 2004). En este sentido, es evidente que la zona cuenta con una amplia biodiversidad, por lo tanto, tiene una importancia ecológica que debe ser conservada y protegida para que continúe brindando sus múltiples servicios ecosistémicos tanto a la población como a los ecosistemas vecinos.

La RBLP, al ser un ambiente costero es vulnerable ante amenazas naturales como lo son las tormentas tropicales y huracanes, así como la propia dinámica costera. Sin embargo, también

está siendo amenazada por causas antrópicas como la sobreexplotación de los recursos pesqueros, la fragmentación de los hábitats, la cacería furtiva, la alteración de la dinámica hidrológica por infraestructura carretera o hídrica inadecuada para humedales, la tala clandestina, la extracción de agua de manantiales para entubamiento, el divertimiento de este recurso hacia asentamientos humanos con creciente demanda de agua, los incendios, y la contaminación de las aguas costeras por la falta de un sistema integral de drenaje y por la falta de tratamiento de las aguas residuales generadas. Además de las anteriores amenazas, los bosques de manglar presentes en la zona de estudio son altamente vulnerables a los efectos del cambio climático, en particular al incremento en el nivel medio del mar (Ortiz Pérez & Méndez Linares, 1999), la ocurrencia de más frecuentes e intensas inundaciones y tormentas tropicales, la variación en la precipitación y en la temperatura terrestre y oceánica, la erosión costera, la acidificación del mar, y las modificaciones del patrón de circulación litoral (Yáñez-Arancibia et al., 2014). Estas amenazas comprometen la salud del manglar, y con ello su integridad estructural, así como su capacidad para dar soporte a funciones ecológicas esenciales y prestar diversos servicios ecosistémicos entre los que destacan: (a) zonas de protección, crianza y desove de especies comerciales como peces (i.e., bagre, lisa, mojarra, pargo, robalo y sábalo), camarones, cangrejos, langostinos y moluscos; (b) disminuir el impacto del acarreo de sedimentos y contaminantes por las corrientes de agua de ríos y arroyos sobre los arrecifes de coral; (c) ser barreras naturales de protección que retienen la erosión causada por vientos y mareas, ayudando así a mantener la línea de costa y a sostener la arena sobre las playas; (d) ser sumideros de dióxido de carbono y captura de gases de efecto invernadero (GEI), que funcionan como filtros biológicos en la retención y procesamiento de algunos fertilizantes utilizados en la agricultura y en la filtración de agua; y (f) favorecer el abastecimiento de mantos freáticos (Rodríguez-Zúñiga et. al, 2013)

A pesar de ser una zona tan amenazada, su grado de conservación es sobresaliente, estimándose que la pérdida de manglar en la reserva entre los años 1976 y 2010 alcanza las 2,806 ha (CONABIO, 2009), por eso su protección y conservación deben ser una prioridad nacional y se tiene que traducir en medidas y acciones que favorezcan su conservación.

Bajo este contexto, es pertinente reflexionar sobre la vulnerabilidad del manglar, en específico de la especie *Rhizophora mangle*, en la Reserva de la Biosfera “Los Petenes” ante los posibles efectos del cambio climático. Con este fin, los objetivos de esta investigación son: (1)

hacer un breve diagnóstico de la situación de los manglares en el mundo y en México, con énfasis en la zona de estudio; (2) identificar los impactos directos e indirectos que tiene el cambio climático sobre los manglares; (3) construir un modelo teórico-metodológico para analizar los impactos del cambio climático; en particular, en la especie *Rhizophora mangle*, dado que es la especie más abundante en América, además de ser la que se distribuye en la mayor parte del país, comprendiendo una gran extensión territorial en la zona de estudio; (4) determinar los impactos potenciales del cambio climático en la especie *Rhizophora mangle* por medio de la construcción de escenarios y la estimación de la vulnerabilidad mediante un modelo de sensibilidad; y finalmente, (5) hacer recomendaciones para fortalecer la capacidad adaptativa de este ecosistema.

Con este fin, la presente investigación se centrará en las reflexiones teóricas del concepto de vulnerabilidad, entendiéndose este concepto como “*el grado o nivel en que un sistema es susceptible para hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática* (Parry et al., 2007). Cabe destacar, que los niveles de vulnerabilidad de la especie *Rhizophora mangle*, dependerán de la magnitud y rapidez con la que se presenten las variaciones de los principales parámetros climáticos, los niveles de exposición que enfrente un sistema, así como de su sensibilidad y capacidad de adaptación” (Parry et al., 2007). En este sentido, existen cuatro componentes que determinan el nivel de susceptibilidad de un sistema al cambio climático: (1) la exposición a estresores, (2) la sensibilidad a dichos estresores, (3) el impacto potencial generado por la exposición y sensibilidad, y (4) la capacidad de adaptación del ecosistema a dicho impacto.

La exposición se refiere a los estresores extrínsecos a un sistema como son la magnitud y la tasa de cambio que las especies o sistemas son probables que experimenten (Adger, 2006); entre los factores típicos de exposición al cambio climático se encuentran: la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración, y el balance hídrico. En el caso de la sensibilidad, ésta se refiere a las características innatas de las especies o los sistemas, que determinan en qué grado un sistema podría ser afectado o beneficiado como resultado de la exposición (Turner et al., 2003). El concepto de impacto potencial involucra la relación entre la exposición y la sensibilidad (Frietzsche, 2014). Finalmente, la capacidad adaptativa está relacionada con la habilidad de las especies o sistemas para acondicionarse o hacer frente a los impactos del cambio climático con las mínimas disrupciones (Ellison, 2015).

Con base a estos conceptos, se analizará la vulnerabilidad de la especie *Rhizophora mangle* en la RBLP, a partir de estimar la sensibilidad de esta especie a las variaciones históricas en la precipitación y la temperatura; dichas variaciones influyen en la salinidad, el pH y el potencial redox. Por otro lado, el componente de exposición está determinado por las variaciones en la precipitación y la temperatura que proyectan los escenarios de cambio climático para la zona de estudio para tres horizontes de tiempo (2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099).

Con base en los resultados de la sensibilidad histórica de la especie de manglar analizada, y considerando los niveles de exposición al cambio climático, se estimarán las implicaciones para la salud que esta especie tendría ante las variaciones en los parámetros analizados (i.e., pH, redox, salinidad, temperatura del agua intersticial), basándose en los límites máximos y mínimos de tolerancia de esta especie de mangle. Para ello, se estimó un modelo logístico, el cual tiene la ventaja de que puede estimar elasticidades que indican cómo se comporta un sistema ante impactos de estresores exógenos (Chaix et al., 2004); aunado a lo anterior, para hacer el modelo más robusto, se realizaron pruebas de autocorrelación y heterocedasticidad, con el fin de tener una mayor certidumbre en los resultados. Dichos resultados sentarán las bases para conocer los potenciales impactos del cambio climático sobre el mangle rojo de la RBLP, y así implementar acciones que coadyuven a la protección de esta especie prioritaria para México, así como mantener los servicios ecosistémicos que brinda.

II. Marco Teórico

1. El ecosistema manglar

El término “Mangle” deriva de un vocablo guaraní que significa árbol torcido (Agraz-Hernández et al., 2006). Por su parte “manglares” es un término no taxonómico que se refiere tanto a los árboles como a las comunidades que forman, que van desde una estrecha franjas de árboles atrofiados a grande bosques fragmentados en miles de parches, mediante el entrelazado de canales de un delta (Spalding et al., 2010). En todo el mundo, los manglares se distribuyen en el trópico y subtrópico a lo largo de línea costera; se pueden encontrar en estuarios protegidos, así como a lo largo de la orilla de ríos y lagunas costeras. Estos ecosistemas prosperan mejor en zonas donde la lluvia o el caudal de un río diluye el agua salada, aunque son capaces de sobrevivir en condiciones ambientales que para otras comunidades sería imposible la supervivencia, debido a la presencia de una alta salinidad, la ocurrencia de frecuentes inundación y fuertes vientos, y variaciones no mayores a 10°C a nivel geográfico, además de suelos inestables, dinámicos y anaeróbicos. (Kathiresan y Bingham, 2001).

Las especies de manglar que forman bosques densos y a menudo monoespecíficos son consideradas “especies fundadoras” que controlan las poblaciones y la dinámica de los ecosistemas, incluyendo flujos de energía y nutrientes (Polidoro et al., 2010). A continuación, se detallan las características de estos ecosistemas, precisando sus adaptaciones morfológicas y las variedades existentes a nivel mundial y en México.

1.1 Generalidades

El manglar consiste en formaciones leñosas y densas, arbustivas o arbóreas y perenes (UNESCO, 1973). Su altura puede ir de los 2 a los 25 m, y se compone de algunas especies fanerógamas sin la presencia de plantas herbáceas o trepadoras, y ocasionalmente con epifitas y parásitas. Los bosques de manglar equivalen al 1% de los bosques tropicales del mundo, son de los ecosistemas que por su funcionamiento son de los más productivos e importantes, en especial para las comunidades costeras ya que hacen uso de los bienes y servicios ecosistémicos que los

manglares les brindan (Giri, et al., 2011). Son especies sombrilla, ya que, debido a su importancia, cualquier acción de conservación debe ser enfocada a esta, puesto que numerosas especies de peces, crustáceos, anfibios, reptiles y aves son dependientes de esta; de igual forma, es fundamental para el correcto funcionamiento de ecosistemas vecinos.

1.2 Adaptaciones morfofisiológicas

Este ecosistema ha desarrollado características morfológicas y ecofisiológicas que lo hacen un ecosistema estructural y funcionalmente único, ya que son capaces de vivir en condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto en el agua por la captación del oxígeno atmosférico mediante las lenticelas ubicadas en el sistema radicular aéreo, los embriones vivíparos y criptovivíparos, la dispersión mareal de sus propágulos, la tasa rápida de producción de dosel, la frecuente ausencia del sotobosque, los vasos densamente distribuidos, los mecanismos altamente eficientes para la retención de nutrientes, y la capacidad de hacer frente a la salinidad y para mantener el equilibrio de agua y carbono (Alongi, 2002).

1.2.1 Salinidad

Los manglares están divididos en dos tipos dependiendo de su adaptación a la salinidad en: (1) halófitas, que crecen y completan su ciclo de vida en hábitats con altas concentraciones de sal; y (2) las no halófitas, las cuales crecen en un hábitat no salino. La particularidad de los manglares es que son halófitos facultativos, es decir que son capaces de crecer tanto en un ambiente salobre, como en uno de agua dulce (Ball, 1988). Para ello, los manglares presentan numerosas estrategias para anular o tolerar el estrés por salinidad; esto mediante la exclusión de sal a través de las raíces o glándulas especializadas en las hojas, además de ser capaces de diluir las sales mediante el incremento de agua en sus tejidos y la eliminación de órganos saturados en sal. Para tolerar la salinidad utiliza la compartimentalización de sales en la vacuola, lo cual remueve iones tóxicos desde las porciones metabólicas activas de la célula; así como el sintetizar los solutos orgánicos para equilibrar los iones inorgánicos.

Como adaptaciones a nivel estructural-anatómico para hacer frente al ambiente salino, los manglares tienen estomas en la parte inferior de la superficie de la hoja, así como una gruesa cutícula en esta misma, con lo que disminuye la pérdida de agua, que, junto a las glándulas de sal

en la epidermis de la hoja, permiten eliminar el exceso de sal y regular la entrada de ésta en el organismo (Feller, 2002).

1.2.2 Inundación

Por su ubicación, los manglares experimentan estrés por la frecuencia y amplitud de las mareas, provocando periodos de inundación prolongados y poca aireación del sistema radicular y la acumulación de fitotoxinas (McKee, 1993). La inundación mareal hace que el suelo de los manglares sea típicamente anaerobio, lo cual reduce la respiración radicular y la producción de energía necesaria para la absorción de nutrientes, así como el metabolismo anabólico y los procesos de transporte. Las estrategias para nulificar estos efectos y permitir la respiración efectiva de la planta, así como la eliminación de compuestos tóxicos volátiles en las raíces son la presencia de parénquima con abundantes espacios de aire y el desarrollo de raíces aéreas especializadas en el transporte de oxígeno desde la atmosfera hasta las raíces subterráneas, creciendo en suelo anaeróbico. Entre los diversos tipos de raíces aéreas en manglar encontramos:

- a) Raíces zanco: Son ramificaciones curvadas que sirven como soporte y crecen fuera del tronco para unirse al suelo a cierta distancia. Las raíces aéreas secundarias pueden hacer otra curvatura. El género más representativo con este tipo de raíces es *Rhizophora* (Figura 1, a).
- b) Neumatóforos: Son extensiones ascendentes provenientes del subsuelo al aire por encima que han evolucionado en varios manglares, siendo *Avicennia*, *Laguncularia* y *Sonneratia* de las más notables. En el primero, los neumatóforos tienen forma de lápiz estrecho; mientras que en el último, con un engrosamiento secundario llegan a ser ligeramente altos y cónicos (Figura 1, b).
- c) Raíces de rodilla: Son extrusiones redondeadas tipo nudo, las cuales como los neumatóforos, se extienden hacia arriba desde las raíces del subsuelo; este tipo lo desarrollan *Burghiera* y *Ceriops* (Figura 1, c).
- d) Raíces contrafuerte: Son comunes en árboles tropicales, cuya función es como soporte estructural para brindar estabilidad al árbol en suelos con sedimentos blandos a lo largo de la costa o en lodos inestables, permitiéndoles resistir a tormentas y corrientes (Figura 1, d).

Todas ellas poseen lenticelas que son aberturas presentes en el tejido secundario que cubre tanto la raíces como tallos y permiten la entrada de oxígeno sobre el suelo (Gill & Tomlinson, 1977). Las lenticelas están presentes en 70% del volumen de la raíz (Hogarth, 2007).



Fig. 1 Tipos de sistema radicular en manglares a) Zanco (Foto: www.mangroves.at), b) Neumatóforos (Foto: Tim Laman, 2012), c) Raíces rodilla (Foto: www.mangroves.at), d) Raíces contrafuerte (Foto: www.mangroves.at)

1.2.3 Reproducción y propagación

El establecimiento de nuevas plantas de manglar en suelos inestables y lavados por las mareas representa un reto adaptativo para los manglares. Se han descrito cuatro métodos de reproducción en manglares: viviparismo, criptoviviparismo, germinación normal en suelo y propagación vegetativa. El viviparismo está presente en cinco de las mayores familias de manglar, en las cuales los árboles madre liberan plantas en crecimiento en lugar de sólo semillas o frutos; ésta es una adaptación a hábitats marinos. Las especies con este tipo de reproducción permanecen unidas a la planta madre por un año; mientras que las criptoviviparas, por ejemplo, sólo lo hacen por uno o dos meses (Bhosale & Mulik, 1991).

El viviparismo como patrón de reproducción puede dotar a las semillas de cierta tolerancia a la salinidad, antes de que éstas sean liberadas por el árbol madre (Smith & Snedaker, 1995). Sin embargo, estos propágulos carecen de longevidad, aunque para la mayoría de las especies pueden flotar y permanecer viables por algún tiempo. Generalmente, los propágulos liberados por los manglares se establecen cerca de la planta madre y la dispersión a larga distancia raramente se encuentra. Es probable que, la alta inversión por parte de los manglares por tener un mayor número de propágulos sea principalmente para permitir que las plántulas en crecimiento tomen raíces y se establezcan rápidamente, esta adaptación le permite evitar ser arrastradas o desarraigadas por las mareas (Spalding et al., 2010). El tiempo con el que se lleve a cabo la reproducción depende de las condiciones del ambiente local y puede variar ampliamente sobre el rango de una especie (Kathiresan & Bingham, 2001).

1.3 Condiciones ambientales del ecosistema

Las condiciones ambientales de los manglares se caracterizan por presentar variaciones en la salinidad, dependiendo de la influencia marina y los aportes del agua dulce vía superficial por la marea, así como de acuerdo con las condiciones del sedimento y el agua intersticial reducidas, y los suelos inestables. Estas condiciones favorecen a que la distribución de los manglares esté limitada a nivel geográfico en los trópicos y subtropicos, debido a las características de la temperatura (Tomlinson, 1986).

Los manglares se producen en las planicies costeras de baja altura, donde los gradientes topográficos son pequeños y en donde la marea repetidamente inunda el suelo, pero con el suelo bien drenado fomenta el crecimiento de plantas de manglar (Kathiresan & Bingham, 2001). Por otra parte, si las condiciones ambientales son hostiles, ya sea en aridez o salinidad, sólo pueden sobrevivir unas cuantas especies, y éstas tienen formaciones de arbustos o arboles enanos que alcanzan los 3 metros de altura (Spalding et al., 2010). La altura y densidad del dosel depende de variables como el clima, la topografía, así como la distancia con respecto a la perturbación humana. Las raíces aéreas pueden estar limitadas en su desarrollo en sitios perturbados o con poca disponibilidad de nutrientes, en donde las plantas están mal desarrolladas y cubiertas de maleza.

Los suelos en manglares están compuestos principalmente por limo y arcillas, y en menor proporción por fracciones gruesas o arenosas de sedimentos; la presencia de turbas de materia orgánica en descomposición se presenta en función del origen del sedimento que llegue al humedal.

Generalmente, los suelos son ácidos y anóxicos, con importantes variaciones en el contenido de sales, por ende, el potencial de óxido-reducción va desde lo aeróbico (+700mV) hasta lo extremadamente anaeróbico (-300mV), lo cual provee un amplio espectro de valor que influencia la química del suelo (Hogarth, 2007).

Las mayores extensiones de manglar son encontradas en las deltas de los ríos, ya que es un ambiente donde los ríos fluyen directamente hacia el océano y han creado nuevas extensiones de tierra, mediante la deposición activa de nuevos sedimentos. Esto provoca que éstas zonas sean rápidamente colonizadas por el manglar y puedan formar amplias comunidades. Los estuarios son otros de los ambientes en los que se establecen los manglares, los cuales son lugares que se han formado donde el mar ha inundado las partes bajas de un antiguo valle pluvial, y en donde hay una deposición activa de sedimentos que propician la colonización de esta formación. Tanto los deltas como los estuarios poseen caudales fluviales durante todo el año, y en donde los caudales son suficientes, aún habrá presencia de marea pero exclusivamente de agua dulce, generando que los manglares sean bosques mareales de agua dulce. Las lagunas costeras también son ambientes propicios para el desarrollo de manglares, ya que al desarrollarse detrás de los cordones de litoral e islas forman barreras que hacen que la acción de las olas sea mínima, y en aquellas zonas más húmedas, la salinidad puede ser considerablemente más baja que en el océano. También, encontramos manglares a lo largo de costas abiertas, en donde la energía de las olas es baja y hay una producción adecuada de sedimentos. Ejemplo de estos lugares son las bahías, mares cerrados y lugares, donde amplias plataformas menos profundas reducen la energía de las olas y permiten a los sedimentos mantenerse estables. Es raro identificar manglares que se encuentren tierra adentro, sin ninguna conexión hacia el mar. Hay algunos lugares donde se pueden encontrar bajo estas condiciones, sobre todo flanqueando estanques salinos, los cuales pueden llegar a tener conexiones indirectas con el mar mediante flujos subterráneos (Spalding et al., 2010).

1.3.1 Zonación

La variación en la presencia y abundancia de especies es observada frecuentemente en función de gradientes ambientales en varios tipos de ecosistemas. Los manglares muestran distintos patrones de zonación en diferentes regiones geográficas. Esta variación en la composición florística de las comunidades de manglares significa que, los patrones de distribución de las especies en la zona intermareal variarán sustancialmente entre regiones geográficas, incluso la zonación también

varía a una escala local, y es que la ocurrencia de especies puede variar incluso en un mismo estuario. Por ejemplo, las especies que se encuentran en la porción extrema hacia el mar pueden estar ausente en las cabeceras del mismo. Aunque la zonación se refiere a aquellos patrones originados por la segregación de diferentes especies, las diferencias en estatura y productividad a través de gradientes ambientales hacen que los patrones puedan ser diferenciados (Feller, 2002).

La zonación de los manglares ha tenido diferentes interpretaciones, la primera como consecuencia de la sucesión ecológica y que fue propuesta por Chapman (1976), que proponía la existencia de una sucesión cíclica como una forma más realista de conceptualizar la sucesión en ecosistemas costeros. En esta teoría, Chapman (1976) conceptualizaba como sucesión a dos o más etapas en manglares que podían oscilar hacia adelante y hacia atrás con respecto al mar, bajo la influencia de un factor ambiental como un huracán o incendio. Esta etapa de sucesión podría ser mantenida por la recurrencia de un estrés ambiental. Cuando el factor estresante ya no se presentaba, la sucesión pasaba al siguiente conjunto de etapas que también podrían ser cíclicas, y este proceso podría ser revertido si este factor volviera a tener efecto sobre el ecosistema, así proponía una sucesión de sucesiones. Posteriormente, Lugo (1980) amplió la idea de Chapman e incluyó una serie de factores que también pueden incidir en la sucesión de manglares como son la temperatura del aire, la salinidad del suelo, la profundidad de la capa freática, y la disponibilidad de nutrientes. Además de estos factores, también se encuentran las fuerzas disruptivas del ambiente como huracanes, oleaje, e incendios, las cuales fueron actúan como catalizadores de las sucesiones o pueden detenerla. Cada una de las sucesiones se da a lo largo de gradientes de estrés; muchas de estas tensiones son factores externos que no están bajo el control de la comunidad.

Asimismo, se sugiere que la zonación en manglares está en función de la respuesta diferencial que tienen estos diversos gradientes a factores fisiológicos como son: la salinidad, el nivel de inundación, los niveles de marea, y su relación con el potencial de dispersión de propágulos; además de las propiedades del suelo como la concentración de los nutrientes. Por ende, la zonación es una consecuencia conjunta del potencial de dispersión de sus propágulos, de la respuesta de las especies a factores abióticos, y de las interacciones competitivas intraespecíficas (López-Portillo, 2002). Debido a lo diverso de los ambientes en manglares, es difícil presentar una visión constante de la posición relativa de cada especie en términos de requerimientos ecológicos.

1.3.2 Clasificación del manglar

La variedad de interacciones fisicoquímicas y bióticas producen diversas fisonomías en las comunidades de manglar, las cuales difieren tanto en función como en atributos forestales. Estos atributos funcionales y estructurales pueden ser usados para clasificar a los manglares. Los atributos que resultan más útiles para su clasificación son aquellas características fisicoquímicas, funcionales, estructurales o florísticas y la selección apropiada de estos atributos dependerá de cuál sea el propósito de la clasificación (Saenger, 2002).

1.3.2.1 Clasificación fisonómica de los manglares.

Lugo & Snedaker (1974) propusieron una clasificación detallada del ecosistema manglar basada en sus procesos geomorfológicos e hidrológicos. Esta clasificación consta de 6 tipos de comunidades, las cuales tienen sus propias variables ambientales características, como son el tipo de suelo y profundidad, el rango de salinidad del suelo, y las tasas de descarga de marea. Además, cada tipo de comunidad tiene rangos característicos de producción primaria, descomposición de hojarasca y exportación de carbono, junto a diferencias en la tasa de reciclaje de nutrientes y componentes de comunidad, así como de los atributos forestales. Las 6 categorías se enlistan a continuación:

- a) *Manglares ribereños*, crecen en las llanuras de inundación de los ríos, donde predomina el flujo lateral de agua de baja salinidad. Las condiciones de crecimiento son perfectas para esta comunidad. El bosque entero está usualmente inundado por mareas diarias; este tipo de bosque está generalmente detrás de los manglares tipo franja, y durante la temporada húmeda, el nivel del agua sube y la salinidad baja, debido al drenaje terrestre en tierras altas (Figura 2a).
- b) *Manglares de cuenca*, crecen en depresiones tierra adentro, donde los flujos de agua son lentos y predominan el flujo vertical estacional sobre el flujo lateral (Figura 2b).
- c) *Manglares de franja*, crecen en el borde del mar u otros cuerpos de agua directamente expuestos a fluctuaciones verticales del agua. Este tipo de bosque se define mejor a lo largo de los litorales, donde las elevaciones son superiores a la marea alta (Figura 2c).
- d) *Manglares hamaca*, están más elevados que los manglares de cuenca, y por lo tanto, a menudo aislados, pero aún reciben influencia mareal. Son manglares pequeños, debido a

los escasos nutrientes, y a la alta salinidad, además de ser sensibles al fuego y drenado (Figura 2d).

- e) *Manglares de inundación*, son islas de manglares sobrelavados, esto debido a que su posición y alineación obstruyen el flujo de marea, y como resultado, este bosque se lava en exceso en periodos de marea alta. Las velocidades de marea entrantes son altas por lo que son lo suficientemente fuertes para llevarse consigo cualquier residuo orgánico suelto; los manglares de este tipo pueden medir hasta 7 metros (Figura 2e).
- f) *Manglares enanos*, crecen en ambientes extremos, con temperaturas más frías, baja exportación orgánica y sumamente sensibles a estrés adicional, al que ya toleran. Estos manglares rara vez crecen más de 1.5 m (Figura 2f). Estos tipos de manglar se diferencian en el nivel de salinidad que son capaces de tolerar y en la disponibilidad de nutrientes. En este sentido, el tipo ribereño o de estuario son los más complejos, debido a lo irregular que se distribuye el agua dulce y salada (Medina, 1999).

La Figura 2 ejemplifica cada uno de los tipos de manglar teniendo en cuenta su posición con respecto al cuerpo de agua y la influencia de la marea sobre cada uno. Tomando como base esta clasificación se considera que *Rhizophora mangle* en la RBLP es predominante del tipo franja, con zonación al borde, localizándose en la parte más externa y con mayor contacto con el mar.

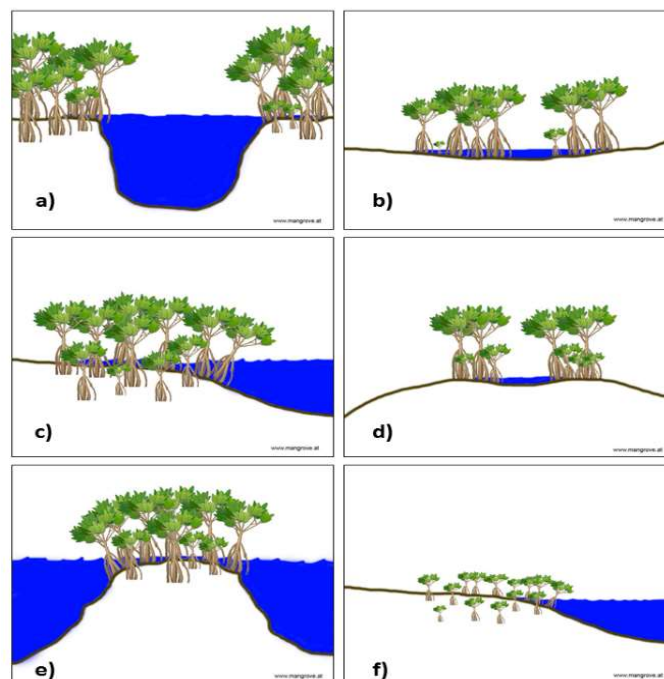


Fig. 2 Clasificación funcional del manglar

1.3.2.2 Clasificación de los manglares por sus características.

Con base en las características y adaptaciones morfológicas, Tomlinson (1986) dividió a los manglares en tres grupos: (a) elementos mayores o manglares verdaderos, (b) manglares menores y (c) especies asociadas al manglar.

a. Manglares verdaderos

Se les considera manglares verdaderos a aquellos manglares que cumplen con las siguientes características:

- 1) Sólo se encuentran en el ambiente manglar, es decir no están presentes dentro de otras comunidades terrestres.
- 2) Juegan un mayor papel en la estructura de la comunidad y puede formar bosques puros.
- 3) Poseen especializaciones morfológicas como las raíces aéreas y mecanismos especializados para el intercambio gaseoso, así como el tipo de reproducción vivípara.
- 4) Tienen mecanismos fisiológicos para la exclusión o excreción de sal.
- 5) Están aislados taxonómicamente de parientes terrestres, al menos a un nivel genérico, y a menudo al de familia y subfamilia.

b. Manglares menores

Los elementos minoritarios del manglar se distinguen por su carente habilidad para formar un elemento notable de la vegetación. Generalmente ocupan los hábitats perimetrales, y rara vez forman comunidades puras. Las especies menores de manglar contribuyen con 20 especies adicionales en 11 géneros y 11 familias las cuales pueden o no presentar un sistema de raíces aéreas.

c. Especies asociadas al manglar

Por su parte, los asociados del manglar son plantas que aprovechan que los manglares proveen de un sustrato apto para su desarrollo; pueden ser trepadoras, cuyas raíces se anclan al suelo, pero utilizan el tronco del manglar como soporte para así poder extender sus brotes hacia los

manglares más cerca del mar. Otras plantas son epifitas sin conexión con el suelo, como los líquenes, helechos y orquídea y bromelias.

1.4 Especies de manglar

El número de especies de manglares en el mundo ha sido estimado por distintos autores a lo largo de los años, cada uno de ellos obtuvo diferentes cifras, debido principalmente a la forma en la que se clasifican y a la metodología utilizada. Además de la aparición y uso de herramientas tecnológicas que facilitan la identificación de especies, se han identificado un número de familias que oscila entre 16 y 20; mientras que a nivel de especie los estudios reportan entre 40 y 73 especies (Tabla 1).

Tabla 1. *Número de familias y especies de manglar*

Autor	Familias y especies
Hogarth (2007)	16 familias 55 especies
Alongi (2009)	20 familias 70 especies
Feller (2002)	16 familias 40-50 especies
Spalding (1997)	20 familias 70 especies
Spalding (2010)	20 familias 73 especies
Waisel (1972)	8 familias 12 géneros

Por su parte, las familias con mayor número de especies en el mundo son Rhizophoraceae, Avicenniaceae y Sonneratiaceae (Ver Tabla 2), las primeras dos presentes en todas las regiones de distribución en el mundo, mientras que Sonneratiaceae sólo se encuentra en la región Indo-Pacífico del Este. Para fines de esta investigación es de mayor importancia la familia Rhizophoraceae, ya que en ésta se encuentra el objeto de estudio de esta investigación.

Tabla 2. Principales especies de manglar

Familia	Género	Número de Especies
Componentes mayores		
Avicenniaceae	<i>Avicennia</i>	8
Combretaceae	<i>Laguncularia</i>	1
	<i>Lumnitzera</i>	2
Palmae	<i>Nypa</i>	1
Rhizophoraceae	<i>Bruguiera</i>	6
	<i>Ceriops</i>	2
	<i>Kandelia</i>	2
	<i>Rhizophora</i>	8
Sonneratiaceae	<i>Sonneratia</i>	5
Componentes menores		
Bombacaceae	<i>Camptostenom</i>	2
Euphorbiaceae	<i>Excoecaria</i>	2
Lythraceae	<i>Pempis</i>	1
Meliaceae	<i>Xylocarpus</i>	2
Myrsinaceae	<i>Aegiceras</i>	2
Myrtaceae	<i>Osbornia</i>	1
Pellicieraceae	<i>Pelliciera</i>	1
Plumbaginaceae	<i>Aegialitis</i>	2
Pteridaceae	<i>Acrostichum</i>	3
Rubiaceae	<i>Scyphiphora</i>	1
Sterculiaceae	<i>Heritiera</i>	3

Fuente: Tomlinson (1986).

Autores como Duke (2015) menciona que hay 32 géneros de plantas conocidas por tener representantes de manglares y que tienen una especialización para el hábitat de las marismas; de esos, 17 géneros se encuentran exclusivamente en el hábitat de manglar, entre los que se encuentran: *Acrostichum*, *Aegialitis*, *Aegiceras*, *Avicennia*, *Bruguiera*, *Camptostemon*, *Ceriops*, *Conocarpus*, *Kandelia*, *Laguncularia*, *Lumnitzera*, *Nypa*, *Osbornia*, *Pelliciera*, *Rhizophora*, *Scyphiphora* y *Sonneratia*. Los otros 15 géneros incluyen especies que no son manglar como: *Acanthus*, *Barringtonia*, *Brownlowia*, *Crenea*, *Cynometra*, *Diospyros*, *Dolichandrone*, *Excoecaria*, *Heritiera*, *Mora*, *Muelleria*, *Pavonia*, *Pemphis*, *Tabebuia*, y *Xylocarpus*.

Por otro lado, existen estimaciones más precisas sobre el número de especies de manglares en el mundo, las cuales ascienden a 73 especies (Tabla 3): 62 en la región Indo-Oeste Pacífico y 12 en la región del Atlántico-Este Pacífico (Spalding et al., 2010). La distribución de las especies de manglares depende de los patrones de dispersión de los propágulos; esta dispersión está limitada

por cuerpos de agua, y masas de tierra que bloquean la circulación ecuatorial. Hay cuatro barreras alrededor del mundo que restringen la dispersión de organismos marinos costeros cálidos, incluidos los continentes de África y Euro-Asia, Norteamérica y Sudamérica, los océanos del Atlántico Norte y Sur, y Océano Pacífico del Este. De éstas, hay dos barreras que han sido efectivas en épocas geológicas recientes como son los continentes africanos y el Euro-Asiático, y el Océano Pacífico. En consecuencia, los manglares se dividen en dos hemisferios globales: el Atlántico-Pacífico (AEP, por sus siglas en inglés) y el Indo-Pacífico del Oeste (IWP, por sus siglas en inglés), las cuales abarcan porciones iguales de tierra y cada una con áreas equivalentes de manglar. La AEP tiene menor número de especies y menos géneros adicionales, aunque éstos abarquen dos barreras existentes; mientras que la flora del manglar más diversa se encuentra en la región IWP. En función de la presencia de especies, cada una de estas regiones se dividen en tres subregiones, lo que hace un total de seis regiones en el mundo, que son: América Occidental, América Oriental, África Occidental, África Oriental, Indo-Malasia y Australasia (Duke, 2015).

Tabla 3. Especies de manglares en el mundo por regiones geográficas

ESPECIES DEL INDO-PACIFICO ESTE			
FAMILIA	ESPECIE	FAMILIA	SPECIES
Acanthaceae	<i>Acanthus ebracteatus</i>	Rhizophoraceae	<i>Bruguiera cylindrica</i>
	<i>Acanthus ilicifolius</i>		<i>Bruguiera exaristata</i>
Arecaceae	<i>Nypa fruticans</i>		<i>Bruguiera gymnorhiza</i>
Avicenniaceae	<i>Avicennia alba</i>		<i>Bruguiera hainesii</i>
	<i>Avicennia integra</i>		<i>Bruguiera parviflora</i>
	<i>Avicennia marina</i>		<i>Bruguiera sexangula</i>
	<i>Avicennia officinalis</i>		<i>Bruguiera x rhynchopetala</i>
	<i>Avicennia rumphiana</i>		<i>Ceriops australis</i>
Bignoniaceae	<i>Dolichandrone spathacea</i>		<i>Ceriops decandra</i>
Bombacaceae	<i>Camptostemon philippinense</i>		<i>Ceriops tagal</i>
	<i>Camptostemon schultzi</i>		<i>Kandelia candel</i>
	<i>Caesalpiniaceae Cynometra iripa</i>		<i>Kandelia obovata</i>
Combretaceae	<i>Lumnitzera littorea</i>		<i>Rhizophora apiculata</i>
	<i>Lumnitzera racemosa</i>		<i>Rhizophora mucronata</i>
	<i>Lumnitzera x rosea</i>		<i>Rhizophora samoensis*</i>
Ebenaceae	<i>Diospyros littorea</i>		<i>Rhizophora stylosa</i>
Euphorbiaceae	<i>Excoecaria agallocha</i>		<i>Rhizophora x lamarckii</i>
	<i>Excoecaria indica</i>		<i>Rhizophora x neocaledonica</i>
Lythraceae	<i>Pemphis acidula</i>		<i>Rhizophora x selala</i>
Meliaceae	<i>Aglaiia cucullata</i>	Rubiaceae	<i>Scyphiphora hydrophyllacea</i>
	<i>Xylocarpus granatum</i>	Sonneratiaceae	<i>Sonneratia alba</i>
	<i>Xylocarpus moluccensis</i>		<i>Sonneratia apetala</i>
Myrsinaceae	<i>Aegiceras corniculatum</i>		<i>Sonneratia caseolaris</i>
	<i>Aegiceras floridum</i>		<i>Sonneratia griffithii</i>
Myrtaceae	<i>Osbornia octodonta</i>		<i>Sonneratia lanceolata</i>
Plumbaginaceae	<i>Aegialitis annulata</i>		<i>Sonneratia ovata</i>
	<i>Aegialitis rotundifolia</i>		<i>Sonneratia x gulngai</i>
Pteridaceae	<i>Acrostichum aureum</i>		<i>Sonneratia x hainanensis</i>
	<i>Acrostichum danaeifolium</i>		<i>Sonneratia x urama</i>
	<i>Acrostichum speciosum</i>	Sterculiaceae	<i>Heritiera fomes</i>
			<i>Heritiera globosa</i>
			<i>Heritiera littoralis</i>
ESPECIES PACIFICO-ATLÁNTICO ESTE			
FAMILIA	ESPECIES	FAMILIA	ESPECIE
Avicenniaceae	<i>Avicennia bicolor</i>	Pellicieraceae	<i>Pelliciera rhizophorae</i>
	<i>Avicennia germinans</i>	Preridaceae	<i>Acrostichum aureum</i>
	<i>Avicennia schaueriana</i>	Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i>
Bignoniaceae	<i>Tabebuia palustris</i>		<i>Rhizophora racemosa</i>
Caesalpiniaceae	<i>Mora oleifera</i>		<i>Rhizophora x harrisonii</i>
Combretaceae	<i>Conocarpus erectus</i>		
	<i>Laguncularia racemosa</i>		

Fuente: Spalding, Kainuma, & Collins (2010).

1.4.1 Especies de manglares en México

El país cuenta con cuatro especies de manglar: *Rhizophora mangle* (mangle rojo, *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) con dos variedades, una con indumento foliar y la otra sin éste. Dichas especies cuentan con un estatus de protección especial por parte de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Además de las especies mencionadas, se han identificado dos especies más: *Rhizophora harrisoni* hecha por Rico (1981) Leech, en la costa del Pacífico del Estado de Chiapas, y *Avicennia bicolor*, en ese mismo estado, identificada por Jiménez (1994). Estas dos especies, no están bajo ninguna categoría de protección. A continuación, se detallan las características de las cuatro principales especies en México:

1.4.1.1 *Rhizophora mangle* L. (Mangle rojo).

Los árboles de esta especie varían en estructura forestal dependiendo de las condiciones ambientales del sitio donde se desarrollan, pueden llegar a medir entre 10 y 20 m de altura, y de 10 a 30 cm de diámetro a la altura del pecho; pero es capaz de llegar hasta los 40 m en altura y 70 cm en zonas altamente productivas, y en donde los huracanes ocurren raramente (Allen, 2002). Este árbol es capaz de crecer moderadamente rápido de 1 a 1.5 m por año; dentro de las características más distintivas de esta especie están las raíces aéreas arqueadas en forma de zanco, estas raíces pueden extenderse tan profusamente que sus bosques pueden llegar a ser impenetrables (Jiménez, 1985).

Rhizophora mangle es una especie vivípara que produce propágulos que germinan en la propia planta. La dispersión de estos propágulos es mediante la marea, aves y crustáceos. El tiempo de formación del propágulo es de 4 a 7 meses después de ser fertilizados, y en especial para esta especie al propágulo se le reconoce como hipocótilo (Gill & Tomlinson, 1977), y le toma entre 4 a 6 meses para que el propágulo tenga una longitud de entre 8 y 30 cm, incrementando la probabilidad de éxito en su asentamiento (Allen, 2002).

El mangle rojo necesita de un buen suministro de agua subterránea, ya que generalmente habita en zonas donde el periodo de secas es de 8 meses, la cobertura de esta especie se modifica, acorde a la baja disponibilidad de agua dulce, lo que es evidente durante el fenómeno de El Niño,

en donde se reduce el crecimiento del manglar por el daño asociado, y por el contrario aumenta en época lluvias (Duke & Allen, 2006).

El crecimiento del mangle rojo se da en áreas con precipitaciones del orden 800 hasta 10,000 mm por año, y se limita a áreas con temperaturas de alrededor de 21 a 30 °C (Jimenez,1985). Es altamente tolerante a la inundación mareal de hasta 1.5 m, además de ser capaz de tolerar suelos saturados, pero no suelos secos (Duke & Allen, 2006).

Rhizophora mangle tiene preferencia por ambientes costeros de baja energía, protegidos, con sustratos suaves y lodosos, pero también se puede encontrar en sustratos ricos en materia orgánica como turbas y margas, así como en líneas costeras rocosas de energía moderada; el pH del suelo en el cual se puede desarrollar esta planta va de 6 a 8.5, además esta especie tiene una tolerancia muy amplia a los cambios en salinidad, estando el valor óptimo para su desarrollo dentro del intervalo entre 8 y 26 ppm (partes por mil), pero su crecimiento se ve afectado por valores de salinidad por encima de las 35 ppm, y su mortalidad ocurre por encima de las 60 ppm (Allen, 2002).

Entre las principales desventajas de la planta para su supervivencia está su intolerancia a condiciones severas de sombra; sus plántulas por lo general mueren en sitios con un dosel cerrado. No tolera fluctuaciones de temperatura que excedan los 10°C o por debajo del punto de congelación, por ende, son altamente susceptibles al efecto de las heladas, así como al daño por el ataque de insectos principalmente en sus propágulos antes y después de la dispersión; asimismo, son sensibles a la presencia de petróleo y a la anoxia del suelo (Vázquez-Yañez et al., 1999). Esta especie es dominante en las franjas más próximas al mar, en donde puede formar bosques monoespecíficos; mientras que, más allá en tierra adentro, es común que se mezcle con otras especies. De igual forma, se caracteriza por bordear los cauces de ríos.

Esta especie se distribuye ampliamente en la República Mexicana, encontrándose en las costas del Golfo de México, el Océano Pacífico y el Caribe. En el Golfo de México, se encuentran desde Tamaulipas hasta Yucatán y Quintana Roo, y en el Pacífico, la podemos encontrar desde Baja California Sur hasta Chiapas, en altitudes de hasta 6 msnm (Vázquez-Yañez et al., 1999).

1.4.1.2 *Avicennia germinans* (L.) L. (Mangle negro).

El mangle negro es un árbol de talla pequeña o un arbusto grande, perenne, generalmente de 2 a 8 m de altura y con un diámetro normal de 20 a 60 cm (CONABIO, 2009b); asimismo, tiene

follaje claro y abierto con ramas oblicuas ascendentes, troco recto y cilíndrico, además de neumatóforos (i.e. raíces arqueadas que quedan expuestas durante la bajamar, algunas de ellas son aéreas y se prolongan por encima de las aguas). Sus hojas son simples, opuestas, decusadas y enteras, con forma de lanceolada, o falcada de 8 a 12 cm de largo y de 3 a 3.5 cm de ancho. Esta especie es tolerante a la sombra, pero es intolerante al viento y sensible al frío, sus plántulas son particularmente sensible a la exposición por más de 48 horas en aguas a más de 40°C (Jiménez & Lugo, 2000; Von Carlowitz, 1991).

El mangle negro tiene afinidad por áreas inundadas por las mareas, en ambientes salados o salobres. Crece bien en zonas altas, secas y con mayor nivel de salinidad; estructuralmente, alcanza su óptimo en los bosques ribereños tropicales, pero también en las fracciones internas con un menor flujo de los bosques ribereños y a los márgenes. Los suelos en donde crece la especie son del tipo arenoso, cenagoso o arcilloso. La materia orgánica en el suelo donde se da esta especie puede ascender hasta un 58%; mientras que el contenido de nitrógeno es bajo, tiene mayor tolerancia hacia niveles altos de salinidad, llegando a crecer entre los 0 y 65 ppm de salinidad, y tolerando máximo hasta 100 ppm (Jiménez & Lugo, 2000). Cuando el suelo presenta un alto grado de salinidad, el desarrollo estructural se ve suprimido y las hojas excretan sal; esto debido a que posee mecanismos de excreción y exclusión, y acumulación de las sales, así como lenticelas en sus neumatóforos para captar el oxígeno atmosférico (Cintron et. al., 1978).

El mangle negro es una especie que crece en ambientes húmedos tropicales con precipitaciones anuales de entre 1000 a 1600 mm, y temperaturas de entre 22 y 28°C. Se distribuye naturalmente en gran parte de las costas al Atlántico de América, desde el norte de la Florida, a lo largo del Golfo de México, y al sur hasta Espíritu Santo en Brasil; mientras que en el océano Pacífico va desde Punta de Lobos, en México, hasta el sur de Punta Malpelo, en Perú.

En la República Mexicana esta especie se encontraba a lo largo de ambas costas (Atlántico, Pacífico), desde Baja California y Tamaulipas, en el norte y hacia el sur llegaba hasta Chiapas y Yucatán; asimismo, se encuentra en manchones en las costas de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. En las costas del Pacífico desde Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

1.4.1.3 Laguncularia racemosa (L.) Gaertn. f. (Mangle blanco).

El mangle blanco crece en gran variedad de condiciones, podemos encontrarlo en ambientes donde la precipitación varía entre 800 y 7000 mm, y su distribución suele estar restringida a aquellas áreas en donde las temperaturas mínimas promedio son de más de 15°C, ya que esta especie es particularmente intolerante a las bajas temperaturas y sensible a las heladas.

Se le encuentra en las franjas internas de los manglares, donde están las zonas de mayor inmersión del suelo y menor salinidad, sus valores de tolerancia van de 0 a 42 ppm, llegando hasta los 80 ppm, debido principalmente a que las inundaciones por las mareas son poco frecuentes e intensas (Jiménez, 1994); mientras que el rango de pH al que se encuentra la especie va de 4.8 a 8.8 (Reyes-Chargoy, 2003).

Dentro de sus características fisionómicas encontramos que se trata de un árbol o arbusto que llega a medir hasta 20 m de alto y 60 cm de diámetro, posee un tronco erecto y cilíndrico con corteza externa de color gris-oscuro, con fisuras verticales con ramas ascendentes, y copa redondeada y densa (CONABIO-CONANP, 2009). Sus hojas son decusadas, llegan a medir de 5 a 8 cm de largo y de 3 a 5 cm de ancho, sin estipulas; su forma va entre elíptica a oblongo elíptica, su peciolo mide de 10 a 20 mm de largo y es de color rojizo con un par de glándulas en el extremo apical. Además, esta especie presenta mecanismos de excreción (glándulas), exclusión y acumulación de las sales, así como lenticelas en sus neumatóforos para captar el oxígeno atmosférico (Agraz-Hernández et al., 2006).

A esta especie también se le conoce con el nombre de mangle blanco; este árbol tiene presencia en las costas tropicales y subtropicales de América del Norte y del Sur, además de África Occidental. Su distribución en las costas del Océano Pacífico, septentrionalmente desde la Bahía de Ballenas en Baja California Sur, en México, hasta Punta Malpelo en Perú como punto más austral. Por su parte, en el Atlántico se distribuyen desde la península de la Florida en EE. UU., hasta Río Ararangua, en Brasil (Jiménez, 2000).

La distribución en México es en ambas costas, de Tamaulipas a Yucatán por el lado del Golfo, y desde Baja California y Sonora hasta Chiapas por el Océano Pacífico. Actualmente, debido a que los bosques de mangle han sido reemplazados por otros usos del suelo, se encuentra en manchones aislados en las costas de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Yucatán y

Quintana Roo. En el Pacífico, esta especie se distribuye en Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas (CONABIO-CONANP, 2009).

1.4.1.4 Conocarpus erectus L. (Mangle botoncillo).

El mangle botoncillo como también se le conoce a esta especie, es un árbol relativamente pequeño que normalmente alcanza los 10 m de altura, pero puede llegar a medir hasta 20 m, y su diámetro puede ser de 20 hasta 80 cm en individuos de gran talla. De acuerdo con Tomlinson (1986), *Conocarpus erectus L.* no es un mangle verdadero (pues no tiene raíces especializadas y las semillas no forman propágulos), sino que se considera como una especie asociada a los mangles. Un rasgo característico que posee esta especie es que se le puede encontrar en dos variantes, las cuales se distinguen una de otra en la presencia o no de una cubierta de tricomas, que le generan una apariencia plateada y serícea, a esta variedad taxonómica se le denomina *Conocarpus erectus var. sericeus* (Trejo-Torres, 2009).

Los individuos de esta especie poseen una copa redonda y densa, la corteza del tronco es fisurada y se desprende en escamas muy delgadas. Sus hojas son simples, en espiral sobre la rama, llegando a medir hasta 10 cm; el color de las hojas es verde brillante por ambos lados, hay ausencia de estípulas, sus pecíolos llegan a medir hasta 10 mm de largo. El ambiente en el que *Conocarpus* se encuentra generalmente, son aquellos con inundaciones permanentes o estacionales, siendo una especie altamente tolerante de salinidad, los niveles van de 0 a 90 ppm, pero pudiendo llegar a las 120 ppm, para hacer frente a ésta, presenta glándulas excretoras de sales (Agraz-Hernández et al., 2006); en cuanto a condiciones climáticas, crece en temperaturas de entre 22 a 25°C, y con lluvias de 750 hasta 2000 mm (CONAFOR, s/f).

Podemos encontrar esta especie desde el sur de Florida (EUA), a través de México, América Central y las Antillas, hasta Perú y Brasil en América del Sur. En México, está presente en la costa pacífica, de manera discontinua, desde la porción media de la península de Baja California, Mar de Cortés, hasta Chiapas, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. En la región del Golfo y el Caribe se presenta de forma continua en Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (CONAFOR, s/f).

Los manglares del Golfo de México se localizan principalmente en estuarios y lagunas costeras que reciben agua dulce de proveniente de la escorrentía, y del aporte de los ríos que desembocan en el Coatzacoalcos, Papaloapan Usumacinta y Grijalva. El límite al norte de la distribución de los manglares en el país se encuentra en la Laguna Madre en Tamaulipas, debido a las temperaturas que se presentan en invierno (de 0°C) y a la precipitación total anual que es de aproximadamente 600 mm. Por otra parte, en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, es donde se pueden encontrar los bosques con mayor altura y riqueza específica, como consecuencia de la alta precipitación y temperaturas que nunca pasan de los 14°C (Lot et al., 1975).

En las costas del Pacífico, el ecosistema manglar está presente en esteros y lagunas costeras distribuidas desde Baja California y Sonora hasta Chiapas. En la costa al Pacífico de la Península de Baja California se localizan 16 lagunas costeras, en las cuales encontramos manglar sólo en 50% de éstas; en la parte Oeste del Golfo de California sólo se encuentran 5 lagunas costeras, con manglares en dos bahías (Bahía de Paz y Bahía de los Ángeles); y en la costa Este del Golfo de California posee numerosas lagunas costeras, que tienen la boca de entrada abierta permanentemente y reciben una continua escorrentía. En esta zona incluye a Marismas Nacionales, en Nayarit; Jalisco y Colima presentan una estrecha plataforma continental que aunado a las condiciones áridas y semiáridas que posee, ocasiona que haya pocas zonas intermareales, y por ende, la escasez de hábitats para manglares. En los estados de Oaxaca y Chiapas que, por el contrario, al tener una extensa plataforma continental, sus sistemas lagunares también son extensos, en esta región es donde se pueden encontrar las comunidades con la mayor altura y diversidad (Flores et al.,1992).

1.5 Servicios ecosistémicos prestados por los manglares

El concepto de Servicios Ecosistémicos (SE) ha tenido diversas definiciones, por ejemplo, Daily (1997) los define como aquellas condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies sustentan, y satisfacen a la vida humana. Por su parte Costanza et al. (1997) afirma que los SE son los bienes y servicios de los ecosistemas que representan beneficios a la población humana, la cual los obtiene de manera directa o indirecta. En el presente siglo, surgió la iniciativa llamada Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA), iniciativa que fue promovida por las Naciones Unidas. Esta iniciativa tenía como objetivo el introducir y consolidar el concepto

de SE, en el cual se incluyeran las preocupaciones ecológicas en términos económicos, al hacer énfasis en la dependencia que tiene la sociedad sobre los ecosistemas naturales; además de promover el interés público en la conservación de la biodiversidad (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). La definición de SE propuesta por la MEA se refiere a los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas, incluyendo: (1) los servicios de provisionamiento como el agua, la leña, y las fibras; (2) los servicios de regulación que afectan al clima, las inundaciones, las enfermedades, los desechos, y la calidad del agua; (3) los servicios culturales que proveen beneficios recreacionales, estéticos y espirituales; y por último, (4) los servicios de soporte como son la formación del suelo, la fotosíntesis, y el reciclaje de nutrientes. Si bien esta definición es la más aceptada, es evidente que el conocimiento para la evaluación de los SE está en proceso de consolidación.

De Groot et al. (2012) realizaron un ejercicio en el cual evaluaron los SE de los 10 principales biomas expresados en unidades monetarias, entre los hallazgos encontrados destaca que entre los biomas más valiosos se encuentran los arrecifes de coral (cuyos beneficios económicos prestados ascienden a 352,249 usd/ha/año), los humedales costeros (con beneficios económicos por 193,845 usd/ha/año), y los sistemas costeros (por 28,917 usd/ha/año). Si bien este tipo de estudio es criticado por tratar de valorizar lo invaluable, sirve para poner en perspectiva la relevancia de los ecosistemas para los humanos, debido a los servicios que prestan (De Groot et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente, los humedales costeros son uno de los biomas más valiosos en el mundo, considerando entre estos a los manglares, como uno de los ecosistemas de mayor aporte económico hacia las comunidades humanas y los ecosistemas vecinos. Los manglares juegan un papel integral como parte de los ecosistemas costeros en la interfase entre los sistemas marino, dulceacuícolas y terrestres. Estos ecosistemas generan bienes y servicios para la sociedad y realizan varias funciones ecológicas y ambientales. Sin embargo, su valor no ha sido reconocido en su totalidad, debido a que no han sido valorados económicamente de manera integral.

Ecológicamente, los manglares prestan diversos servicios ecosistémicos, entre los que destacan (Ellison, 2012; Feller, 2002; Troche et al., 2016; Spalding et al., 2010):

- la protección a ecosistemas vecinos de procesos marinos de alta energía generado con la acción del viento y mareas,

- la prevención de la erosión y el amortiguamiento de los impactos de las tormentas tropicales y huracanes,
- la prevención de inundaciones,
- la formación de suelo
- la estabilización de las costas, atrapando sedimento y reciclando nutrientes,
- la filtración de la escorrentía proveniente de cuenca arriba siendo capaces de capturar en sus lodos buena parte de los sedimentos y desechos, purificando así el agua que llega al mar, con lo que protegen a las comunidades de pastos marinos y arrecifes coralinos,
- el depósito de materia suspendida arrastrada y descargada por los ríos,
- al ser ecosistemas con gran riqueza biológica, son hábitat tanto de especies residentes permanentes como temporales, incluyendo moluscos, cangrejos, jaibas, langostinos, camarones, erizos, insectos, peces, aves, y mamíferos,
- son espacios de resguardo, alimentación y reproducción para especies de aves residentes y migratorias,
- son de los ecosistemas más productivos, ya que generan grandes cantidades de detritus en aguas costeras, y
- tienen una gran capacidad para absorber metales y otras sustancias tóxicas en los efluentes, que pudiesen dañar a otros ecosistemas.

Uno de los valores más importantes de manglares es su función como áreas de protección, crianza y desove de especies endémicas y comerciales, principalmente por la turbidez del agua, la cual incrementa la tasa de supervivencia de las larvas a través de la reducción de distancia de percepción en depredadores, la mezcla de mareas y entrada de agua dulce que incrementan la productividad de los mangares y proporcionan una base a la cadena trófica, desde el zooplancton, hasta peces larvales y juveniles. Otro factor es la complejidad de este ecosistema, ya que brinda numerosos nichos favorables para la supervivencia de los juveniles, trayendo con esto una menor competencia (Mitra, 2013). La Tabla 4 detalla los servicios ecosistémicos que los manglares prestan.

Tabla 4. Servicios ecosistémicos prestados por los manglares

Servicios ecosistémicos del ecosistema manglar	
PROVISIÓN	
Alimento	Producción de peces, algas e invertebrados.
Fibras, madera, combustible	Producción de madera, leña, turba y forraje.
Productos bioquímicos	Extracción de materiales de la biota.
Materiales Genéticos	Medicina; genes para resistir a patógenos de plantas, especies ornamentales.
REGULACIÓN	
Regulación Climática	Regulación de gases de efecto invernadero, temperatura, precipitación, y otros procesos climáticos; composición química de la atmosfera.
Regulación biológica	Resistencia a especies invasoras; regula las interacciones entre diferentes niveles tróficos; preservando la diversidad funcional e interacciones.
Control de la contaminación y desintoxicación	Retención, recuperación y remoción del exceso de nutrientes y contaminantes.
Protección ante la erosión	Retención de suelo.
Peligros naturales	Control de inundaciones; protección contra tormentas.
CULTURALES	
Espiritual e inspiracional	Sentimientos personales y bienestar.
Recreacional	Turismo y actividades recreativas.
Estético	Apreciación de las características naturales.
Educativo	Oportunidades para una educación formal o informal, así como entrenamiento.
SOPORTE	
Biodiversidad	Hábitat para especies residentes y migratorias.
Formación de suelo	Retención de sedimento y materia orgánica.
Ciclo de nutrientes	Almacenamiento, reciclado, procesado y adquisición de nutrientes.

Fuente: Elaboración propia con base en la MEA (2005).

Como se puede ver en la tabla anterior, el manglar es de los ecosistemas que mayor número de SE presta, que se traducen en fuentes de riqueza y bienestar para la sociedad. Sin embargo, las decisiones que se toman entorno a su uso sostenible para preservarlos, y así continuar brindando estos SE, no están favoreciendo su conservación al favorecer actividades humanas que los impactan negativamente. Esta contradicción, se explica porque la mayoría de los bienes y servicios que proveen los manglares no son comerciados en los mercados; asimismo, debido a que los beneficiarios de los servicios de estos ecosistemas no son quienes toman las decisiones sobre los cambios de uso de suelo (Welsh y Sanjurjo, 2019).

1.6 Manglares en el mundo

Las comunidades de manglar se distribuyen en la región intermareal entre el mar y la tierra, en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en donde la temperatura promedio del océano es de 24°C (Kathiresan, 2005). La ubicación de los manglares está restringida a latitudes entre los 30°N y 30°S. Las extensiones al norte de este límite se encuentran en Japón (31°22' N) y Bermuda (32°22' N); las extensiones al sur están en Nueva Zelanda (38°03' S) y en la costa este de Sudáfrica (32°59' S) (Spalding, 1997; Yang *et al.*, 1997)(Fig. 3).

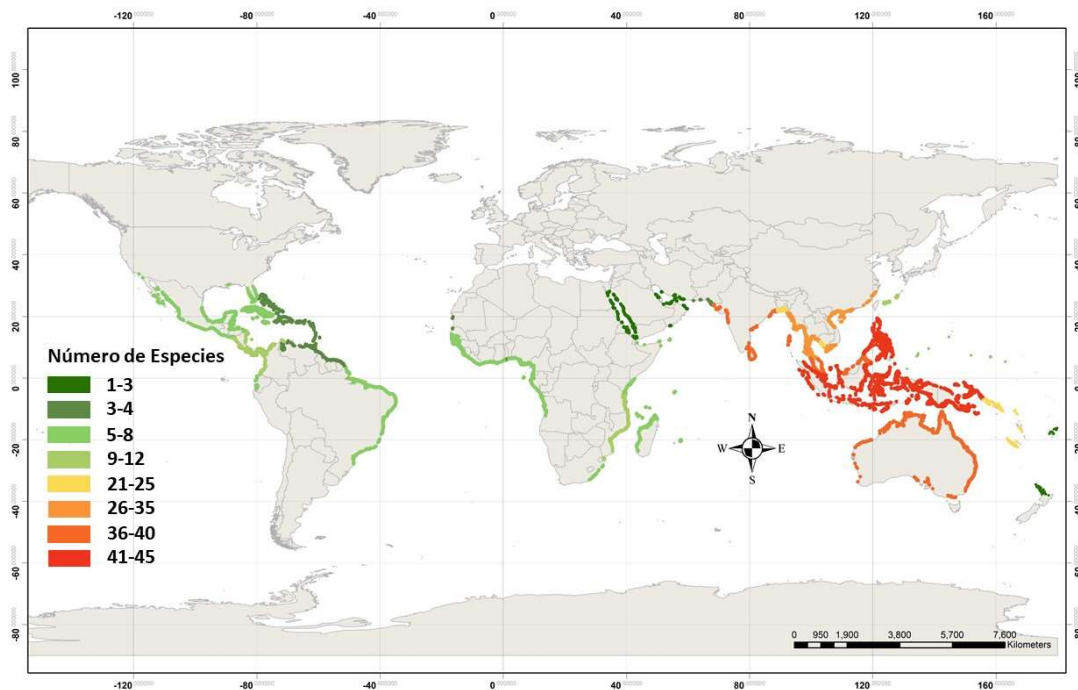


Fig. 3 Distribución mundial de los manglares y especies presentes. Fuente: Elaboración propia con datos de Spalding *et al.*, (2010) y Troche *et al.*, (2016).

Se han hecho numerosas aproximaciones a la cobertura mundial de manglar (Figura 4). Giri et al. (2011) estimaron la cobertura mundial de manglar mediante el uso de técnicas de percepción remota, obteniendo una cobertura de 136,760 km² en 118 países, lo cual equivale a 0.7% de los bosques tropicales en el mundo; a diferencia de lo que la FAO reportó en el 2006, en la que estima que la cobertura del manglar asciende a menos de 1% de los bosques tropicales en el mundo. También Spalding et al. (2010) estimaron la cobertura de manglar y encontraron presencia de éste en 123 países, en 5 continentes, con 152,361 km² de cobertura. Debido a esto, los bosques de manglar son considerados un ecosistema con poca presencia mundialmente, en comparación con el total de bosques tropicales en el mundo.

Los bosques a nivel mundial se distribuyen en la región Indo-Oeste Pacífico que incluye al Este de África, Indo-Malasia y Australasia; mientras que el hemisferio Oeste incluye a la región Atlántico Este Pacífico, que contiene al Oeste de América, Este de América y Oeste de África. El hemisferio Este es considerado el lugar donde se originaron los manglares, por ende esta región ha sido llamada como Manglares del Viejo Mundo, mientras que los ubicados en el hemisferio Oeste son considerados como los Manglares del Nuevo Mundo (Kathiresan, 2005).

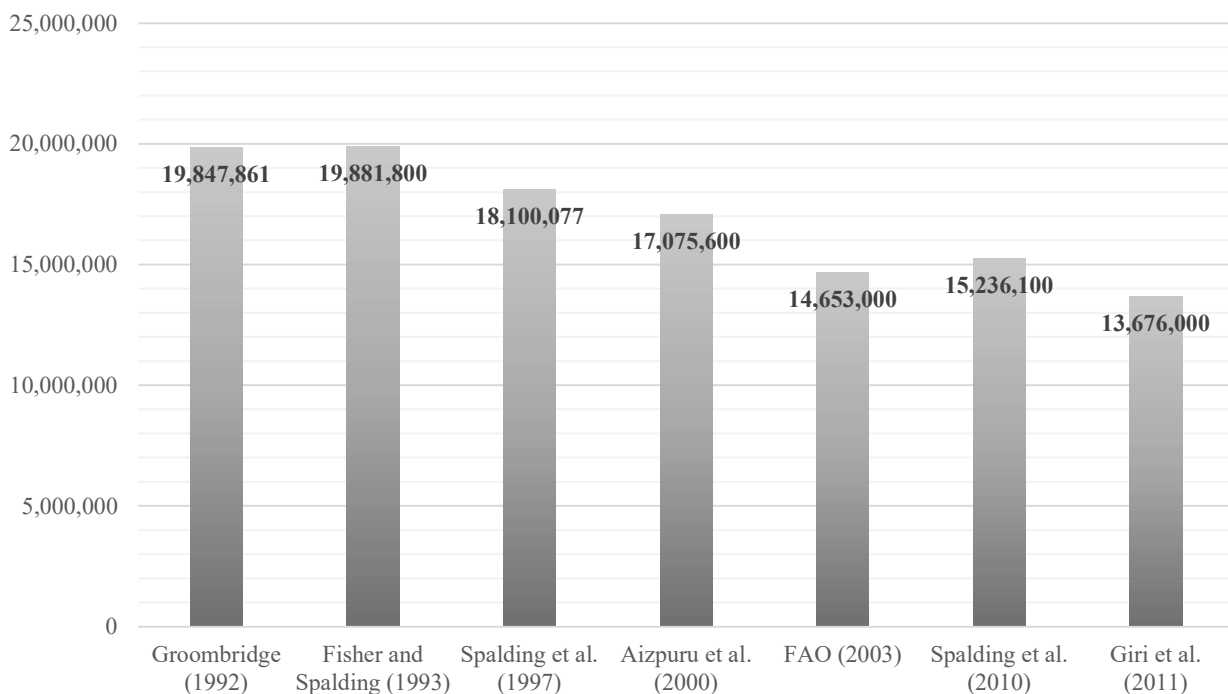


Fig. 4 Comparativa de estimaciones de cobertura mundial de manglar en hectáreas

Estimaciones más precisas sobre el número de especies de manglares en mundo, determinan que hay alrededor de 73 especies de manglares. La presencia de especies casi está exclusivamente dividida entre la región Indo-Oeste Pacífico con 62 especies, y la del Atlántico Este Pacífico con sólo 12 (Spalding et al. , 2010). Por continente, las mayor extensión de manglar se encuentran en Asia (42%), seguido de África (20%), Norte y Centroamérica (15%), Oceanía (12%) y Sudamérica (11%). Cabe mencionar, que 75% de los manglares en el mundo se concentran en tan sólo 15 países, destacando el caso de Indonesia en donde se ubican 22.64% del total, seguido de Australia (con 7.11%), Brasil (con 7.00%), y México (con 5.40%) (Tabla 5) (Giri et al., 2011). La Tabla 5 detalla los países con la extensión que tienen de manglar.

Tabla 5. Países con mayor área de manglar del mundo

No.	País	Área (ha)	%
1	Indonesia	3,112,989	22.64
2	Australia	977,975	7.11
3	Brasil	962,683	7.00
4	México	741,917	5.40
5	Nigeria	653,669	4.75
6	Malasia	505,386	3.68
7	Myanmar (Burma)	494,584	3.60
8	Papua New Guinea	480,121	3.49
9	Bangladesh	436,570	3.17
10	Cuba	421,538	3.07
11	India	368,276	2.68
12	Guinea Bissau	338,652	2.46
13	Mozambique	318,851	2.32
14	Madagascar	278,078	2.02
15	Filipinas	263,137	1.91
16	Otros países	3,396,472	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en Giri et al. (2011).

1.7 Manglares en México

En México, la diversidad y composición de los manglares está influenciada por el grado de humedad; en el país esta condición está determinada por la influencia climática que los vientos alisios tienen sobre las costas, generando que las costas del Golfo de México sean más húmedas que las del Pacífico (López Portillo y Ezcurra, 2002).

A nivel global la República Mexicana está dentro de los primeros 5 lugares de cobertura de manglar a nivel mundial (Giri et al., 2011; Spalding et al., 2010; FAO, 2007). Actualmente, el territorio mexicano cuenta con una cobertura de 741,917 km² y representan 5.4% de los manglares del mundo (Troche et al., 2016).

Los manglares mexicanos se localizan en las costas de 17 estados del país, ubicados en 5 regiones: Pacífico Norte con 24.21% del total nacional en cobertura, la Pacífico Centro con el 0.9%, siendo la región con menor cobertura del país, la región Pacífico Sur con 9.3% , el Golfo de México con 11.2% y la Península de Yucatán, que es la región que tiene más de la mitad de los manglares de México con 54.3% del total; en esta última, podemos encontrar a los estados con mayor extensión de manglar. Por ejemplo, Campeche cuenta con una extensión de manglares de 25.6%, seguido de Quintana Roo con un 16.7% y de Yucatán con un 12.0% (Fig. 5). La Tabla 6 detalla las coberturas y porcentajes de manglares en el país. El 53.7 % de la superficie de manglar se encuentra dentro de Áreas Naturales Protegidas Federales y Estatales; aunque los estados con manglares con baja protección a nivel federal o estatal son Colima y Guerrero.



Fig. 5 Mapa de regionalización de los manglares en México. Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (2016).

Tabla 6. Regionalización del ecosistema manglar en la República Mexicana y la cobertura por estado.

Región	Cobertura de la región (ha)	Cobertura por estado (ha)		% del total
Pacífico Norte	187,383	Sinaloa	81,558	10.5
		Nayarit	67,096	8.7
		B.C.S	26,579	3.4
		Sonora	12,111	1.6
		B.C	39	0.01
Pacífico Centro	7,011	Colima	3,302	0.4
		Jalisco	2,271	0.3
		Michoacán	1,438	0.2
Pacífico Sur	72,187	Chiapas	46,804	6.0
		Oaxaca	18,690	2.4
		Guerrero	6,693	0.9
Golfo de México	87,048	Tabasco	45,410	5.9
		Veracruz	38,311	4.9
		Tamaulipas	3,327	0.4
Península de Yucatán	421,926	Campeche	198,853	25.6
		Quintana Roo	129,902	16.7
		Yucatán	93,171	12.0

Fuente: Elaborado con base en Troche et al., (2016).

1.7.1 Pérdida de manglar en México y en el mundo

El ecosistema manglar está desapareciendo gradualmente como consecuencia de los impactos que se están presentando sobre sus comunidades en todo el mundo, principalmente por actividades humanas, alcanzando tasas de desaparición que van del 1 al 2% por año. Esta tasa sigue aumentando rápidamente, principalmente en países en desarrollo, que es donde se encuentra la mayor concentración de manglares. En el último cuarto de siglo, la pérdida en extensión de los manglares van del 36 al 86%, lo cual ha provocado que las áreas en donde se encuentran estos ecosistemas se reduzcan o sean fragmentadas, provocando que los servicios ecosistémicos brindados por los manglares se vean comprometidos, o en algunos casos se pierdan (Duke et al., 2007). Proyecciones por parte del IPCC (2007) sugieren que del 30 al 40% de los humedales costeros y el 100% de los bosques de manglar (Duke et al., 2007) podrían perderse en los siguientes 100 años, si la tasa de pérdida continúa.

En México, diversos autores han estimado la pérdida de manglar. Por ejemplo, el Instituto Nacional de Ecología en 2005 calculó que la tasa anual de pérdida de manglares entre 1976 y 2000 fue de 2.9%; esta cifra cuadruplica a la tasa de pérdida mundial de manglares estimada en 0.66% según la FAO (2007). Con base en estas cifras, se estima que cada día se pierden 4.43 hectáreas, de continuar este ritmo de pérdida se calcula que para el año 2025 la pérdida de superficie del manglar será de entre 40 y 50% con respecto a la cobertura existente en el año 2000 (INE, 2005). Esta tasa de deforestación puede ser más alta, ya que Dirzo (1994) calculó una tasa anual de deforestación en México de 5%, pero que en el Caribe alcanza casi 12%, mientras que en otras regiones se estiman en 3.9% en el Golfo de México y 4.5% en el Pacífico (López -Portillo y Ezcurra, 2002).

Actualmente, la CONABIO considera que hay una tendencia hacia la pérdida y degradación del ecosistema, ya que para la década de 1970-1980 se tenía una cobertura de 8,564.05 km²; cifra que disminuyó hasta los 741,917 km² al año 2015, resultado de cambios de uso de suelo (Troche et al., 2016) (Ver Figura 6). Las fuentes de deterioro dependen de cada región, estado y municipio, pero en todas la constante son las actividades humanas, ya que éstas constituyen las principales amenazas para los manglares. Actividades como la destrucción del hábitat, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos, la falta de planificación del desarrollo urbano, industrial y turístico, y el desarrollo agrícola, ganadero y acuícola, todas han reducido considerables áreas de manglares. Por otro lado, los residuos sólidos urbanos, los contaminantes industriales, los pesticidas, los fertilizantes, las modificaciones de las condiciones hidrológicas y los derrames de petróleo, han tenido gran impacto sobre los manglares. En el caso de los manglares en la RBLP, éstos enfrentan severas amenazas antropogénicas, debido a que se encuentran en una zona con alta actividad petrolera por su cercanía con diversas plataformas de exploración y perforación (CONABIO, 2009).

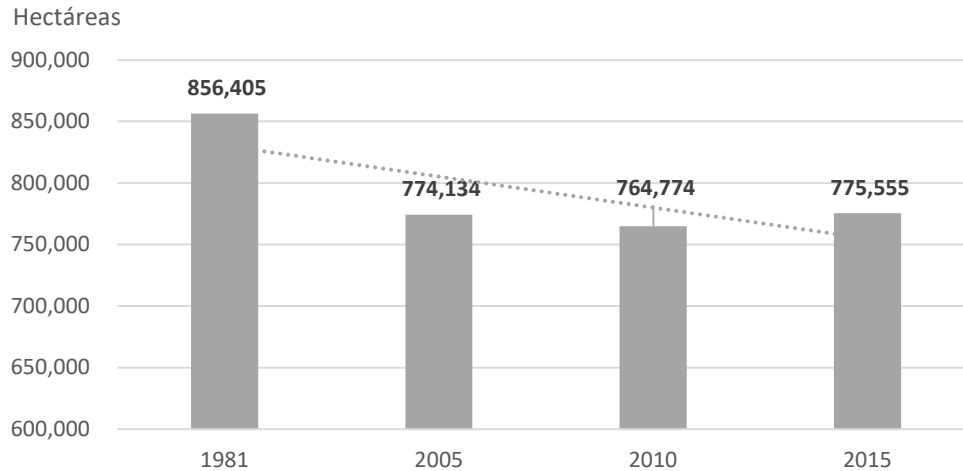


Fig. 6 Tendencia de pérdida del manglar en México entre 1981 y 2015. Fuente: Troche et al. (2016).

1.8 Amenazas e impactos

Los manglares pueden estar naturalmente perturbados por fenómenos meteorológicos como son ciclones, tormentas, relámpagos, e inundaciones (Smith et al., 1995); también, son susceptibles a enfermedades que pueden llegar a provocar un crecimiento retardado, muerte gradual, o reemplazo de especies. Estos ecosistemas se vuelven más vulnerables a enfermedades y plagas cuando se encuentran bajo estrés por el cambio en la salinidad, inundación mareal, sedimentación y fisicoquímica del suelo. Las plagas afectan a los manglares de forma severa, así como las epidemias originadas por bacterias, virus, hongos e invertebrados, las cuales pueden destruir las hojas y madera, reduciendo así la viabilidad del manglar (Mitra, 2013).

Este ecosistema tiene un gran valor para las comunidades costeras, pero desafortunadamente, el hombre es uno de los principales causantes de su desaparición por perturbaciones directas e indirectas, resultado de la destrucción del hábitat, la contaminación y la sobreexplotación. Las perturbaciones directas principalmente se explican por la sobreexplotación de estos ecosistemas como materia prima (i.e., madera, leña, carbón) (López y Ezcurra, 2002). Por otro lado, las perturbaciones indirectas son quizás las más generalizadas, y se dan de manera frecuente, por lo que causan un mayor impacto sobre estos ecosistemas; estas perturbaciones indirectas incluyen aquellas que se derivan de actividades que involucran la conversión a gran escala de los usos de suelo para el desarrollo de la agricultura, la silvicultura, la extracción de sal, el desarrollo urbano e

infraestructura y la desviación de agua dulce para riego; estas actividades son una fuente de importantes daños para los manglares (UNEP, 1994).

Dentro de todas las actividades que causan un impacto sobre los manglares, la que más estragos genera es el establecimiento de granjas camaronícolas y de acuicultura, ya que la demanda de este tipo de recursos es elevada y las condiciones ambientales en las áreas de manglar son las idóneas para el crecimiento de sus poblaciones, aunado a esto el poco valor que se le da a los manglares, ya que son considerados como tiraderos o nidos de mosquitos; percepción que no ha favorecido la protección de estos ecosistemas, acelerando su desaparición (Alongi, 2002). La Tabla 7 detalla los diversos impactos que afectan la salud y distribución de los manglares.

Tabla 7. *Principales impactos sobre el ecosistema manglar*

Pérdida inmediata de los manglares
Bloqueo de los estuarios
Alteración de los flujos naturales de las mareas
Alteración de la capa freática
Aumento de las tasas de sedimentación y turbidez en aguas naturales
Liberación de desechos tóxicos
Sobreexplotación de poblaciones de semillas silvestres
Desarrollo de suelos sulfatados ácidos
Reducción de la calidad del agua
Introducción de exceso de nutrientes
Alteración de las cadenas alimentarias naturales

Fuente: Elaboración con base en Alongi (2002), Costanza et al. (1997), Spalding et al. (2010).

Otro de los impactos más relevantes sobre los manglares es la contaminación, la cual juega un papel importante para el deterioro de estos ecosistemas. A raíz del acelerado crecimiento de poblaciones humanas en las zonas costeras, la cantidad de desechos sólidos y aguas residuales sin tratar que son vertidos en las áreas de manglar o en las vías fluviales costeras adyacentes ha

aumentado, siendo la contaminación una de las principales causas del deterioro de este ecosistema en regiones como América Latina y el Caribe (Lacerda, 2002).

La contaminación por aceites o hidrocarburos es de particular interés, ya que los pantanos son lugares comunes donde se da este tipo de contaminación, sobre todo en regiones altamente vulnerables por sus condiciones geográficas e hidrográficas. Las mayores causas de contaminación por hidrocarburos son los derrames, seguidos de accidentes petroleros, incidentes de transporte, así como tuberías dañadas y explosiones. También hay derrames pequeños pero que contribuyen de forma importante, actividades como la sobrecarga de tanques, limpieza de éstos, mal funcionamiento de las válvulas y problemas durante la conexión de las mangueras. Estos impactos generan impactos a corto y a largo plazo: a corto plazo pueden matar a la planta por asfixia, ya que tapa las raíces aéreas de los manglares impidiendo la respiración y todos los procesos fisiológicos dependientes de ésta. A largo plazo, hay una disminución en longitud del área contaminada con respecto a las que no habían sufrido contaminación. Los árboles en sitios con restos de aceite poseen raíces sumergidas más cortas y mayor proporción de raíces muertas en comparación con otros sitios sanos. Hay contaminación crónica en hábitats costeros cercanos, debido al lodo de manglar y su capacidad de depositar los residuos de petróleo a largo plazo (Lacerda, 2002).

En la RBLP, las principales amenazas a los manglares son el aumento desordenado y mal planeado en la actividades turísticas en el litoral de Petenes, así como la sobreexplotación de los recursos pesqueros, fragmentación de hábitats, alteración de la dinámica hidrológica por la construcción de carreteras no adecuadas para humedales, la tala clandestina, los incendios, la contaminación de las aguas costeras inmediatas a los asentamientos humanos por la falta de un sistema de drenaje y tratamiento de aguas de desecho, y la salinización de humedales por el impacto de tormentas o huracanes (Villalobos, 2004). Además de las amenazas ya mencionadas sobre los manglares, existe una que ha generado particular preocupación, debido a que su ubicación en las costas hace que los manglares sean particularmente susceptibles a los impactos derivados del cambio climático global; este fenómeno es una amenaza socioambiental que genera cambios en la temperatura y alteraciones en los regímenes de precipitación, así como mayor número e intensidad de tormentas y huracanes, y un aumento en el nivel del mar. La mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años se atribuye a un aumento de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, generado por actividad antropogénica, principalmente por el uso de combustibles fósiles y la deforestación (Houghton et al., 2001). Estos

cambios pueden generar numerosos impactos en el manglar, que se traducen en variaciones en la fisicoquímica del agua y el suelo, tales como el pH, salinidad, potencial redox, así como la alteración de los parámetros hidrológicos y la composición del suelo. Lo anterior, ha degradado el ecosistema manglar y representan una amenaza para su supervivencia y crecimiento (Mitra, 2013).

1.9 Conclusiones del Capítulo

Los manglares son uno de los principales representantes de la costa de la zona intertropical del mundo y representan el 1% de los bosques tropicales a escala global. Son ecosistemas altamente complejos, cuenta con un alto grado de especialización debido a las condiciones ambientales donde se desarrollan. Asimismo, son comunidades con una gran importancia ecológica para ecosistemas vecinos y económica para los habitantes de la zona costera. Su arreglo por especies (zonación) en la línea costera ha sido atribuida a factores medio ambientales y fisicoquímicos, haciendo que las distintas especies se coloquen de acuerdo a su afinidad y grado de tolerancia ante estos.

Estos ecosistemas son considerados como uno de los más productivos del mundo incluso por encima de los bosques, y proporcionan innumerables servicios ecosistémicos al ser humano. Sin embargo, también son uno de los ecosistemas más frágiles y amenazados, ya que por su localización son altamente vulnerables a los fenómenos meteorológicos que impactan sobre ellos como huracanes y tormentas, pero sin duda su principal amenaza son las actividades antropogénicas que se realizan sobre ellos. La destrucción del hábitat, la contaminación, el cambio de uso de suelo son las principales acciones que constituyen una amenaza, y esto se ve reflejado en la cantidad de manglar que se está perdiendo en todo el mundo.

Para México, el ecosistema manglar significa una de las comunidades con mayor presencia dentro de las áreas protegidas y con un alto valor natural: 60% de los manglares mexicanos se encuentran protegidos en Áreas Naturales Protegidas, lo cual representa una cifra bastante significativa teniendo en cuenta que en los años 1970-1980, el 99% de los manglares estaban desprotegidos. Desafortunadamente, el ritmo al cual se está dando el desarrollo urbano en las zonas costeras en beneficio del turismo, ha provocado la pérdida considerable de cobertura de manglar. Si bien, existen leyes que protegen a los manglares en México, no son respetadas adecuadamente, dado que se siguen aprobando proyectos costeros que involucran la destrucción de manglar y cuyas medidas de mitigación no resarcan el daño ya realizado, y por el contrario, agudiza el grave problema ambiental en las costas mexicanas. La desaparición de los manglares involucra no sólo

la pérdida de este ecosistema, sino toda la gama de SE que proporciona al propio humano y a los ecosistemas vecinos. Sin embargo en marzo del 2014 se publicó en el DOF la lista de especies prioritarias para la conservación en donde figura *Rizhophora mangle* y todas las especies de manglar que se encuentran en el país, con esto la SEMARNAT dará prioridad a la promoción del desarrollo de proyectos para la conservación y recuperación de estos ecosistemas.

Particularmente la especie *Rhizophora mangle* en México es la que tiene mayor presencia en el país y América Latina y ocupa generalmente la franja con mayor contacto con el mar, haciéndola la especie con mayor exposición a fenómenos físicos y meteorológicos, la especie es tolerante a la alta salinidad que no sobrepasen las 60 ppm, son altamente sensibles a la contaminación por petróleo, en este sentido esta especie tiene mayor riesgo en las costas del Golfo de México en donde la exploración y explotación petrolera es una de las principales actividades económicas, tal es el caso de los estados de Tabasco y Campeche, este último estado donde se ubica la RBLP y el cual tiene una vocación petrolera y en donde la mayor parte de sus ingresos provienen de la extracción de gas y petróleo; la cercanía de los manglares con las plataformas pertenecientes a la Sonda de Campeche y el riesgo de derrame de este hidrocarburo significarían una seria amenaza para la RBLP y en particular para el mangle rojo por su baja tolerancia a la anoxia provocada por un potencial derrame.

2. Cambio climático y los manglares

2.1 Cambio climático mundial

El clima es dependiente de diversos factores que interactúan de forma compleja. Actualmente, se considera al clima un estado cambiante de la atmósfera, vía interacciones con el mar y el continente, en diversos lapsos de tiempo y espacio. Si algún parámetro meteorológico se sale de su valor medio de muchos años, se le considera una anomalía climática ocasionada por procesos de forzamiento radiativo, los cuales pueden clasificarse en internos y externos. Los procesos externos operan fuera del planeta Tierra e incluyen cambios en el balance energético global o variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, y los cambios en la intensidad de la radiación solar recibida. Los procesos de forzamientos internos operan desde dentro del clima en la Tierra e incluye aspectos como cambios en la energía global, causada por cambios en la

circulación del océano o cambios en la atmósfera. Otros procesos de forzamiento climático incluyen el impacto que generan grandes erupciones volcánicas y colisiones de cometas o meteoritos. Sumado a éstas, existen otras causas del cambio climático a escalas de tiempo más cortas y que pueden ocurrir dentro de una sola generación, como el calentamiento global provocado por el efecto de las grandes emisiones de llamados GEI, que son los causantes de la composición actual de la atmósfera, y que han favorecido a que se presente una tendencia creciente de la temperatura atmosférica (Mitra, 2013).

Las emisiones de estos GEI en la última década fueron las más altas en la historia de la humanidad y alcanzaron 49 GtCO₂eq/año en 2010. La tendencia al alza de las emisiones globales de CO₂ se atribuyen principalmente a la quema de combustibles fósiles y los cambios de uso de suelo. La crisis económica mundial de 2007 redujo temporalmente las emisiones globales, pero la tendencia ascendente a largo plazo se mantiene. De todos los compuestos considerados como GEI, el CO₂ es el más abundante, dado que éste representaba en el año 2010, 76% del total de emisiones de GEI, ponderado según el potencial de calentamiento global a 100 años. El segundo GEI más importante es el metano que representa un 16% del total de los GEI, seguido por el NO₂ con un 6% y los gases fluorados con un 2% del total. Los orígenes de estas emisiones provienen principalmente del sector energético (35% del total), de la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (24% del total), la industria (18% del total), el transporte (14% del total), el sector de la construcción (6% del total), y finalmente, los residuos (3% del total). Cabe mencionar, que 70% de las emisiones de CO₂ se concentran en 10 países, siendo los principales factores que han favorecido el repunte en el aumento de las emisiones de GEI, el crecimiento de la economía y de la población, a pesar de la reducción de la intensidad energética. Se espera que la tendencia continúe, de no llevarse a cabo esfuerzos concretos para reducir la generación de GEI (IPCC, 2014b).

Los aumentos en la concentración de los GEI provocan que la tierra pierda eficiencia para reemitir la energía recibida al espacio. Una parte de la radiación saliente de onda larga emitida por el planeta al espacio es reemitida a la superficie por los GEI provocando así que la temperatura se eleve para emitir más energía, y a pesar de que parte de ella se queda “atrapada”, una cantidad suficiente de energía llegará al espacio para lograr un balance radiativo que mantiene relativamente estable al planeta. Pero si la concentración de los GEI sigue aumentando, evitará que se llegue a

este balance radiativo, provocando que la temperatura de la superficie de la Tierra mantenga una tendencia positiva. Aunque las emisiones de GEI llegasen a estabilizarse, los efectos de calentamiento permanecerán durante mucho tiempo, debido a que la naturaleza de estos gases le permite permanecer por muchos años en la atmósfera. Por ello, cuando se cambia un forzante radiativo, ya sea natural o antropogénico, el sistema climático responde en varias escalas de espacio y tiempo; un cambio significativo en el balance radiativo del planeta, incluyendo los ocasionados por el aumento en los GEI, alterarán la circulación del mar y atmósfera, así como el ciclo hidrológico, lo que a la postre se reflejará en cambios en precipitación y temperatura (Martínez et al., 2005).

El cambio climático es considerado un paradigma de crisis ambiental actual y es definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1999) en su artículo 1, como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia entre el cambio climático de origen antropogénico que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática natural. Las características de este fenómeno es que es global, es decir, va más allá de los primeros impactos en áreas locales o regionales, ya que, desde la segunda mitad del siglo XX, aparecen los primeros problemas globales, como son la pérdida de biodiversidad y el ozono estratosférico. En segundo lugar, es un fenómeno exponencial, ya que su variable se duplica en intervalos de tiempo más cortos, según la representación de una ecuación de segundo grado. Ésta exponencialidad, es evidencia de la rapidez a la que se está produciendo, y cómo está relacionado con la intensidad de las actividades humanas y las emisiones que producen. Por último, es un hecho persistente, es decir, que aunque este sea interrumpido definitivamente, el problema logrará mantenerse durante décadas, debido principalmente a los largos periodos de residencia de los productos implicados (Velázquez de Castro González, 2005).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), dentro de su quinto reporte de evaluación, hace mención de las observaciones realizadas y proyecciones a futuro con respecto a parámetros meteorológicos monitoreados, que permitan establecer tendencias y generar escenarios de cada variable. Esta institución ha definido 4 nuevos escenarios de emisión de todas las fuentes, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por

sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5W/m²; estos RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) (IPCC, 2013). A partir de éstos, las variaciones en la temperatura y la elevación media del mar esperadas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. *Proyección del cambio en la temperatura media global del aire y en la elevación del mar*

		2046-2065			2081-2100	
		Escenario	Media	Rango probable	Media	Rango probable
Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C)	RCP2.6		1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
	RCP4.5		1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
	RCP6.0		1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
	RCP8.5		2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8
		Escenario	Media	Rango probable	Media	Rango probable
Elevación media mundial del nivel del mar (en metros)	RCP2.6		0.24	0.17 a 1.32	0.40	0.26 a 0.55
	RCP4.5		0.26	0.19 a 0.33	0.47	0.32 a 0.63
	RCP6.0		0.25	0.18 a 0.32	0.48	0.33 a 0.63
	RCP8.5		0.30	0.22 a 0.38	0.63	0.45 a 0.82

Fuente: IPCC, 2013.

Es probable que el aumento de la temperatura media global en la superficie al final del siglo XXI (2081-2100) respecto a 1986-2005 sea de 0.3 a 1.7 °C, bajo el escenario RCP2.6; de 1.1 a 2.6 °C bajo un RCP4.5; de 1.4 a 3.1 °C bajo un RCP6.0; y de 2.6 a 4.8 °C bajo un RCP8.5. Se espera que se produzcan temperaturas extremas calientes más frecuentes en escalas temporales diarias y estacionales, conforme vaya aumentando la temperatura media global en la superficie. Es muy probable que haya olas de calor con mayor frecuencia y más duraderas, y que se continuarán produciéndose temperaturas frías extremas en invierno de forma ocasional.

Por otra parte, los cambios en la precipitación no serán uniformes. Es probable que en las latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial se experimente un aumento en la precipitación media anual en el marco del escenario RCP8.5. Es probable que, en el marco del escenario RCP8.5, la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitud media y subtropicales; mientras que es probable que, en muchas regiones húmedas de latitud media, la precipitación media aumente (IPCC, 2014). La disminución del pH en el océano superficial se sitúa en el rango de 0,06

a 0,07 (aumento de la acidez del 15% al 17%) para un RCP2.6; de 0.14 a 0.15 (del 38% al 41%) para un RCP4.5; de 0.20 a 0.1 (del 58% al 62%) para un RCP6.0; y de 0.30 a 0.32 (del 100% al 109%) para un RCP8.5.

La elevación del nivel del mar no será uniforme entre las regiones, es muy probable que para fines del siglo XXI, el nivel del mar aumente en aproximadamente más del 95% de las zonas oceánicas. Las proyecciones señalan que alrededor del 70% de las costas de todo el mundo experimentarán un cambio de nivel del mar en un intervalo de $\pm 20\%$ de la media global (IPCC, 2014).

Los impactos esperados a consecuencia del cambio climático ya están ocurriendo, y los posibles impactos futuros también han sido identificados. Estos pueden ser divididos en cuatro grupos: geológicos, meteorológicos, biológicos y humanos. Dentro de los impactos geológicos destacan el retroceso de los glaciares, el cual se estima en un 10% desde el año 1960. Este fenómeno afectará el agua almacenada en los glaciares y la cubierta de nieve declinará, reduciendo la disponibilidad donde vive más de un sexto de la población mundial. También, el aumento en el nivel del mar a consecuencia del deshielo de estos glaciares será otro de los efectos esperados.

En cuanto a los impactos meteorológicos se destaca el incremento en intensidad y frecuencia de fenómenos como vientos, tormentas y huracanes. La frecuencia de precipitaciones torrenciales ha aumentado entre un 2 y 4% en el siglo XX, las posibles causas son la presencia de una atmósfera con mayor energía y una mayor evaporación del agua; también habrá más olas de calor, las cuales actúan en cooperación con contaminantes atmosféricos como el ozono, provocando el incremento en la tasa de mortandad en localidades españolas y europeas, por ejemplo. Los cambios en las corrientes marinas, lo cual perturbaría el clima mundial, ya que al calentarse el ártico, el agua resultante de este fenómeno sería transportada por las corrientes marinas a otros sitios, provocando un descenso en la temperatura en las aguas continentales donde antes eran cálidas. En lo que a impactos biológicos se refiere, se presentarán de acuerdo con el ritmo de adaptación que tengan las especies ante la alteración de sus condiciones naturales. Asimismo, habrá cambios en el comportamiento de las especies terrestres y oceánicas que se verá traducida en variaciones en los patrones migratorios y de reproducción. Probablemente entre 20 y 30% de las especies vegetales y animales aumentarán su riesgo de extinción si la temperatura global promedio aumenta entre 1.5 a 2.5 °C, debido a que son más vulnerables y también cambiarán su área de distribución (Velázquez de Castro González, 2005).

El cambio climático tendrá impactos relevantes para el ser humano, dado que más de 60% de la población mundial viven en las costas, y estas zonas son las más vulnerables. El aumento del nivel del mar traerá consigo el riesgo de inundación a las poblaciones cercanas a la costa; se espera que para el 2080 millones de personas que habitan en las zonas costeras y planicies inundables se verán afectadas por inundaciones y eventos extremos, con serias repercusiones a sus actividades económicas y la infraestructura existente (Conde-Álvarez & Saldaña-Zorrilla, 2007).

El incremento en la temperatura también ocasionará sequías, que afectarán a sus cultivos y ganado, así como hábitats y ciudades; esto comprometería la seguridad alimentaria provocando hambrunas, enfermedades y muertes. Otros de los efectos más significativos del cambio climático para la salud humana son el incremento en brotes de enfermedades tropicales como malaria, dengue o encefalitis, así como de enfermedades respiratorias como asma. También, se generará una nueva clase de refugiados, llamados climáticos, que se estiman en 150 millones para el 2050 (Mitra, 2013; Velázquez de Castro González, 2005).

Tabla 9. Principales efectos del cambio climático mundial

Principales efectos del cambio climático	
Clima	Incremento en la temperatura
	Cambios en patrones de precipitación
	Incremento de la evaporación
	Desestabilización de clima local
Océanos	Aumento en el nivel del mar
	Calentamiento oceánico
	Acidificación
	Efectos sobre los arrecifes de coral
	Alteración en patrones de circulación oceánica
Salud humana	Seguridad alimentaria comprometida
	Desastres naturales como inundaciones y sequías
	Enfermedades y pandemias
Ecosistemas	Alteración en procesos biológicos
	Cambios en la composición y distribución de especies
	Extinción de especies
Agua	Derretimiento de glaciares
	Cambios en el ciclo hidrológico
	Reducción en la disposición de agua dulce

Fuente: Mitra, 2013.

Estos impactos pueden afectar a diversos sectores de la actividad humana, incluyendo al gobierno e instituciones. Por lo pronto, las naciones desarrolladas y en desarrollo llevan a cabo diversos esfuerzos en el análisis de los potenciales impactos del cambio climático, la vulnerabilidad de las regiones a condiciones extremas en el clima, así como posibles medidas de adaptación (Magaña, 2004).

2.2 Cambio climático en México

El evaluar los impactos del cambio climático a una escala regional es una tarea sumamente complicada, pero la información obtenida tendría una gran relevancia para la toma de decisiones orientada a reducir la vulnerabilidad y favorecer la conservación de ecosistemas relevantes. México, lamentablemente, ha deteriorado de manera relevante su medio ambiente, además de que diversas zonas se encuentran en riesgo por sequías, inundaciones por crecidas en ríos, aumento en el nivel del mar, pérdidas de la biodiversidad y degradación de los suelos. Si a esto le sumamos el factor humano como culpable de numerosos accidentes ambientales, ya sea por corrupción o negligencia, esto ha propiciado un aumento inaceptable para la contaminación del agua, aire y suelo, y para lo cual no se tiene buena capacidad de respuesta. Por esta razón, el cambio climático jugará un papel relevante en México, ya que será un grave problema ambiental que vendrá no sólo a afectar por sí mismo, sino potenciará otros problemas naturales y sociales como los ya antes mencionados. Es un hecho que, las consecuencias de este fenómeno no se reflejarán de la misma manera para todo el mundo, siempre que su contribución en cuanto a GEI no haya sido la misma, pero habrá países que estarán mejor preparados para enfrentarlo, debido a las condiciones naturales que poseen, a su alto desarrollo científico y tecnológico, socioeconómico y educativo, ya que el fortalecimiento de estas áreas hará que se adapten de una mejor manera a las nuevas condiciones del clima.

México ha tomado medidas para estar mejor preparados ante las amenazas del cambio climático, con el fin de fortalecer los conocimientos que se tienen acerca de los procesos (físicos, químicos y biológicos) que intervienen en la dinámica del clima; esto contribuirá a simular el clima presente y futuro.

El estudio del cambio climático involucra el conocimiento de las tendencias de las variables climáticas con respecto a un periodo de tiempo en el pasado. Para México, las tendencias son inciertas en cuanto al grado de aumento, pero se concluye en que hay cambios y los habrá en el

futuro. Algunas investigaciones al respecto como la de Pavía et al. (2009) con respecto a las tendencias en la temperatura superficial del aire en México encontró mediante un contraste entre dos periodos, uno antiguo (1940-1969) y uno reciente (1970-2004), que hay un calentamiento entre estos periodos; este calentamiento es más generalizado en la temperatura máxima en verano que en otras estaciones. Asimismo menciona, que el país sufrió un enfriamiento en el invierno dentro del periodo antiguo, por lo que las anomalías climáticas como el niño y la niña no tiene un papel directo en ambos casos, pero si lo tiene la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), ya que sus tendencias y fases son consecuentes en ambos casos: un calentamiento a principios de los setentas y una fase cálida del ODP que prevalece durante el más reciente periodo cálido, así como un enfriamiento a inicios de 1940 y una fase fría de la ODP prevaleciente. Otros estudios de tendencias en la temperatura, pero en el sur de México, encontró que la tendencia de la temperatura promedio es hacia un aumento lineal y significativo a razón de $0.86^{\circ}\text{C}/\text{década}$, y las temperaturas máximas se han incrementado a casi al doble de esta tasa, mientras que las temperaturas mínimas no tienen cambios apreciables (Peralta-Hernández et al., 2009).

MPRU (2011) utilizando la base de datos del Crutem, realizó el análisis de tendencia de las temperaturas medias en México para el periodo 1960 a 2010, y entre sus hallazgos se encuentra que el país ha incrementado en 0.85°C . Por su parte, Carrasco (2013), menciona que hubo un aumento en las temperaturas máximas en la parte norte y centro de país, mientras que la región sureste la tendencia es inversa. Para el caso de la temperatura mínima encontró que la región norte-noroeste y centro del país presentó un incremento en ésta, mientras que en la región norte-noreste y sureste hubo un descenso. En esta última, Yucatán fue la excepción, ya que tanto las temperaturas máximas como mínimas disminuyeron; indicador de enfriamiento. Por el contrario, Sonora, Chihuahua, Puebla y Tlaxcala, ambos valores aumentaron; signo de que se está dando un calentamiento.

En cuanto a precipitación en México, hay menos consenso sobre su evolución. Diversos autores han estimado la variación que posiblemente hay en este parámetro. Méndez et al. (2008) analizaron la tendencia en precipitación utilizando 789 estaciones climatológicas en todo el país, entre sus hallazgos resaltan el aumento de lluvias en verano son mayores con respecto al invierno. Además, encontró que las regiones áridas y semiáridas aumentaron 1.8% en promedio, comparado con el 0.9% de las zonas húmedas.

En el caso de las proyecciones climáticas locales para México en el siglo XXI de los MCG utilizados en los dos últimos Reportes de Evaluación (AR4, AR5) del IPCC, éstas sugieren importantes modificaciones en la circulación tropical y subtropical, que son los procesos que modulan el clima en México. Los escenarios muestran probables aumentos en la superficie del aire (entre 1.5 °C y 5 °C) para mediados o finales de siglo en condiciones de bajas emisiones de GEI (B1 y RCP4.5) y altas (A2 y RCP8.5). También señalan cambios en la frecuencia de los eventos extremos en diversas regiones del país y mares circundantes. Por otro lado, la precipitación se verá modificada con reducciones de entre el 10 y 20% en algunas regiones (IPCC, 2007; IPCC, 2014).

La certidumbre de los escenarios climáticos modelados a escala regional se ve reducida por la compleja topografía, las sombras orográficas y la posición de México en el área tropical y subtropical, por lo que no todos los MCG son capaces de reproducir estas condiciones ambientales particulares. Por ello, se han proyectado futuras variables re-escaladas estadísticamente o utilizando modelos dinámicos a mesoescala. Uno de estos modelos es el RegCM4, con el cual se estudió la variabilidad climática presente en México y Centro América, y su relación con otras variables como la temperatura del océano, la circulación tropical y los ciclones tropicales.

A grandes rasgos las proyecciones a futuro en nuestro país apuntan a (Romero et al., 2015):

- a. La presencia del fenómeno del Niño por mayor tiempo que pudieran favorecer lluvias invernales en la región Noroeste de México.
- b. Retraso en el pico principal de lluvias durante el monzón y el retraso en su terminación.
- c. El Sur de México posiblemente sufra una disminución en la precipitación, provocado por modificaciones en la corriente en chorro del Caribe.
- d. Los ciclones tropicales se verán disminuidos en frecuencia promedio global, sobre todo en zonas costeras del Atlántico y Pacífico oriental, sin embargo, habrá un aumento en la frecuencia de ciclones más intensos y de mayor duración.
- e. Las regiones de ciclogénesis sufrirán un desplazamiento hacia el norte sobre el Atlántico, lo cual implicaría una disminución de las tormentas que entran al país por el Golfo de México y Mar Caribe.
- f. La sequía de medio verano (canícula) se intensificará e iniciará antes.
- g. Mayor ocurrencia de nortes que se propagan más rápido, lo cual redundaría en la disminución en la duración de la precipitación de invierno en el sur del Golfo de México.

El cambio climático afectará a todos los ecosistemas terrestres y acuáticos, y representa una seria amenaza, en especial para los manglares, ya que por su ubicación en la zona de transición entre la tierra y el mar son más vulnerables a sus efectos. La magnitud con la que impacte este fenómeno será en función del grado de conservación del ecosistema y la velocidad a la cual los cambios en precipitación y temperatura se den. En el siguiente apartado se analizan más a detalle los principales efectos y como impactarán a los manglares.

2.3 Efectos e impactos del cambio climático en los manglares

El cambio climático traerá consigo numerosos efectos sobre el ambiente del manglar, los cuales pueden afectar de diversas formas a este ecosistema. Los impactos directos del cambio climático son aquellas modificaciones en cuanto a temperatura, humedad y composición atmosférica en el ambiente del manglar; por ejemplo, un aumento en la temperatura del agua oceánica, un aumento en la temperatura atmosférica, y un cambios en la humedad y en la precipitación. Por su parte, los impactos indirectos son el resultado de la interacción de los impactos directos y los efectos que tendrían sobre los manglares indirectamente como la modificación en los gradientes de pH, Redox y salinidad, los cuales juegan un papel preponderante en la zonación y distribución de las distintas especies. Algunos otros impactos indirectos involucran la destrucción del hábitat, principalmente por los fenómenos meteorológicos como huracanes, cuya ocurrencia será cada vez más frecuente. Las actividades antropogénicas son uno de los principales factores de deterioro hacia los manglares, que está provocando su desaparición; entre estas actividades se encuentran la construcción de infraestructura, la contaminación y la sobreexplotación. La Tabla 10 lista algunos de los efectos directos, indirectos y antrpogénicos hacia los manglares.

Tabla 10. *Efectos directos e indirectos del cambio climático en los manglares*

Efectos directos	Efectos indirectos	Impactos humanos
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en el nivel del mar • Calentamiento de las aguas superficiales • Calentamiento de la atmósfera • Cambio en la humedad atmosférica y precipitación • Cambios en la composición de gases atmosféricos (CO₂ más alto) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en la circulación de la superficie de los océanos, que afecta la dispersión de los propágulos del manglar • Alteración de los gradientes de salinidad • Acidificación de aguas superficiales • Cambios en la entrada de agua dulce • Cambios en la entrada de sedimentos alóctonos • Alteración de eventos climáticos extremos • Incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos • Cambios en la temporalidad • Degradación de ecosistemas que están vinculados funcionalmente a los manglares (e. g. arrecifes de coral) 	<ul style="list-style-type: none"> • Desmonte de manglares • Cambios en la hidrología y el flujo de mareas por caminos y diques, y dragado de canales de navegación • Cambios en las entradas de agua dulce por represas y desviaciones del río • Cambios en la entrada de sedimentos fluviales por mayor erosión y represas en los ríos • Contaminación (i.e., nutrientes, basura, aguas residuales, residuos de dragado, derrames de petróleo) • Sobreexplotación de bosques y pesca • Subsistencia por extracción de agua, petróleo y gas

Fuente: Elaborado con base en Jennerjahn et al. (2017).

Cada uno de los componentes climáticos que son modificados por acción del cambio climático, tendrán un impacto sobre procesos físicos fundamentales para la salud del ecosistema, los cuales modificarán otros procesos, generando una cadena de impacto como la que se muestra en la Figura 7, y que se analiza con más a detalle a continuación.

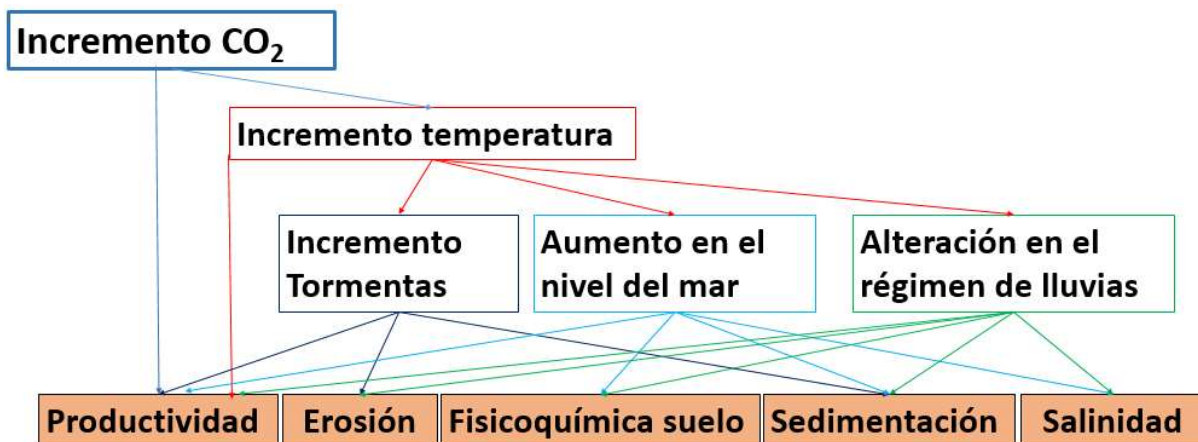


Fig. 7 Cadena de impactos del cambio climático sobre los manglares. Fuente: Ward et al. (2016).

2.3.1 Incremento en la temperatura

La temperatura es el factor climático que modifica los límites en los cuales los manglares se distribuyen hacia el norte y sur del planeta. Los distintos grados de tolerancia a las bajas temperaturas entre las diferentes especies de manglar, por lo general influyen en su distribución natural y en las adaptaciones morfo-fisiológicas y metabólicas. Sin embargo, se ha demostrado que la diversidad genética influye en la tolerancia de los manglares al cambio climático global (Yáñez-Arancibia et al., 2014).

Entre los años de 1906 y 2005, la temperatura promedio de la superficie global se incrementó en 0.74 °C (+/- 0.18 °C) (Solomon et. al., 2007), y se proyecta que para el año 2100 se caliente entre 2 y 6 °C, debido principalmente a actividades humanas (Houghton et al., 2001). Muchos manglares producen su máxima densidad de brote cuando la temperatura promedio del aire alcanza los 25°C y dejan de producir hojas cuando la temperatura promedio del aire cae por debajo de los 15°C. A temperaturas arriba de 25°C, algunas especies pueden mostrar un decaimiento en la tasa de formación de hojas (Saenger y Moverly, 1985). Las temperaturas arriba de 35°C han llevado a estrés térmico, afectando las raíces del manglar y el establecimiento de sus semillas (UNESCO,1992).

La oscilación de temperatura también afecta la fotosíntesis en manglares. Un intervalo óptimo de temperatura existe, en el cual la síntesis de glucosa muestra un valor máximo, pero este intervalo no es estrictamente uniforme para todas las especies de manglar (Mitra, 2013). Andrews

y Muller (1985) demostraron que la tasa de fotosíntesis es muy reducida a más altas temperaturas de hoja. En algunas especies de manglares examinadas hasta ahora, la tasa de fotosíntesis parece verse sin afectaciones por la temperatura de la hoja sobre el intervalo de entre 17 y 25°C, pero cae drásticamente en temperaturas superiores a los 35°C, y se acerca a los 40°C (Andrew, 1985).

2.3.2 Cambios en los patrones de precipitación

Globalmente, se espera que la lluvia aumente en un 25% para el 2050 en respuesta al cambio climático, aunque la distribución regional de estas lluvias será desigual (Houghton et al., 2001). Es probable que la precipitación se incremente en grandes latitudes y ocurra lo opuesto en las regiones subtropicales, especialmente hacia los polos (Gilman et al., 2008).

Los cambios en los patrones de precipitación ocasionados por el cambio climático tendrán grandes efectos en el crecimiento de los manglares y su extensión aérea. La disminución en la precipitación no sólo puede resultar en menos entrada de agua dulce a los manglares, sino también puede causar que los mantos freáticos no reciban la suficiente agua, lo cual provocaría el aumento en la salinidad. Este incremento en la salinidad daría como resultado que los tejidos del manglar almacenen mayor cantidad de sales en su interior, provocando estrés en la planta. Tal incremento en la salinidad y la carencia de agua dulce hacen probable, que la productividad del manglar disminuya, así como el crecimiento y supervivencia de las plántulas, y puede originar cambios en la composición de las especies favoreciendo a especies más tolerantes (Mitra, 2013). El decrecimiento en las lluvias, combinado con el incremento en la evaporación en zonas áridas, también es probable que resulte en una disminución en área de los manglares, su diversidad y la pérdida proyectada de la zona tierra adentro en pisos hipersalinos sin vegetación. Por otra parte, en las regiones donde se tenga proyectado un aumento en la precipitación sucederá todo lo contrario, ya que habrá aumento en la extensión del manglar, así como en su diversidad y crecimiento; como, por ejemplo, aquellas regiones a altitudes medias ubicadas al Norte durante el invierno y en islas del Pacífico Norte a 17 grados Sur (Ellison, 2000). El máximo crecimiento en manglares ha sido ligado a bajas salinidades; en consecuencia, si la precipitación sube y se producirá una baja en la salinidad del suelo, por lo que la tasa de crecimiento puede incrementarse en algunas especies.

2.3.3 Aumento en el nivel del mar

El IPCC (el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) ha hecho estimaciones con respecto al nivel del mar para el siglo XX, las cuales se basan principalmente en observaciones hechas con un mareógrafo, el cual arrojó una variación de entre 1.5 \pm 0.3 mm por año entre los años 1950 y 2000. A su vez, estudios proveen también un estimado de 10 a 14 cm de aumento en el nivel del mar para el último siglo. De estos, 5 cm es atribuido a la expansión térmica de las aguas, mientras que el resto entre 5 y 10 cm se atribuye a la glaciación (Mittra, 2013). En el peor de los escenarios, se estima que para el año 2030, el nivel medio del mar será de 8 a 29 cm más alto y con un valor promedio estimado de 18 cm. Para el año 2070, se tiene pronosticado que el aumento ascenderá entre 21 a 71 cm, con un valor promedio estimado de 44 cm (Field, 1995).

Estos cambios en el nivel del mar traerán consigo una serie de alteraciones en los niveles de inundación en las tierras bajas, y ello está relacionado con la estructura de los bosques y sus áreas de colonización. A su vez, los cambios en el nivel del mar provocan cambios en los patrones de precipitación y en la salinidad del suelo y agua, causando que las interacciones fisiológicas, biogeoquímicas y ecológicas entre los manglares y otras vegetaciones asociadas se distorsionen. El aumento regional en el nivel del mar es afectado por movimientos tectónicos que pueden causar levantamientos o subsidencia. Los sedimentos naturales y la compactación de sedimentos inducidos por el hombre también pueden exacerbar los impactos del aumento en el nivel del mar (Mittra, 2013).

La combinación del aumento en el nivel global del mar y los impactos locales que causan subsidencia, amenazan la existencia de los manglares a nivel mundial, ya que los manglares no tienen la capacidad de hacer frente al aumento del nivel del mar si la velocidad a la cual se elevan por sedimentación es menor a la velocidad con la que sube el nivel del mar. Existen varios procesos interconectados de superficie y subsuperficie que influyen en la elevación del sedimento de los manglares (i.e., acreción, contribución biótica, producción primaria bajo la tierra, autocompactación, fluctuaciones en los niveles de agua o en el almacenaje de ella). Se cree que los manglares de islas de bajo relieve en entornos de carbonato que carecen de ríos son los más sensibles al aumento del nivel del mar, debido a sus ambientes con déficit de sedimento (Gilman et al., 2008).

Se ha observado que uno de los mecanismos de adaptación de los manglares en ambientes frágiles es la migración hacia el mar lo que a menudo causa su muerte, debido a procesos que estresan a la planta como la erosión, la cual genera que la planta tenga estructuras radiculares débiles y posterior caída de árboles, también incremento en la salinidad del sedimento y el agua intersticial por periodos más prolongados e incremento también en la frecuencia y profundidad de las inundaciones. Asimismo, los manglares responden con la migración tierra adentro mediante el reclutamiento de semillas y reproducción vegetativa, a medida que el nuevo hábitat tierra adentro este disponible por la erosión, inundación y el cambio de salinidad asociado (Mittra, 2013).

2.3.4 Incremento en las concentraciones de CO₂

La concentración de CO₂ atmosférico se ha incrementado 35% a partir de los valores registrados previos a la era industrial, pasó de 280 partes por millón por volumen (ppmv) en 1880 a 379 ppmv en 2005 (Solomon et al., 2007). La mayoría del CO₂ resultante de la quema de combustibles fósiles será absorbido por los océanos afectando su química (Mittra, 2013). Un efecto directo de los elevados niveles de CO₂ podría ser el incremento en la productividad de algunas especies de manglares (Gilman et al., 2008).

El CO₂ afecta directamente el crecimiento y la productividad en las plantas. Las concentraciones más altas de CO₂ en la atmósfera pueden mejorar la productividad y la eficiencia del agua entre los manglares, aunque la investigación de laboratorio sugiere que diferentes especies pueden responder de diferentes maneras (Ellison, 1994). Entre las respuestas metabólicas al incremento del CO₂ por parte de los manglares se encuentra una mejor eficiencia en el uso del agua, generando que la planta sea capaz de perder menos agua via evapotranspiración (Ball & Munns, 1992). Asimismo, el crecimiento de los manglares se podría ver beneficiado siempre que la ganancia de carbono es limitada por la demanda evaporativa en las hojas, pero no cuando el limitante sea la salinidad en las raíces. Los niveles de CO₂ elevado en la atmósfera representara un problema ya que contribuye al aumento en el nivel del mar, algunas investigaciones sugieren que los niveles mas altos de CO₂ pueden fortalecer y mejorar procesos biológicos, como la producción de raíces y la acreción del suelo, para movilizarse a tierras mas altas a medida que el incremento del nivel del mar, inunde hábitats en la zona intermareal (Cherry et al., 2009). A pesar de esto, el efecto del enriquecimiento de CO₂ en los bosques de manglares no puede ser interpretado dentro de un simple marco de referencia, ya que éste depende de complejas interacciones entre

diferentes factores fisiológicos y ambientales (Field, 1995). La revisión de datos disponibles recientes sugieren que las respuestas de los manglares a elevado CO₂ atmosférico serán complejas, tanto en especies y en específicas de un sitio. Algunas especies se espera que prosperen, mientras que otras perezcan (Alongi, 2015).

2.3.5 Respuestas de los manglares al cambio climático

Como podemos observar en la Tabla 11, los manglares exhiben numerosas respuestas ante los impactos del cambio climático sobre su ambiente, principalmente relacionadas con modificaciones en procesos fisiológicos como la productividad y funcionalidad, así como morfológicos como la estructura (Ellison, 2014). Algunos componentes del cambio climático podrían resultar en un beneficio para los manglares, pero sólo en el corto plazo. Sin embargo, en el largo plazo la acción simultánea de los componentes del cambio climático generarán impactos negativos. Por ejemplo, la falta de agua dulce provocada por la alteración en el régimen de precipitaciones y el aumento en la temperatura, ocasionarán que los manglares vean afectados su crecimiento y su productividad, dado que el mayor gasto energético lo utilizará para mantener el balance hídrico y el control del contenido de sales en sus tejidos, por lo que serán organismos con dosel menos denso y con poca altura. Otra respuesta de los manglares al cambio climático es la capacidad que tiene de migrar tierra adentro como respuesta al aumento en el nivel del mar, pero para ello es necesario que el área donde se encuentra no presente obstáculos que imposibiliten esta migración, de no ser así, el manglar sufrirá las consecuencias de periodos de inundación más frecuentes y con mayor altura, ocasionando que la planta sufra de hipoxia (Yañez, et al., 2010).

Tabla 11. Principales respuestas del manglar ante los efectos del cambio climático

Componente del cambio climático	Respuesta esperada	Referencias
Alteración en el régimen de lluvias	<ul style="list-style-type: none"> - Los cambios en el contenido de agua del suelo y salinidad del sustrato tendrán significativo impacto sobre el crecimiento de los manglares - De aumentar las lluvias, lo harán también el reclutamiento, productividad y la biodiversidad, y viceversa si se reducen 	Yáñez-Arancibia, 2014; Ellison, 2012; Lovelock, 2007
Incremento en la temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - Se incrementará la productividad neta global del ecosistema de manglar - La biodiversidad de plantas y animales en los manglares se incrementará - Incremento en la tasa de crecimiento y multiplicación de bacterias 	Lovelock, 2007; Ellison, 2012; Ellison, 2014; Yáñez-Arancibia, 1998; Mitra, 2013
Incremento en las concentraciones de CO₂	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia de los manglares en el uso del agua se mejorará. Esto puede o no verse reflejado en el crecimiento - La fotosíntesis del follaje de los manglares no se incrementará significativamente 	Yáñez-Arancibia, 1998; Yáñez-Arancibia, 2014
Aumento en el nivel del mar	<ul style="list-style-type: none"> - La comunidad de manglar propagará tierra adentro si hay suficiente ambiente sedimentario y sin obstáculos topográficos - La productividad secundaria (y primaria acuática) se incrementará por la mayor disponibilidad de nutrientes - Acumulación de sedimento lodo y hojarasca 	Lovelock, 2007; Ellison, 2012; Ellison, 2014; Yáñez-Arancibia, 1998

2.4 Estudios del impacto del cambio climático sobre los manglares

Existen números estudios de caso que analizan el impacto del cambio climático en regiones particulares o en localidades en específico, por ejemplo, Ward et al., 2016 hizo un estudio por regiones del mundo y los probables impactos del cambio climático sobre la cobertura de los manglares, entre los principales hallazgos, menciona que los estudios regionales son requeridos debido a que los manglares son ecosistemas pantropicales, que varían substancialmente a través del espacio en términos de biodiversidad, estructura ecológica, fisiología, configuración hidrodinámica y geomorfológica y de tolerancia a factores ambientales como la temperatura y salinidad. Los factores de cambio climático están interrelacionados y son espacialmente variables, el aumento del nivel del mar, el aumento de las tormentas, el régimen de precipitación alterado y el aumento de la temperatura están afectando a los manglares a escalas regionales, el autor hace énfasis en que el aumento en el nivel del mar es el factor de tendrá mayor influencia sobre los manglares en todas las regiones del mundo con presencia de este ecosistema(Ward, et al., 2016). Las tasas de aumento en el nivel del mar son sumamente variables, desde 1.9 mm/año en el Caribe hasta 7.5 mm/año en partes de Indonesia y hasta mayores de 9 mm/año en la parte más baja de la

Delta del Mississippi; es probable que el rango de marea sea el atributo que tenga mayor influencia en el nivel de impacto del aumento en el nivel del mar sobre los manglares, y es que los aquellos localizados en áreas de micromareales están generalmente a mayor riesgo al aumento en el nivel del mar, que aquellos situados en ambientes macromareales (Lovelock, et al., 2015). Otros factores como los cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas es probable que sean mayor magnitud en Norteamérica y Centroamérica, Asia, Australia, y Este de África que en África Occidental y Sudamérica. Por su parte la precipitación es probable que los cambios sean diferenciados por región, así tenemos que las regiones que son bañadas por el Océano Pacífico, como Asia, Australia y Nueva Zelanda es probable que aumenten en precipitación, mientras que en la costa Este de Norteamérica por el contrario la precipitación disminuye, otras como el caso de Centroamérica y el Caribe e donde es probable que la precipitación en la temporada húmeda disminuya; para África la situación cambia en las costa este y sur la precipitación es probable que aumente mientras que en la oeste la precipitación probablemente se reduzca (IPCC, 2014).

Los impactos del cambio climático a escala regional descritos por Ward et al., 2016 menciona que en Australia, el aumento en el nivel del mar impactará sus costas, sin embargo esta región es de la menos vulnerables, esto debido a que la tasa de acreción de sedimento es alta y a la propia configuración macromareal y al suministro de sedimento en la zona; no obstante es posible que haya pérdida de cobertura, esto si se bloquea la habilidad natural de los manglares a migrar tierra adentro por barreras de origen natural o antrópica. En cuanto a la precipitación, en la región australiana se proyecta el aumento de la precipitación en la segunda mitad del siglo XXI lo cual facilitara la invasión de los manglares dentro de las marismas, debido al incremento de agua dulce de origen pluvial y la reducción de la salinidad del suelo en localidades. El aumento de la temperatura beneficiara la expansión de los manglares hacia regiones más al Sur del continente, sin embargo, este factor no es determinante para que esto suceda, sino también a la interacción con factores como la oportunidad de dispersión y configuración geomorfológica adecuada disponible para colonización. Las condiciones para Sudamérica con respecto al nivel mar proyectan el aumento de $\sim 3.5\text{mm/año}$ en el estuario Amazonas, sin embargo, debido al régimen de marea alta, desarrollo costero limitado y a las grandes entradas de sedimento, es poco probable que haya pérdida de área de manglar. Ecuador y la costa al Pacífico de Colombia se proyecta que se someterán a un aumento del nivel de mar más bajo ($\sim 2\text{mm/año}$) (UN CEPAL, 2011), estas

proyecciones no toman en cuenta la subsidencia, esta varia a lo largo de la costa Sudamericana; en la costa tropical del Pacífico, el sureste y la mayoría del noreste de Brasil tienen una subsidencia del ~ 0.6 mm/año, por su parte la costa caribe es predominantemente estática y sin sufrir elevaciones ni subsidencia. Hay varias investigaciones que analizan el comportamiento de la acreción en los manglares sudamericanos, estos estudios sugieren que en muchos sitios de Brasil la acreción está manteniendo el ritmo con respecto al aumento al nivel del mar (Sanders et al. 2008, 2010), en los sitios donde es improbable que sigan el ritmo, es probable que ocurra migración de los manglares tierra adentro, dando lugar a pérdidas en los bordes. A pesar de esto, la habilidad para migrar en estos sitios es dependiente del desarrollo en las áreas circundantes de manglar. La precipitación en Sudamérica bajo las actuales condiciones sugiere que habrá un aumento en las diferencias estacionales en la precipitación con un ligero aumento general en la precipitación anual en la parte más al norte de América del Sur (Kitoh et al., 2011). Estos patrones de precipitación darán lugar al incremento de sedimento pluvial en los estuarios del Orinoco, Amazonas y Parnaíba, así como en los manglares ubicados en la costa al Caribe. En estos grandes estuarios las grandes entradas de agua dulce implicarán una potencial pérdida de manglares y serán reemplazadas por vegetación del tipo bosque ripario inundado. En el sureste y noreste de Brasil, se pronostica que tanto la precipitación total de la estación húmeda como la precipitación anual disminuirán para 2100, lo que sugiere que al menos en los manglares estuarinos podría haber una disminución en el sedimento suspendido disponible (Grimm 2011, Jones y Carvalho 2013). Las tormentas tendrán un efecto positivo en bahías y estuarios protegidos ya que aportan entrada de sedimentos en zonas con entrada limitada de sedimentos por la poca acción de las olas y la entrada limitada de sedimentos fluviales, también la producción de sedimento autóctona a partir de materia orgánica acumulada puede ocurrir a tasas equivalentes a la tasa de aumento en el nivel del mar eustático lo cual mantendría la superficie de elevación sin suministro de sedimento alóctono (Sanders, 2008). La temperatura será un factor que dicte la distribución latitudinal de los manglares, las proyecciones al 2100 indican que probablemente habrá un incremento de 3 a 5°C, estas cifras es probable que ocasionen el incremento en extensión latitudinal de los manglares ubicados más al sur del continente en la costa atlántica (Soares et al., 2012), mientras que aquellos ubicados más al sur, pero en la costa pacífica (Perú) es probable que no haya cambio latitudinal, esto debido principalmente a la corriente fría Peruana y la falta de condiciones para la propagación y crecimiento a lo largo de línea costera Árida (Saintilan et al, 2014).

Los manglares de Norteamérica, Centroamérica y el Caribe tendrán impactos significativos a causa del cambio climático, esto debido a la alta ocurrencia de tormentas y huracanes, y a la presencia de áreas con alta tasa de aumento en el nivel del mar. En este sentido el Delta del Río Mississippi es de las regiones con tasas de aumento relativo en el nivel del mar mas alto con 9 mm/año, lo que equivale a tres veces el nivel promedio mundial, por ello esta zona es vulnerable a la perdida y o relocalización tierra adentro debido al aumento en el nivel del mar en especial en ambiente micromareal. Por su parte los manglares del Caribe están llevando bien el ritmo con respecto al nivel del mar por lo cual se están expandiendo bajo las condiciones actuales de aumento, impulsada principalmente por la superficie acumulación de turba en la superficie y subsuperficie. El aumento acelerado del nivel trae para los manglares de esta región la dificultad para mantener la elevación y se espera que este aumento en el nivel del mar, de como resultado la migración de los bosques de manglares hacia la tierra y el desplazamiento de otros humedales de marea dulce (Doyle et al. 2010). Centroamérica es la región en donde la mayoría de las proyecciones apuntan al incremento en temperatura y en disminución de precipitación durante la temporada de lluvias. Además el incremento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos como El Niño es probable que originen el incremento de sequias en la región del Pacífico sur, Caribe norte y costas hacia el Pacífico, esta decremento en precipitación limitara el suministro de sedimento en manglares y la producción de hojarasca autóctona a través del incremento en estrés hídrico y con ello su habilidad para hacer frente al nivel del mar (Cahoon, 2014). Caso contrario, durante los años de El Niño, a lo largo de la costa sur caribeña de Centroamérica, el incremento en precipitación ocurrirá y ha sido proyectado que aumentara en intensidad y frecuencia, esto incrementara la captación de escorrentía y consecuentemente el suministro de sedimento en los manglares de esta zona. El área límite entre EE.UU. y México en el Golfo de México se proyecta a ser el área más sensible al cambio con el incremento de los patrones de precipitación. Por el contrario, la falta de lluvia ocasionalmente puede facilitar la expansión de los manglares en la costa de Louisiana, donde la muerte generalizada de los pantanos se atribuyó a una sequía que no afecto a los manglares adyacente (McKee et al. 2004).

En la República Mexicana, específicamente en la Península de Yucatán que es donde se encuentra la RBLP, el cambio climático se proyecta la reducción de precipitación anual del 10 al 15%, y más del 30% durante la estación seca y lluviosa con respecto al promedio del periodo 1980–

1999 (Bárcena *et. al.*, 2010); además Magrin et al. (2007) sostienen que habrá un incremento en la temperatura promedio de 2 al 3.5° C para el 2090. Esto implicará un cambio en los parámetros fisicoquímicos del suelo del manglar, a los cuales tendrá que hacer frente.

Los manglares de la RBLP, en especial la especie *Rhizophora mangle* es particularmente susceptible, debido a la cercanía con los cuerpos de agua, al aumento en el nivel del mar. Asimismo, Ortiz y Méndez (1999) hacen mención del aumento en el nivel del mar como una de las principales amenazas hacia los ecosistemas costeros de la península de Yucatán y Golfo de México, debido a su alta vulnerabilidad, gracias principalmente a la geomorfología de la zona en donde la configuración de las entrantes de inundación se comportan de tal forma tal que a 1 msnm alcanzara una penetración tierra adentro de aproximadamente 16 km de longitud, con un área de inundación cercana a los 520 km². Por otra parte, si el nivel del mar alcanza los 2 m, éste tendrá una penetración salina de hasta 19 km con un área de 200 km².

Aunado a la alta vulnerabilidad antes mencionada, la RBLP muestra diversos grados de resiliencia al aumento del nivel mar, esto de acuerdo con Hernández (2015), quien encontró que 20% de la RBLP tenía una alta resiliencia; en contra parte identificó que 40% de la RBLP con baja resiliencia, principalmente en zonas ubicadas en la franja costera y con impacto directo de vientos y mareas. Esto da un claro indicio de lo vulnerable que es la zona a los efectos del cambio climático y la necesidad de estudios enfocados en la evaluación de su vulnerabilidad para diseñar estrategias de protección y conservación ante tal fenómeno.

2.5 Conclusiones del capítulo

La literatura referente al cambio climático y su relación con los manglares, indican que los efectos de este serán diferenciados dependiendo la región en donde se encuentran, por eso el estudio de los impactos del cambio climático debe realizarse a una escala local teniendo en cuenta las variables ambientales actuales y futuras de la zona. El ascenso en el nivel del mar es considerado como la principal amenaza a la cobertura de manglares (Ward et al., 2016; Mitra, 2017; Lovelock, et al., 2015; Ellison, 2014), especialmente aquellos ubicados en la Delta del Mississipi y el Golfo de México, en donde la tasa de aumento relativo del nivel del mar será más severa. La capacidad de resiliencia de este ecosistema será en función del grado de conservación de este, y las características geomorfológicas presentes en el área de manglar; los manglares necesitan un

continuo suministro de sedimento y producción de hojarasca tal que, eleve la superficie donde se encuentran a un ritmo mayor que el aumento del nivel del mar. Sin embargo, si las condiciones de variables climáticas como la temperatura y precipitación derivan en condiciones que disminuyan la cantidad de sedimento, producción de la hojarasca y otros factores como aumento de salinidad y potencial redox, generara un efecto sinérgico que imposibilitara al manglar a realizar una respuesta efectiva ante tal fenómeno. Es por ello que es necesario analizar cada componente climático en el presente y sus proyecciones a futuro con el fin de desarrollar programas de manejo enfocados en fortalecer las respuestas del manglar ante el cambio climático. La RBLP se encuentra en una zona altamente susceptible a los efectos del cambio climático por la naturaleza carstica de su suelo y la presencia de una llanura de inundación en esa parte del Golfo de México, es por ello que es importante realizar acciones de medición y monitoreo para identificar cambios sufridos a través del tiempo, estudios relacionados con la tasa de sedimentación, cambio en la línea de costa y tasa de acreción, así como proyecciones del cambio climático, basado escenarios locales, que servirán un insumo para un plan de manejo integral de la zona.

3. Vulnerabilidad al cambio climático

3.1 Concepto de vulnerabilidad al cambio climático

La vulnerabilidad es uno de los conceptos clave para entender y analizar los impactos que el cambio climático puede tener tanto para los sistemas humanos como para los sistemas naturales (Polsky, 2007). Este concepto es una poderosa herramienta analítica para describir el estado de susceptibilidad o fragilidad de un sistema físico, social o socioambiental a cierto daño o amenaza (Adger, 2006). Este concepto es multidimensional con diferentes conceptualizaciones y es ahí en donde permanece un alto grado de incertidumbre en cuanto a su medición y clasificación; éste es usado por diferentes comunidades de investigación de diferentes formas con base en las metodologías utilizadas. Por lo anterior, estas diferencias limitan la posibilidad de tener un concepto universal de vulnerabilidad.

Las principales aplicaciones del concepto de vulnerabilidad con temática medioambiental surgen vinculadas principalmente a la ocurrencia de desastres naturales en los años 1970. Este enfoque llamado de riesgo-amenaza para comprender la vulnerabilidad ha evolucionado a partir de la extensa bibliografía sobre geografía de peligros naturales. Este enfoque incorpora

principalmente elementos físicos de la exposición de una unidad y la probabilidad e impactos de las amenazas. Sin embargo, este enfoque ha sido criticado porque ha fallado en abordar causas políticas y estructurales de la vulnerabilidad en la sociedad (Panda, 2009). Otra conceptualización importante de la vulnerabilidad se encuentra en el modelo presión y liberación (Blaikie et al., 1994) en donde los peligros físicos representan presiones y características de vulnerabilidad, pero existen otras presiones como la geografía local y la diferenciación social, que juntas pueden crear el desastre. Este enfoque captura de manera correcta la esencia de ambas tanto de los peligros físicos, así como las perspectivas políticas y económicas de la vulnerabilidad. Sin embargo, este modelo es incapaz de explicar los mecanismos y los procesos de vulnerabilidad.

A pesar de estos avances en el entendimiento y conceptualización de la vulnerabilidad aún no existe una definición universalmente aceptada, sin embargo varias han sido propuestas. Algunas de estas definiciones a nivel general consideran a la vulnerabilidad como un factor de riesgo interno a un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, que corresponde a su predisposición intrínseca a ser afectada o a ser susceptible a sufrir algún daño (Cardona, 2002). En el caso de ecosistemas, ésta se refiere a la propensión interna de un ecosistema o de algunos de sus componentes a sufrir daño ante la presencia de una determinada fuerza o energía potencialmente destructiva (Vargas, 2001).

Otras definiciones de vulnerabilidad más específicas en el ámbito ambiental encontramos, por ejemplo, la utilizada para describir la vulnerabilidad ambiental como un concepto asociado a la comprensión de la susceptibilidad o predisposición intrínseca de determinada región geográfica a sufrir daños (desastres), en donde la capacidad de amortiguamiento está en función del conjunto de recursos y servicios ambientales (i.e., bosques, cuencas hidrológicas) (Sánchez y Egea, 2011).

En la literatura especializada en cambio climático hay diversas definiciones de vulnerabilidad, las cuales caen en dos categorías: la primera categoría ve a la vulnerabilidad en términos de la cantidad de daño potencial causado por un evento o amenaza, en particular relacionado con el clima (Jones y Boer, 2003); la segunda, como un estado que existe dentro de un sistema antes de que se encuentre con un evento peligroso (Allen, 2003).

El enfoque basado en impacto y amenazas típicamente ve la vulnerabilidad de un sistema determinado por la naturaleza de las amenazas físicas a las cuales está expuesto, la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de estas amenazas, el alcance de la exposición humana a la amenaza, y la sensibilidad del sistema a los impactos de éstas. Esta visión es evidente en la definición principal

de vulnerabilidad en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2007). Esta vulnerabilidad combinada, una función de la amenaza, exposición y sensibilidad, puede ser referida como vulnerabilidad física o biofísica (Brooks, 2003); para fines de esta investigación se utiliza la definición de vulnerabilidad biofísica para hacer el análisis en el área de estudio.

El análisis de vulnerabilidad tiene ventaja sobre enfoques tradicionales como el orientado al impacto ambiental en que permite la comprensión de la interacción entre sistemas humano y ecológico, ya que estos están compuestos por una serie de procesos complejos que demanda de una visión sistémica para su análisis, características que un enfoque de impacto ambiental no tiene y el solo se caracteriza por relaciones predominantemente lineales y centrada en los fenómenos físicos.

La vinculación entre estos sistemas permite que la evaluación de vulnerabilidad utilice distintas escalas, lo cual favorece la consideración de problemas locales que no se consideran globalmente. Sin embargo, este tipo de estudios tiene limitaciones y desventajas, una de las principales es la comprensión de cómo interactúan precisamente a una escala tanto local como global. Lo anterior, causa incertidumbre en el conocimiento de los procesos, y más tratándose de sistemas complejos que integran numerosas amenazas de cambio, que además interactúan entre ellas. El problema de conocimiento es de relevancia, debido a que el resultado de estos procesos es irreversible, como, por ejemplo, la pérdida de un ecosistema o especie. Esta falta de conocimiento limita la aplicación del enfoque de vulnerabilidad. La selección de la escala del análisis también es algo que se debe de considerar, ya que a ciertas escalas la interacción entre los distintos actores dentro del sistema es más intensa y problemática (Clark, et al., 2000). Otras limitaciones tienen que ver con problemas existentes en determinados ámbitos para hacer operativo el concepto, particularmente en el desarrollo de indicadores e índices de medición.

En el contexto del cambio climático no hay un consenso sobre el significado de vulnerabilidad y sobre cómo medirla; los principales problemas encontrados en este sentido se refieren a la elección subjetiva de las variables, a la falta de datos para la medición de determinados problemas y, en el caso de índices compuestos, a la elección de los porcentajes de ponderación.

Para la construcción del modelo conceptual de vulnerabilidad se tomaron en cuenta tres dimensiones, siendo esta manera de entender la vulnerabilidad una de las formas que más utilizadas para la medición de los niveles de fragilidad que los sistemas naturales pudieran enfrentar como

consecuencia de los impactos del cambio climático: (1) exposición a estresores, (2) sensibilidad natural, y (3) la capacidad adaptativa a las amenazas (Adger, 2006; Polsky et al., 2007).

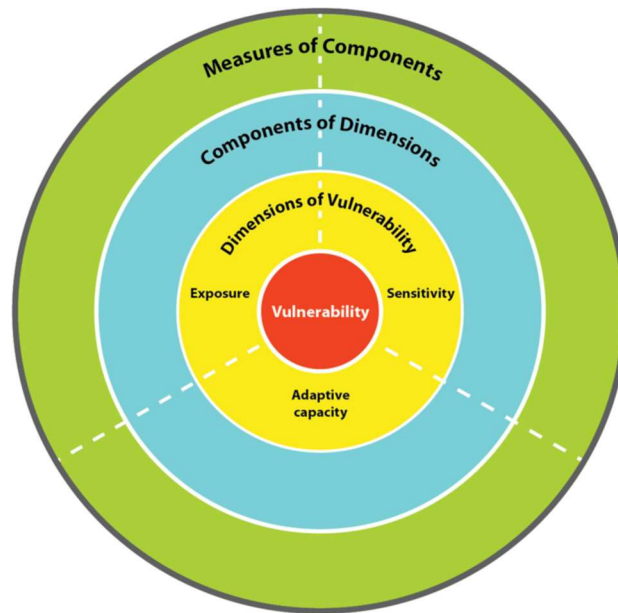


Fig. 8 Diagrama de la vulnerabilidad y sus componentes. Fuente: Polsky, 2007.

Estas dimensiones propuestas en el modelo desarrollado por Polsky (ver Fig. 8), también son consideradas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático en su cuarto reporte (IPCC por sus siglas en inglés). En este modelo se entiende como vulnerabilidad al cambio climático el grado de susceptibilidad o incapacidad de un sistema (ambiental) para afrontar los efectos negativos de este fenómeno, incluyendo además la variabilidad climática y los fenómenos extremos (IPCC, 2007). Esta definición subraya que la vulnerabilidad se encuentra en función del carácter, la dimensión y el índice de variación climática al que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. Este concepto de cambio climático ha evolucionado en el Reporte de Evaluación (AR5) del IPCC, en el cual se conceptualiza a la vulnerabilidad como parte del concepto de riesgo, en donde está en co-evolución con la amenaza, esto quiere decir que hay concomitancia y mutuo condicionamiento. Dicho de otra forma, no se puede ser vulnerable si no se está amenazado y no existe una condición de amenaza para el sistema ambiental. Sin

embargo, para fines de esta investigación se consideró a la definición del AR4 del propio IPCC antes mencionada como el concepto teórico base para esta investigación, debido a que, en sistemas ambientales, no hay un registro histórico de impactos directos del cambio climático sobre ellos, es decir, no ha ocurrido, pero es probable que ocurra según los escenarios obtenidos. Es por eso que, el evaluar por sí sola la vulnerabilidad, nos permitirá conocer de manera anticipada las distintas repuestas del ecosistema ante los efectos del cambio climático y sus potenciales impactos sobre la salud del mismo. Los componentes que explican el concepto de vulnerabilidad según el Reporte de Evaluación AR4 del IPCC se detallan a continuación.

3.1.1 Exposición

La exposición es en general, el grado al cual un sistema experimenta estrés ambiental o sociopolítico (Adger, 2006). Para definir este componente en específico al cambio climático, existen dos conceptualizaciones dentro del concepto vulnerabilidad al cambio climático y que son consideradas las más destacadas; estos marcos de referencia son: Turner et al. (2003) y el utilizado por el IPCC, en donde ambas definen a la vulnerabilidad como una función de la exposición y sensibilidad.

El componente de exposición dentro del enfoque del IPCC (2007) la define como la naturaleza y el grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas significativas. Por su parte, Turner et al. (2003) tiene una definición un tanto similar, definiendo a la exposición como la interacción entre los componentes del sistema y características de los estresores; este componente considera la magnitud o velocidad en que se presentan los cambios en el clima (duración), su frecuencia y la extensión de la exposición. Los factores típicos de exposición incluyen la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración y el balance hídrico climático (Fritzsche, 2014).

En el discurso de cambio climático en México, la exposición se refiere al grado de estrés climático sobre una unidad particular de análisis. Puede estar representada por cambios en las condiciones climáticas o bien por cambios en la variabilidad climática, donde se incluye la magnitud y frecuencia de eventos extremos (Monterroso, 2014).

Para los manglares, la exposición está dada por las variables climáticas y la forma en la que estos ecosistemas están relacionados con dichas variables, cuya modificación puede provocar tanto impactos directos como indirectos. Un ejemplo de estas interacciones es en el caso de un aumento

en la precipitación, ésta constituye un impacto directo sobre el manglar, lo que provocaría un impacto indirecto sobre el potencial Redox del ambiente del mar por un aumento en la frecuencia de las inundaciones y el tiempo de residencia del agua; adicionalmente, podría incrementar el área de alcance por parte de la marea, generando que zonas donde antes no se inundaban se inunden. La temperatura y precipitación por su parte como efecto directo tendrá una gran influencia sobre la fisicoquímica del agua (i.e., pH, oxígeno disuelto, salinidad), y por ende, sobre el ambiente del manglar, ya que la disminución de la precipitación implica que no hay suficiente aporte de agua dulce en el ecosistema, y si a esto se le suma la alta tasa de evaporación generada por un aumento en la radiación solar y temperatura, se tendrá un ambiente aún más salino (Ver Fig. 9).

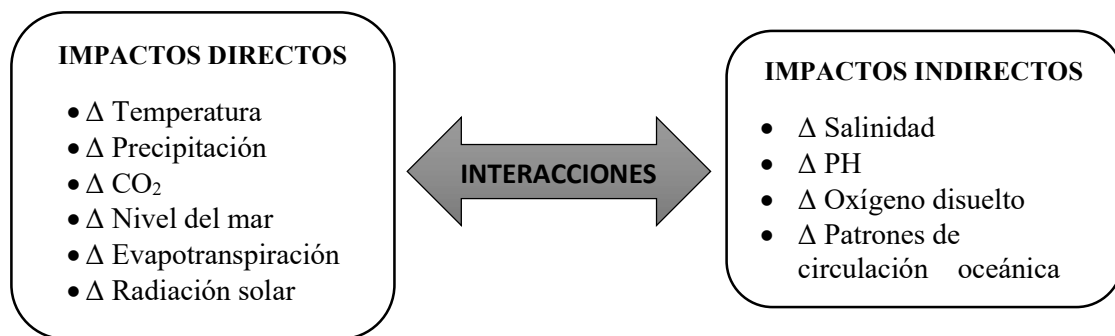


Fig. 9 Impactos directos e indirectos que forman parte del componente de exposición. Fuente: Elaboración propia.

La RBLP es una zona de alta exposición a la temperatura, ya que se encuentra en la zona más cálida de la Península de Yucatán, en la isoterma correspondiente a la temperatura media anual de 26.5°C; esta región es muy cálida debido principalmente a la fuerte influencia que ejercen sobre esta las corrientes marítimas cálidas procedentes del Canal de Yucatán y del Golfo o Corrientes Termohalinas. Estas corrientes durante la mitad caliente del año son capaces de almacenar una gran cantidad de calor, lo que se ve reflejado en la generación de tormentas y altas temperaturas. Las proyecciones de distintos escenarios apuntan al alza en la temperatura media anual de entre 2.5°C y 4 °C en el periodo histórico de 2075 a 2099. En cuanto a la precipitación en Campeche, a grandes rasgos el gradiente de precipitación aumenta de norte a sur, siendo la zona norte la que presenta menor pluviosidad. Esta realidad se mantendría con el tiempo, siendo la zona sur la que presentaría un descenso más acusado en sus precipitaciones. Los escenarios señalan una pérdida de 0.65 mm/día o 237.25 mm/año en el periodo de 2075 a 2099. El aumento en el nivel del mar será por mucho el componente que mayor impacto potencial tendrá en esta zona, debido a la intensa

dinámica con el mar, el drenaje subterráneo y la influencia mareal sobre sus costas. Esa región es básicamente una salina especial de inundación constante cuyos efectos se verán potencializados por la acción sinérgica del aumento de la temperatura y la disminución proyectada de las precipitaciones.

3.1.2 Sensibilidad

La sensibilidad se refiere a las características innatas de las especies o los sistemas que lo hacen más propenso a ser afectado por algún impacto o amenaza. Este concepto también se refiere a las actividades humanas que afectan a la constitución física de un sistema, como, por ejemplo, los sistemas de labranza, el manejo del agua, el agotamiento de recursos y la presión de la población (Frieztsche, 2014).

En materia de cambio climático, el IPCC define a la sensibilidad como el grado al cual un sistema, especie, hábitat o ecosistema es afectado ya sea beneficiosa o adversamente, por estímulos relacionados con el clima (IPCC,2007). La sensibilidad puede ser considerada como una medida de sí, este componente puede depender de variables fisiológicas o biológicas innatas, así como también puede ser un factor específico o ecológico como por ejemplo, la topografía, la capacidad de los diferentes tipos de suelo para resistir la erosión o el tipo de cobertura terrestre. La sensibilidad al cambio climático puede estar altamente influenciada por la existencia y extensión de estresores humanos, que afectan a la constitución física de un sistema (Turner et al., 2003; Glick, 2011), como por ejemplo, los sistemas de labranza, el manejo del agua, el agotamiento de recursos y la presión de la fragmentación de hábitat debido a la construcción de infraestructuras que limitan la habilidad de una especie para cambiar sus respuestas a las condiciones climáticas cambiantes y cambios asociados en hábitats o procesos importantes para el ciclo de vida de la especie población (Frieztsche, 2014).

En el caso del concepto de sensibilidad aplicado al ecosistema manglar, éste está relacionado con la capacidad que tiene el manglar para enfrentar cambios o variaciones, es decir, la respuesta que tiene un sistema a las condiciones ambientales en las que se encuentra y a la propia configuración del medio, factores como la habilidad del manglar de migrar tierra adentro o mar adentro, las barreras físicas que impidan dicha migración, los cambios en la elevación superficial, el incremento o decremento de la productividad, por mencionar algunos ejemplos (Ellison, 2014).

Para la RBLP, ésta se encuentra en contacto directo con el Golfo de México, en donde se proyecta que el cambio climático está generando impactos como son el incremento de la temperatura superficial del océano, los cambios en el régimen de precipitación y en el patrón de descarga de agua dulce, los cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales, el incremento de la temperatura ambiente tierra adentro, y el incremento acelerado del nivel del mar (Day et al., 2009). Cabe mencionar, que esta zona es particularmente susceptible de ser afectada por el aumento en el nivel del mar, debido a la configuración geomorfológica particular de la zona.

La RBLP es una planicie que se inunda en aproximadamente 15 km en dirección de norte-sur, y a su vez presenta un escaso gradiente de pendiente por la planicie tendida y baja que forma un nivel base de transición en la interface tierra/mar; el manglar de franja juega un papel geomorfológico por la retención de sedimentos y hojarasca de la biomasa del propio mangle, lo cual contribuye a elevar la ribera de la costa y de los esteros, formando cuencas de evaporación. Hacia adentro, el manglar es sustituido por una asociación manglar y tular, e intercalamientos con petenes en la porción del septentrional; hacia el sur se encuentran las partes con mayor humedad en donde las extensiones del manglar son mayores, y están en contacto con selvas medianas caducifolias. Estas características en su conjunto hacen que los humedales de la RBLP sean únicos en estructura espacial y sumamente frágil a las variaciones en el nivel del mar (Ortiz, et al., 1999). Para esta investigación, se consideró como factores que determinarán el grado de sensibilidad de la especie *Rizophora mangle* a la variación de los parámetros fisicoquímicos en el agua intersticial, con respecto a los límites de tolerancia propios de la variante fenotípica presente en el área de estudio.

3.1.3 Impacto potencial

Fritzsche et al. (2014) incluyeron el concepto de impacto potencial al estudio de la vulnerabilidad, para ello, tomó como base el modelo conceptual del IPCC en su cuarto reporte de evaluación (IPCC, 2007). El impacto potencial es la interacción entre el componente de sensibilidad y exposición, en donde se asume que por su naturaleza estos dos componentes actuarán en conjunto, por ende, el impacto potencial implica posibles cambios en cuanto a las interacciones bióticas y abióticas con otras especies y procesos del ecosistema, pérdida en la diversidad genética, cambios en presiones de selección, composición de ensamblaje de especies así como su fenología y morfología .

En los manglares, el impacto potencial representa los posibles daños que podría sufrir la especie a nivel fisiológico, morfológico y estructural, ante variaciones que se presenten en los principales parámetros ambientales (componente de sensibilidad) por arriba del umbral de tolerancia de la especie, resultado de las variaciones proyectadas de precipitación y temperatura, bajo los escenarios de cambio climático en sus diferentes horizontes de tiempo (componente de exposición). La Figura 10 detalla el concepto de impacto potencial que tiene una especie o ecosistema ante el cambio climático y explica cómo la interacción entre la exposición y la sensibilidad determinan el grado de impacto potencial, y por consiguiente, también las acciones que se requieren para fortalecer la capacidad adaptativa.

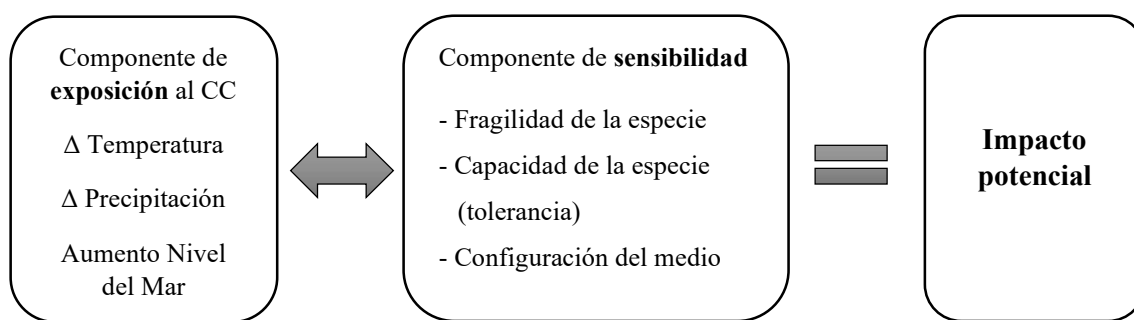


Fig. 10 Esquema de la interacción entre el componente de exposición y sensibilidad para originar el impacto potencial. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del ecosistema manglar, un ejemplo práctico de esta relación se detalla en la Figura 11.

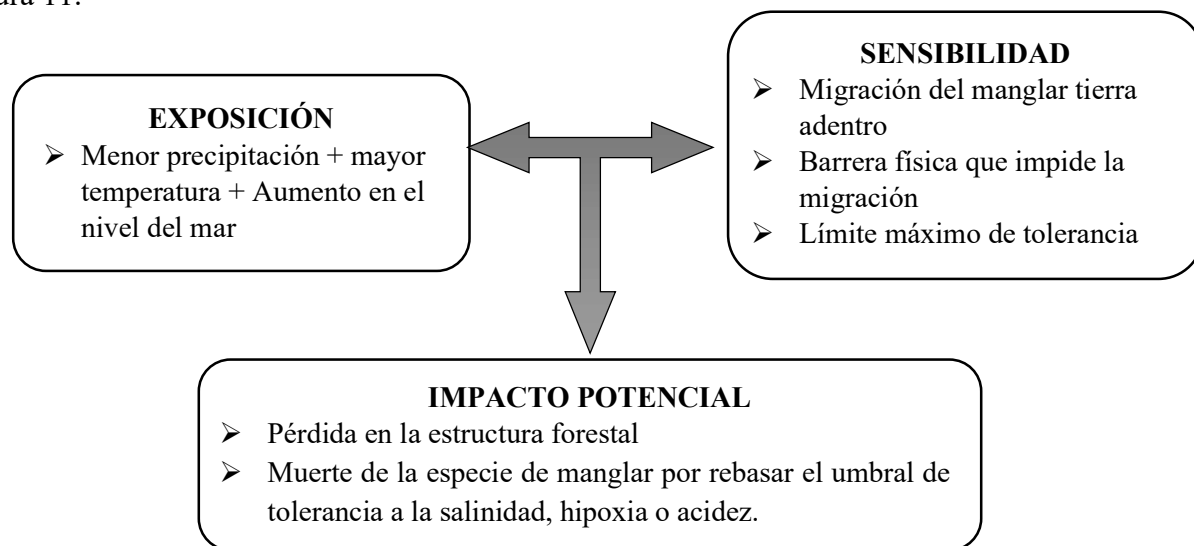


Fig. 11 Ejemplo representativo de cada componente de la vulnerabilidad enfocado al ecosistema manglar. Fuente: Elaboración propia.

El impacto potencial será mayor o menor dependiendo de la exposición al cambio climático y de la sensibilidad del manglar a las variaciones en los parámetros ambientales. El primero sólo puede ser controlado mediante la reducción de los GEI a nivel local, mientras que la sensibilidad dependerá de las acciones enfocadas a incrementar la capacidad adaptativa de la especie.

3.1.4 Capacidad adaptativa

Este componente de la vulnerabilidad ha sido nombrado de diferentes formas, Turner et al. (2003) la llaman capacidad de supervivencia; Gallopin (2003) por su parte lo define como la capacidad de respuesta; y Adger (2006), Smit y Wandel (2006) y el IPCC (2007) capacidad adaptativa. Algunos autores aplican el término “habilidad de supervivencia” al corto plazo e involucra la capacidad de un sistema para sobrevivir, mientras que emplean el concepto de “capacidad adaptativa” para ajustes a largo plazo y más sostenibles (Smit y Wandel, 2006).

En un sentido amplio, la capacidad adaptativa es la habilidad de un sistema de ajustarse ante una perturbación, moderar el daño potencial, tomar ventaja de las oportunidades, y sobrevivir con las consecuencias de la transformación que ocurre (Gallopin, 2006). En cuanto a cambio climático, el concepto de capacidad adaptativa se refiere a la habilidad de las especies o sistemas para acondicionarse o hacer frente a los impactos de este fenómeno con las mínimas interrupciones. Esto se puede lograr a través de las respuestas del mismo ecosistema o de las especies, y por medio de acciones humanas que reducen la vulnerabilidad al clima actual o a los cambios esperados en el mismo (Ellison, 2015). Como respuestas del mismo ecosistema, se considera que todos los organismos tienen como rasgo intrínseco la capacidad de adaptarse a las condiciones tan cambiantes, ya sea por cambios evolutivos (por ejemplo, mediante la selección natural actuando sobre rasgos cuantitativos), o como respuestas ecológicas (por ejemplo, de comportamiento, fisiológicas o de plasticidad), en donde se espera que éstas tengan el potencial para reducir los impactos y moderar vulnerabilidades (Williams et al., 2008). La adaptación evolutiva derivada de los cambios evolutivos que se han dado en numerosas especies como respuesta al cambio climático. Sin embargo, este es improbable que sea el caso para la mayoría de las especies, además que cuantificar la capacidad por adaptación evolutiva es un rasgo muy difícil, ya que se requiere evaluar los cambios que se presentan en la misma especie por múltiples generaciones. Por otro lado, la capacidad adaptativa de índole ecológico es más importante que el evolutivo en el sentido de minimización de impactos en corto tiempo, ya que dichos ajustes se presentan en una generación.

Diversos estudios demostraron que las especies han utilizado su flexibilidad preexistente para responder al cambio climático con cambios en la distribución, en la actividad temporal (diaria y estacional), en las interacciones bióticas aclimatación y en el uso del hábitat/microhábitat. La plasticidad está determinada por la combinación de factores entre los que se incluyen restricciones filogenéticas, grado de especialización de nicho, escala espacial de operación, flexibilidad de comportamiento, ajustes al microhábitat y rangos fisiológicos de tolerancia. El grado de plasticidad tiene un componente genético; si las respuestas de plasticidad son favorecidas por el aumento en la supervivencia y reproducción.

La capacidad adaptativa también incluye las alternativas tecnológicas disponibles para la adaptación, la disponibilidad de recursos y su distribución en la población; la estructura de instituciones críticas y tomadores de decisiones, el capital humano, la capacidad institucional, y la equidad (Metzger et al. 2005; O'Brien, 2004). La Tabla 12 sistematiza los componentes de exposición y sensibilidad del manglar ante el cambio climático, también el impacto potencial que traería consigo la alteración más allá del umbral de tolerancia de la especie.

Tabla 12. Componentes de exposición, sensibilidad y los impactos potenciales en los manglares
Fuente: Elaboración propia con base en Ellison (2012), y Lovelock & Ellison (2007).

Exposición	Sensibilidad	Impacto Potencial
Aumento en el nivel del mar	<ul style="list-style-type: none"> - Migración del manglar - Presencia de barreras físicas - Altitud del terreno - Tasa de sedimentación - Periodo de inundación - Salud del manglar 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de manglar mar adentro - Migración tierra adentro, pero dependiente de las entradas de sedimentos, topografía y modificaciones humanas - Mortalidad de manglar del borde con el mar
Incremento de olas, viento, y tormentas extremas	<ul style="list-style-type: none"> - Productividad del manglar - Tasas de acreción - Reclutamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Daño forestal o cambio en el área espacial - Cambios en la elevación superficial - Erosión o sofocación por sedimentos - Cambios en la cobertura dependiendo si la costa se está erosionando o acreciendo
Incremento en la temperatura del mar y aire	<ul style="list-style-type: none"> - Respiración - Capacidad fotosintética - Productividad del manglar 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la productividad a bajas latitudes - Incremento en la productividad de invierno a altas latitudes
Incremento en la concentración de CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Fotosíntesis - Respiración - Distribución de la biomasa - Productividad del manglar 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento en la productividad, sujeto a factores de salinidad, humedad, nutrientes, - Incremento en el nivel del suelo
Incremento en la precipitación y disponibilidad de agua dulce	<ul style="list-style-type: none"> - Entrada de sedimentos - Agua subterránea - Tolerancia a la salinidad - Productividad del manglar 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento en el agua subterránea - Diversidad - Productividad y reclutamiento - Incremento en la acreción y mantenimiento de la elevación superficial
Reducción en la disponibilidad de agua dulce	<ul style="list-style-type: none"> - Entrada de sedimentos - Agua subterránea - Tolerancia a la salinidad - Productividad del manglar 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en el agua subterránea, en la diversidad - Disminución en la fotosíntesis, productividad y acreción - Migración del manglar tierra adentro y cambios en las especies

3.2 Modelo teórico de la vulnerabilidad de los manglares al cambio climático

El modelo teórico planteado para esta investigación toma como base la definición conceptual del IPCC en su Cuarto Reporte de Evaluación, pero por cuestiones prácticas, el componente

capacidad adaptativa no fue tomado en cuenta por su complejidad para ser modelado, ya que para su evaluación es necesario un análisis de los factores de exposición y sensibilidad actuales, así como la evaluación de las estrategias adaptativas ante el cambio climático presentes, en el plan de manejo de la RBLP. En este sentido, esta investigación se concentró en determinar el grado de exposición y sensibilidad futuras de los manglares, resultado de las variaciones en precipitación y temperatura; lo anterior, con el fin de formular estrategias de adaptación para fortalecer las capacidades adaptativas de la zona.

Las dificultades para realizar estos análisis tienen que ver principalmente con los tiempos de muestreos y el monitoreo de variables ambientales relevantes que pudieran incidir en la salud de los manglares, resultado del cambio climático, los cuales trascienden el tiempo con el que se cuenta para realizar los estudios de maestría. En este sentido, se sugiere promover el monitoreo de algunos parámetros que pueden contribuir a conocer mejor la respuesta de estos ecosistemas a las variaciones de los principales parámetros climáticos, como son: la acreción, la subsidencia, la tasa relativa de aumento en el nivel mar, así como la producción de hojarasca y sedimentación. Asimismo, evaluar la capacidad adaptativa requiere tener en cuenta los avances en materia de planeación y del marco normativo para la protección y conservación de los manglares. Considerando lo anterior, el modelo teórico conceptual utilizado para estimar los niveles de fragilidad de la especie *Rhizophora mangle* ante los impactos del cambio climático se esquematiza en la Figura 12.

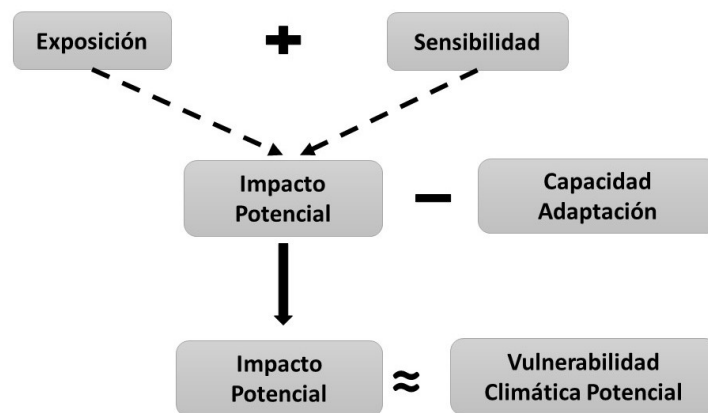


Fig. 12 Modelo teórico conceptual de vulnerabilidad. En donde se incluyó el concepto de “Vulnerabilidad climática potencial” como un estimador aproximado de la vulnerabilidad

En esta investigación, se incluyó el concepto de “vulnerabilidad climática futura potencial” como un estimador aproximado de la vulnerabilidad, el cual hace referencia a la vulnerabilidad futura que el sistema manglar tendrá en un punto específico de tiempo, ante una amenaza en particular; en este caso, cada componente del cambio climático y su efecto combinado (Brooks, 2003). El componente de exposición está determinado por el registro histórico y normales de la temperatura media anual y de la precipitación total acumulada en el área de estudio, mediante la consulta de estaciones meteorológicas, las cuales mediante isoyetas brindaron información sobre la variabilidad climática con respecto al periodo de tiempo base. Por su parte, la sensibilidad está dada por la información obtenida en los muestreos de los parámetros fisicoquímicos realizados en el agua intersticial del suelo en la zona de estudio, estas variables son el pH, la salinidad y el potencial redox; éstas variables son de vital importancia porque inciden directamente sobre la salud y la estructura de los manglares. El impacto potencial estará determinado por el valor resultante de la relación entre los componentes de exposición y sensibilidad y su estado con respecto al límite de tolerancia de la especie de acuerdo al fenotipo presente en el área de estudio.

La implementación de escenarios climáticos junto con el modelo de vulnerabilidad empleado tiene la virtud de poder proyectar la severidad con la que los cambios en el clima en los distintos horizontes de tiempo afectarán al ambiente del manglar y que pongan en riesgo su salud. Sin embargo, este modelo tiene la desventaja de que depende mucho de la calidad y cantidad de la información con la que se alimenta, es ideal que se posean largos periodos de muestreo, tanto climático como en campo, además de que necesita de mayor cantidad de variables para dar una explicación más exacta y más cercana a la realidad. Sin embargo, la información resultante de este tipo de análisis es de mucha utilidad principalmente para la creación de medidas de prevención o acciones para incrementar la capacidad adaptativa por parte de los tomadores de decisiones, que con base en evidencia científica y de soporte, que coadyuven a tener una mejor política ambiental de protección y conservación de manglares.

3.3 Conclusiones del capítulo

La vulnerabilidad al cambio climático debe ser analizado tomando en cuenta sus atributos para así generar un análisis real de la situación que está viviendo el ecosistema estudiado; ya que al considerar no solo la exposición al riesgo climático, sino además la sensibilidad que tiene el

ecosistema ante estos cambios extremos actuales, nos permitirá conocer el impacto potencial que el sistema sufrirá y con ello modelar la vulnerabilidad potencial de este.

Para lograr una reducción de las pérdidas que ocasionan los desastres, y para fortalecer la capacidad adaptativa de estas comunidades y aledañas, es necesario trascender de la evaluación cualitativa a una cuantitativa, que permita dar seguimiento a las aspiraciones de desarrollo sostenible. El enfoque cualitativo es inductivo y se sustenta en la expansión de los datos o de la información con procesos de investigación interpretativos, que parten de observaciones no siempre estructuradas, entrevistas abiertas, revisión de documentos, discusiones en grupo o evaluación de experiencias; mientras que el enfoque cuantitativo es deductivo, pretende acotar la información y se asocia con experimentos diseñados, encuestas con preguntas cerradas e instrumentos de medición estandarizados. Establecer las condiciones para desarrollar la evaluación de la vulnerabilidad con una visión cuantitativa, permite homologar la información obtenida por diversos investigadores, unificar criterios de medición y calificar objetivamente las condiciones de vulnerabilidad ante los efectos de los fenómenos naturales.

La vulnerabilidad del mangle rojo al cambio climático se dará en función de la severidad, velocidad y persistencia con la que los cambios en la precipitación, la temperatura y el aumento en el nivel mar se presenten, ya que estos son los principales componentes de exposición para este ecosistema, dicho componente alterara la configuración ambiental a la cual está adaptado y su modificación significará un gran reto de adaptación para esta especie. Si los impactos del cambio climático al manglar son severos y las condiciones del entorno coadyuban para que esta especie no pueda hacer frente por si sola a este fenómeno, comprometerían e la salud e integridad de este ecosistema.

En el caso particular de la RBLP, en cada uno de los sitios de muestreo, las condiciones geomorfológicas y ambientales hacen que *Rhizophora mangle* sea altamente vulnerable al cambio climático, partiendo del hecho de que las proyecciones indican que la exposición a las variaciones en la temperatura y la precipitación serán elevadas. Aunado a esto, la zona es particularmente frágil, ya que es una zona con un alto estrés hídrico, por lo que la falta de lluvia ocasionará un deficiente acarreo de sedimento y acreción, generando que la microtopografía del suelo sea modificada; esta situación se verá exacerbada aún más debido a la construcción de infraestructura carretera, lo cual ha modificado severamente la condición en la que se encuentra el manglar. Partiendo de lo anterior,

el impacto del aumento del nivel del mar generará que la frecuencia de inundación y la residencia del agua se modifique, afectando la respiración y fisicoquímica del mangle rojo. Es por esto que la mejor alternativa para tratar de enfrentar los posibles impactos del cambio climático es mediante el fortalecimiento de la capacidad adaptativa de los manglares. En este sentido, el estudio de los escenarios de vulnerabilidad al cambio climático nos ayudara a visualizar las principales amenazas y los puntos débiles sobre los cuales se debe trabajar y así atender las necesidades propias de los manglares de la zona de estudio.

III. METODOLOGÍA

4. Zona de estudio

La RBLP es una de las Áreas Naturales Protegidas del país con mayor cobertura de manglar en nuestro país y con alto nivel de conservación. Esta reserva se encuentra dentro de la Península de Yucatán, la cual es una zona que por sus consideraciones geográficas es una zona muy frágil a los impactos del cambio climático; principalmente por tener alta influencia marina, ser una región que se encuentra sujeta al embate de diversos fenómenos hidrometeorológicos como nortes, ondas tropicales, y ciclones, y además es una zona que enfrenta severas presiones antropogénicas que pueden ocasionar procesos de desertificación y pérdida de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos.

La RBLP está ubicada en la franja costera del noroeste del estado de Campeche (a 20° y 21° N y 90° 20' y 90° 30' W; altitud 0-0.4 m), en los municipios de Calkiní, Hecelchakán, Tenabo y Campeche. Es una gran ciénaga que forma parte de un continuo de humedales, y ocupa un área de 282.85 mil hectáreas (ha) (CONANP, 2006), formando un mosaico de asociaciones dentro del gradiente mar-tierra (Rico-Gray, 1982). Con respecto al ecosistema manglar, éste ocupa un área de 51.02 mil ha (Ver Figura 13) (Vázquez-Lule, 2009); en particular, en la zona de estudio predominan los manglares del tipo franja o borde, de cuenca o chaparro, y de peten, este último en presencia también de la selva mediana subperennifolia (CONANP, 2006). El clima es cálido subhúmedo con régimen de lluvia en verano; mientras que la temperatura media anual fluctúa entre los 26 y 28°C,

con una precipitación total anual que oscila entre 1,000 y 1,200 mm (Rico-Gray y Palacios-Ríos, 1996).

Esta reserva posee gran biodiversidad, la cual se estima en al menos 473 especies de plantas, de las cuales 22 son endémicas, 4 amenazadas (manglares), 2 raras y 5 bajo protección especial. Las especies arbóreas más comunes de los petenes son las especies de manglar *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*; todas bajo el estatus de “amenazada” dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Asimismo, se identifican otras especies vegetales como *Manilkara zapota*, *Ficus continifolia*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosea*, *Sabal yapa*, *Bravaisia berlandieriana*, *Metopium brownei*, *Bursera simaruba*, *Annona glabra*, *Pisonia aculeata* y *Acrostichum aureum* (Duran, 1995; Vázquez -Lule, 2009). En cuanto a la fauna en esta zona, se han registrado 449 especies, de las cuales 295 son aves, 65 son mamíferos terrestres, 68 de peces y 21 de reptiles; a su vez frente a las costas de Petenes y Celestún, circulan organismos representativos de 29 especies de cetáceos (i.e., cachalotes, principalmente) y una especie de sirénido (i.e., manatí) (Villalobos, 2004).

Para su protección y conservación, la zona de Los Petenes fue decretada como un área natural protegida estatal en 1996; después, en el año de 1999, fue catalogada como Reserva de la Biosfera, además de la oficialización de su programa de manejo en el 2006. Actualmente, la RBLP está comprendida dentro de las regiones prioritarias de México, incluyendo:

- Las Regiones Marinas Prioritarias Terrestres (RPT Petenes-Río Celestún, No. 145), el 87% de la superficie de manglar está comprendida en esta.
- Las Regiones Marianas Prioritarias (RMP No.60 Champotón-El Palmar), con el 92% de sitio de manglar.
- Las Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP No.102 anillo de Cenotes), 88% del sitio de manglar.
- Las áreas de importancia para la Conservación de las Aves (AICAS, Los Petenes, Clave de la AICA Se-28), 68% del sitio de manglar.

A su vez, a partir de febrero del 2004, se declaró sitio RAMSAR No. 1354 (90% del sitio de manglar), reconociéndose su valor como un humedal de importancia internacional (CONANP, 2016).

La RBLP fue seleccionada como zona de estudio principalmente por el acceso y disponibilidad de información para su análisis, además de tomarse en cuenta el grado de conservación de ésta, considerado como muy alto. También, por tratarse de un Área Natural Protegida (ANP) fue declarada en el año del 24 de mayo de 1999, como un importante sitio RAMSAR con humedales de gran relevancia biológica; adicionalmente, es reconocida como una de las zonas con mayor cobertura de mangle y que presta una gran cantidad de servicios ecosistémicos, y que además presenta un bajo impacto por las actividades humanas.

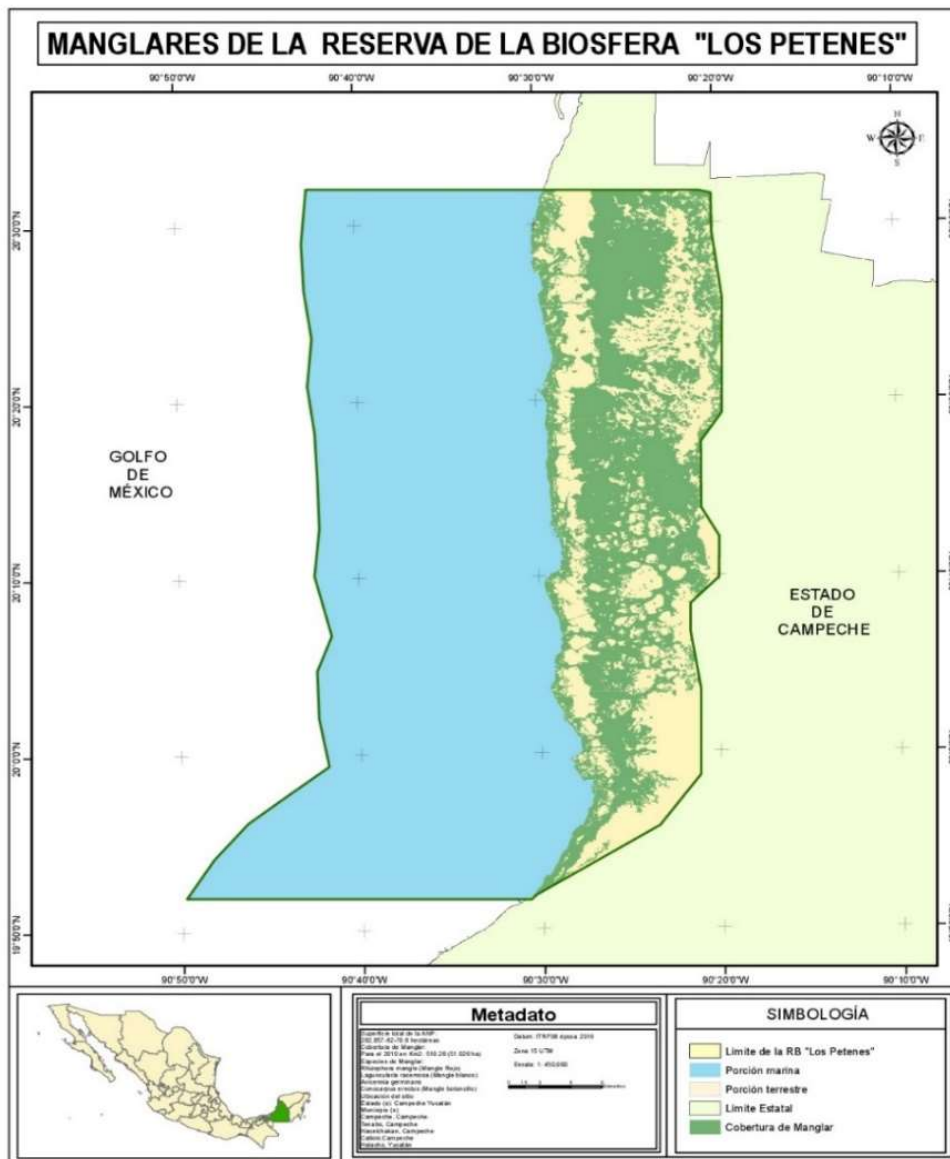


Fig. 13 Cobertura de manglar en la Reserva de la Biosfera “Los Petenes” Fuente: Elaboración propia.

4.1 Componentes del concepto de vulnerabilidad climática potencial futura

4.1.1 Estimación del componente de exposición ante la variabilidad de la temperatura y precipitación

En esta investigación, el componente de exposición está dado por el grado de variación de los parámetros climáticos durante el periodo de muestreo, en cada uno de los puntos muestreados mensualmente. La información climática base de esta investigación se obtuvo mediante la consulta de información climática proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), utilizando las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, así como herramientas de percepción remota. Para el análisis climático histórico, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda el uso de normales climáticas de al menos periodos de 30 años, las cuales servirán de referencia para poder comparar las observaciones recientes o presentes y, en particular, para fundamentar muchos conjuntos de datos basados en anomalías (por ejemplo, las temperaturas medias mundiales), también, tienen un uso generalizado para predecir las condiciones que muy probablemente se experimentarán en un lugar dado. Estas normales climáticas tienen un periodo de tiempo base correspondiente al intervalo del 1 de enero de 1961 al 31 de diciembre de 1990. Sin embargo, para este estudio se utilizó una normal climática parcial, con datos que van de los años 2009 al 2016; esto con la finalidad de que el periodo de tiempo de la información climática coincidiera con los años de muestreos realizados de variables fisicoquímicas del suelo (i.e., pH, salinidad, potencial Redox), para poder estimar el componente de sensibilidad relacionado con la variabilidad climática. Una normal climática parcial puede generar información tal que permite comparar y visualizar los cambios en el clima en el lugar de muestro en dos periodos de tiempo diferente, los cuales acentúan las anomalías climáticas si las hay.

La información consultada fue mensual y provenía de un total de 11 estaciones meteorológicas para la temperatura media anual y 13 estaciones para la precipitación total acumulada. Los datos fueron extraídos mediante el software ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica) y dichas estaciones se seleccionaron con base en la calidad y cantidad de la información proporcionada, así como por su cercanía a la zona de estudio, ya que no se encontraron estaciones meteorológicas funcionales dentro de esta. La Tabla 13 muestra a detalle las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio, así como su ubicación geoespacial.

Tabla 13. *Estaciones Meteorológicas consultadas para este estudio*

ESTACIÓN	LAT	LONG	PRECIP.	TEMP.
Campeche	19,83	-90,5	×	×
Campeche observatorio	19,83	-90,54	×	×
Hecelchakán	20,28	-90,18	×	×
Noh-yaxche	19,47	-90,25	×	×
Centro de investigación científica	20,98	-89,98	×	×
Mococha	20,13	-89,47	×	×
Muna	20,54	-89,77	×	×
Ticul	20,47	-89,58	×	
Chochola	20,73	-89,75	×	
Cantamayén	20,50	-89,58	×	
Campeche (EHCA)	19,85	-90,55	×	×
Celestún	20,86	-90,38	×	×
Bolonchen	20,00	-89,74	×	×
Xcupil	19,69	-89,90		×

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

La información de precipitación que brindaron las estaciones meteorológicas listadas anteriormente no estaba completa, puesto que existían meses y años consecutivos sin información o datos nulos (1248 mediciones posibles, 204 valores nulos). Por tal motivo, para complementar la información faltante, se consultó la base de datos climáticos mundiales de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM por sus siglas en inglés), y así poder tener una base de datos con menor sesgo de información. La TRMM es un conjunto de datos generados vía percepción remota para el estudio de la precipitación en los trópicos; entre los productos que brinda incluye observaciones de irradiancias, temperatura microondas, reflectividad radar, tasa de precipitación, perfil de precipitación vertical, conectividad y calentamiento estratiforme. Para la obtención de la información, se utilizó el buscador GIOVANNI de la NASA, ver Fig. 13 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>); el producto consultado fue el 3B43_V7, y este producto fusionó estimaciones de 3b42 y pluviómetros para una banda de latitud desde 50°N a 50°S; cuenta con una resolución espacial de 5 km en horizontal y 250 m en vertical (Liu et al. , 2012).

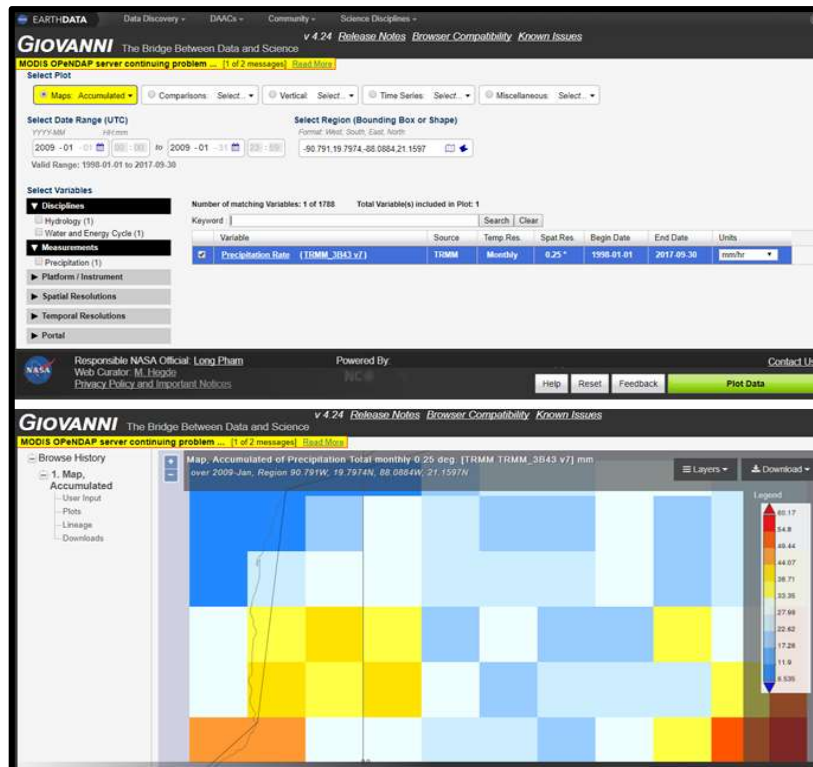


Fig. 14 Interfaz del visualizador de conjunto de datos GIOVANNI de la NASA

Se descargó el producto por cada mes dentro del intervalo 2009-2016 (96 mapas) y el formato de descarga fue NetCDF, el cual es un archivo de grilla en donde cada celda tiene un valor asociado de precipitación. Seguido a la descarga, cada archivo fue trabajado con el software SIG ArcMap. Una vez que se contó con la información mencionada, se transformó el archivo NetCDF a un formato raster mediante el comando “Make NetCDF Raster Layer” dentro del ArcToolbox. El mapa con formato raster, se transformó a formato vectorial de puntos y se modificó el sistema de coordenadas geográficas a uno planar UTM, para realizar una interpolación (IDW) que nos permite reducir el tamaño de celda y así tener un tamaño de celdas menor al que originalmente presentaba el producto (de 1132 a 90 m).

Con el mapa resultante de la interpolación, más la ubicación espacial de las estaciones, se procedió a obtener los datos faltantes en la base. Para ello, se identificó la estación, y posteriormente, la capa de interpolación correspondiente al mes/año; este procedimiento se realizó con cada uno de los 204 datos nulos, completando así la base de datos.

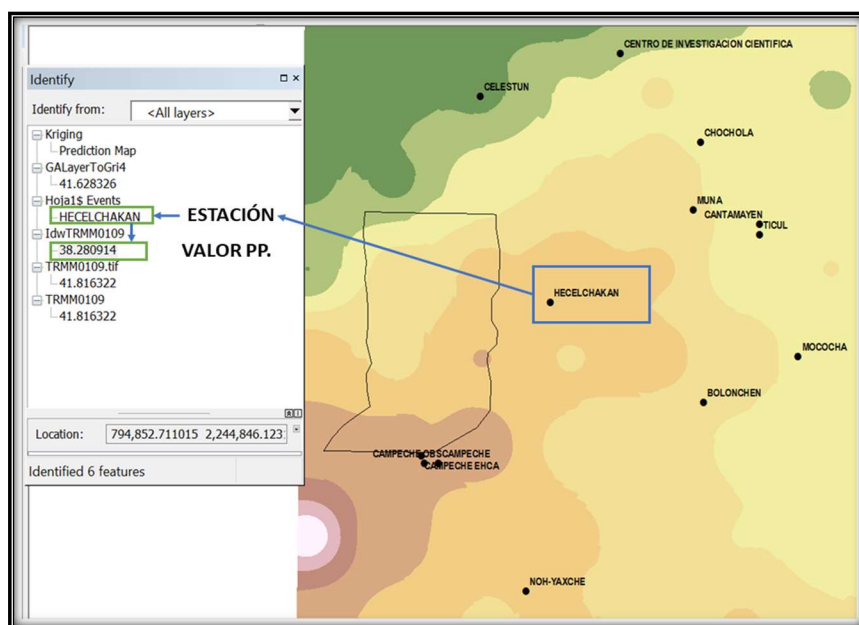


Fig. 15 Capa de interpolación IDW con la ubicación espacial de las estaciones y su respectivo valor de precipitación.

Para la construcción de isotermas e isoyetas, se realizó un método de interpolación. Lo anterior, debido a la forma irregular en la que están distribuidas las estaciones, a la ausencia de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, así como por las pocas estaciones que contaban con información de calidad (Johnston et al. 2001). Las isotermas e isoyetas en la zona de estudio arrojaron las variaciones en temperatura y precipitación mensuales dentro de ella del 2009 al 2016. Estas isotermas e isoyetas fueron elaboradas con el método de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés); este método determinístico usa una función inversa de la distancia y parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto, tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar. En este método se asumen que las predicciones son una combinación lineal de los datos (Murillo et al., 2012).

La selección del método de interpolación IDW sobre otros métodos como Kriging, se hizo con base en el número de datos y la poca correlación espacial entre ellos, además de que autores como Kravchenko (2003), recomienda el método IDW para bases de datos pequeñas, en donde los parámetros del semivariograma no son conocidos. También sugiere el uso de este método de interpolación cuando la distancia de muestreo es muy grande, e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de la correlación espacial.

Viera & González (2002) sugieren que dentro de las consideraciones prácticas para el cálculo del semivariograma, parte fundamental de los modelos geoestadísticos como Kriging, es

que se debe contar con entre 30 y 50 pares de observaciones para considerar estable el semivariograma. Asimismo, el semivariograma muestral debe ser considerado para pequeñas distancias en donde sus valores sean menores que la mitad de la distancia máxima. Lo anterior expuesto son las razones por las cuales no se optó por el método de Kriging de interpolación, que es el método más utilizado para interpolar este tipo de información, en cambio se utilizó el método de interpolación IDW

Las isotermas e isoyetas se elaboraron con el software SIG ArcMap 10.5. Con base en estas, se realizaron mapas mensuales obteniendo un total de 96 en formato raster, en el cual cada celda tiene asociado un valor de precipitación que servirá para conocer las variaciones en temperatura y precipitación dentro de la reserva (RBLP). Esta información fue un insumo relevante para la construcción de la base de datos que alimentaron el modelo de sensibilidad, a partir del cual se estimaron los niveles de vulnerabilidad esperados de la especie *Rhizophora mangle* en la zona de estudio ante el cambio climático.

4.1.2 Estimación del componente de sensibilidad: salinidad, pH, redox y temperatura intersticial

En la RBLP se analizaron dos áreas de manglar para el estudio: Peten Neyac que registra un importante grado de conservación y ecosistemas de petenes compuestos de una mezcla de manglares y selvas inundables; y los bosques de manglar de Río Verde que se caracterizan por un tipo borde con tendencia ribereño, borde y matorral. Esta área registra desarrollo turístico y el dren agrícola del valle de Edtzná. Estas dos zonas fueron seleccionadas principalmente porque existe presencia predominante de *Rhizophora mangle*, además para contrastar el grado de vulnerabilidad entre un bosque puro de manglar con aquellos con diferentes tipos de vegetación asociados al manglar. Además, son dos zonas con condiciones de conservación distintas, por un lado, Peten Neyac es una zona con alto grado de conservación, y Peten Río Verde por su cercanía con asentamientos humanos e infraestructura carretera, podría significar un diferente grado de exposición y sensibilidad, lo que derivaría en diferentes niveles de vulnerabilidad. Resultado de esto, implicaría la formulación de estrategias de fortalecimiento de la capacidad adaptativa, específicas para cada sitio.

Los muestreos se realizaron mediante la instalación de piezómetros de cloruro de polivinilo (PVC) de 4" de diámetro y 1.5 m de altura, distribuidos 2 en el cuerpo de agua, 4 en los bosques

de bordean la línea de costa y 4 en el bosque de manglar interno (Figura 16) y en donde *Rhizophora mangle* esta presente en mayor o menor medida (ver tabla 14). Cada tubo fue enterrado a una profundidad de 50 cm del suelo, con orificios de 0.5 cm de diámetro y a 30 cm de profundidad, para monitorear el agua intersticial donde se desarrolla la máxima biomasa de raíz. La temperatura, la salinidad, el potencial redox y el pH del agua intersticial se determinó *in situ* y mensual. El potencial redox se determinó mediante un YSI 100 multiparamétrico, mientras que la salinidad se midió con un refractómetro de salinidad marca A&O, con un intervalo de precisión de 0 a 100 ups. Previo a cada muestreo, se drenó el agua acumulada en los piezómetros (Agraz et al., 2012). El periodo de muestreo fue de 2009 a 2011 y de 2013 a 2016. El muestreo fue hecho de tal forma que el transecto cruzara por cada una de las franjas con presencia de *Rhizophora mangle*, considerando los diferentes tipos fisionómicos.

Al tener los datos del componente de sensibilidad y las isotermas del componente de exposición se procedió a la elaboración de una base de datos, la cual será utilizada para el análisis estadístico.



Fig. 16. Localización espacial de los sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Parcelas analizadas en el estudio.

Parcela	Tipo de manglar	Zonificación	Sitios	Especies
Petén Río verde	Borde	Orilla, Bosques de la orilla	1-6	Rm, Ag, Lr
	Matorral- cuenca	Bosque Interno	7-10	Rm y Ag
Petén Neyac	Borde	Orilla , Bosques de la orilla	1-6	Rm
	Cuenca - matorral	Interno	7-10	Rm y Ag

Rm=*Rhizophora mangle*, Ag = *Avicennia germinans*, Lr = *Laguncularia racemosa*

Posteriormente, se construyó una base de datos que alimentó el modelo de sensibilidad, en la cual se precisaron los puntos de muestreo y se indicaron las franjas dónde se realizó la recolección (i.e., en la orilla, en el bosque de la orilla y en el manglar interno). La base de datos incluyó la medición de las variables como el Redox, el pH, la salinidad y la temperatura intersticial para cada uno de los puntos de muestreo, precisándose tanto el mes como el año en que se recolectaron dichas muestras, comprendiendo un periodo del 2009 al 2016, excepto en el año 2012, que no se realizó el muestreo. Esta base que constituye la información de las variables que conforman el componente de sensibilidad, fueron complementadas con la información que se extrajo de las isotermas e isoyetas de cada punto de muestreo por mes del periodo analizado, que constituyen el componente de exposición asociado a la variabilidad climática. El modelo de sensibilidad fue alimentado por las diversas variables que constituyen cada uno de los componentes. Este modelo fue complementado con el análisis y construcción de gráficas para visualizar los niveles de tolerancia de cada uno de los parámetros medidos por sitio de muestreo y por franja muestreada. Lo anterior, con el fin de identificar si hay alguna tendencia en estos parámetros, además de compararlo con los niveles de tolerancia para este fenotipo en la reserva.

4.1.3 Estimación del modelo de impacto potencial

El clima y sus componentes son el principal factor responsable del modelaje del paisaje, así como de la formación del suelo y el desarrollo de la vegetación. Su acción genera una configuración ambiental única, bajo la cual las especies se establecen y se adaptan. Entre las condiciones ambientales que han sido moldeadas por el clima encontramos a la fisicoquímica del suelo, cuyos componentes son el potencial redox, el pH, la salinidad y la temperatura intersticial. Estos parámetros fisicoquímicos en el ambiente del manglar son altamente dependientes de la magnitud

de las variables climáticas; esto se ve reflejado en la estacionalidad en el área de estudio, y el comportamiento de las variables fisicoquímicas con respecto a estas. Por ejemplo, en la época de secas, variables como la salinidad aumentan conforme se incrementa la temperatura y desciende la precipitación, e inversamente disminuye si baja la temperatura y aumenta la precipitación. Por su parte, el potencial redox, además de ser dependiente de las variables climáticas, su comportamiento también está en función de la inundación mareal y de la sedimentación, ya que estos dos factores pueden modificar el tiempo que los manglares estén inundados. Bajo este contexto, las relaciones que se pueden presentar entre las variables se detallan en las siguientes ecuaciones, en donde los parámetros fisicoquímicos del ambiente del manglar dependen tanto de las variables climáticas como de las inundaciones, la sedimentación y la concentración de CO₂. Cabe mencionar, que para la estimación de los modelos de sensibilidad sólo se consideraron las variables de temperatura y precipitación, dado que sólo para estas variables se contó con información. Sin embargo, estas variables constituyen los principales parámetros climáticos con base en los cuales se construyen escenarios de cambio climático (Ecuaciones 1 a 4):

$$\mathbf{Redox} = f(\text{precipitación, temperatura, inundación mareal, sedimentación, evaporación, concentración de CO}_2\text{...}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\mathbf{pH} = f(\text{precipitación, temperatura, inundación mareal, sedimentación, evaporación, concentración de CO}_2\text{...}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\mathbf{Salinidad} = f(\text{precipitación, temperatura, inundación mareal, sedimentación, evaporación, concentración de CO}_2\text{...}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\mathbf{Temperatura Intersticial} = f(\text{precipitación, temperatura, inundación mareal, sedimentación, evaporación, concentración de CO}_2\text{...}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Con base en el modelo teórico, se parte de que las variables independientes como el Redox, el pH, la salinidad y la temperatura intersticial pueden ser afectadas como resultado de la variabilidad de la temperatura y la precipitación, las cuales constituyen el componente de exposición. Por ende, para poder conocer en qué medida dicha variabilidad impacta los componentes fisicoquímicos de la especie *Rhizophora mangle* se estimó un modelo Logit.

Los modelos Logit, conocidos como modelos de elasticidad, permiten determinar por cada cambio porcentual de la variabilidad climática, cómo se modifican las variables fisicoquímicas

también en términos porcentuales; en otras palabras, permite conocer la sensibilidad del ecosistema estudiado resultado de la variación de la precipitación y la temperatura, o sus efectos combinados. Evidentemente, cambios en los parámetros climáticos juegan un papel determinante en la salud del ecosistema, siendo fundamental conocer los impactos que pudieran tener la especie *Rhizophora mangle* de la RBLP; esto con el fin de poder guiar las mejores estrategias de adaptación para favorecer su conservación.

La forma funcional del modelo de elasticidad mencionado se detallan a continuación (Ecuaciones 5 a 8):

$$\ln \text{Redox}_t = \beta_{\text{precip}} \ln \text{Precip}_t + \beta_{\text{temp}} \ln \text{Temp}_t + U_t \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\ln \text{pH}_t = \beta_{\text{precip}} \ln \text{Precip}_t + \beta_{\text{tem}} \ln \text{Tem}_t + U_t \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\ln \text{Salinidad}_t = \beta_{\text{precip}} \ln \text{Precip}_t + \beta_{\text{tem}} \ln \text{Tem}_t + U_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\ln T^\circ \text{ Agua Intersticial}_t = \beta_{\text{precip}} \ln \text{Precip}_t + \beta_{\text{tem}} \ln \text{Tem}_t + U_t \quad (\text{Ecuación 8})$$

El término U_t agrupa los impactos que las otras variables mencionadas en las ecuaciones (1 a la 4) tienen sobre la variable dependiente (i.e., Redox, pH, salinidad, temperatura del agua intersticial). Por otro lado, los parámetros β_i estiman la elasticidad, que en otras palabras para esta investigación, representan la sensibilidad que tiene la especie *Rhizophora mangle* en la zona de estudio ante las variaciones históricas de la temperatura media y la precipitación total acumulada. Dichas variaciones afectan directamente a las características fisicoquímicas del ambiente del manglar, por lo que influyen en la salud de ecosistema. Por ende, el parámetro β_i representa los cambios porcentuales esperados en las variables analizadas.

Este tipo de resultados son útiles para facilitar la elaboración y comprensión de la construcción de escenarios, en donde cambios en variables como la temperatura, la precipitación y la evaporación, pueden afectar variables que son determinantes para la salud de la especie *Rhizophora mangle* en la RBLP. Por consiguiente, a partir de la sensibilidad del manglar a las variaciones climáticas se construyeron escenarios de cambio climático, que permiten conocer los impactos potenciales que este fenómeno tendrá sobre la salud del manglar en el corto (2015-2039), en el mediano plazo (2045-2069) y en el largo plazo (2075-2099).

El parámetro β_i , que representa la elasticidad, puede tomar valores de $-\infty$ a $+\infty$. Cuando la elasticidad (β) toma valores superiores a 1 [$\beta > 1$], los incrementos en un uno por ciento de la

variable independiente, afectan más que proporcionalmente a la variable dependiente. Por ejemplo, si las variables analizadas fueran el pH y la temperatura, y la elasticidad estimada fuera superior a 1, implicaría que las variaciones en la temperatura afectan más que proporcional el pH, el cual podría aumentar o disminuir aceleradamente, lo que tendría implicaciones relevantes hacia el manglar.

Con el fin de conocer con mayor detalle la relación existente entre las variaciones climáticas históricas y las características ambientales mencionadas, se decidió analizar la sensibilidad presente en Peten Neyac y Río Verde. La ubicación de los sitios de muestreo (al norte y sur de la RBLP) permitió considerar diferencias en términos de las condiciones climáticas y fisionómicas, por lo que permitió conocer los impactos diferenciales del cambio climático sobre un sitio con una mejor conservación y un sitio que enfrenta afectaciones resultado de las actividades antropogénicas.

4.2 Pasos para validar el modelo de sensibilidad

Una vez estimados los modelos logísticos para validar si son robustos se procedió a:

- 1) Analizar las pruebas de hipótesis, considerando como hipótesis nula (H_0) que la sensibilidad encontrada en el modelo del manglar es estadísticamente significativa cuando $\alpha < 0.05$.
- 2) Estimar pruebas para determinar que no hay problemas de autocorrelación y heterocedasticidad en los parámetros calculados, los cuales pueden provocar que dichos parámetros se encuentren sesgados. La ocurrencia de parámetros sesgados implica que la varianza de los residuos no es constante, lo cual se atribuye a problemas en la información (i.e., variables omitidas o redundantes).
- 3) Analizar los resultados de la elasticidad:
 - Si $\beta > 0$, los incrementos en un 1% en la temperatura y la precipitación provocarán un incremento más que proporcional en las variables ambientales en una magnitud β_i .
 - Si $\beta < 0$, los incrementos en un 1% en la temperatura y la precipitación provocarán un incremento menos que proporcional en las variables ambientales en una magnitud β_i .

Por medio de la estimación de la sensibilidad de los parámetros fisicoquímicos del manglar ante la variabilidad histórica de la temperatura y de la precipitación, será posible conocer cómo ante los escenarios de cambio climático en el corto, mediano y largo plazo, se esperaría que la salud del manglar se vea afectada. De allí, la relevancia de utilizar el modelo Logit o de elasticidad, con

el fin de poder construir escenarios de vulnerabilidad de la especie *Rhizophora mangle* ante los impactos del cambio climático. En el siguiente apartado, se explica el proceso de selección de los escenarios de cambio climático utilizados en la presente investigación.

4.3 Selección y elaboración de escenarios climáticos

Los escenarios climáticos son una descripción plausible de un posible estado del clima futuro en el mundo, por lo que se trata de proyecciones posibles, pero no son pronósticos. Para construir dichos escenarios se estimaron Modelos de Circulación General de la atmósfera (MCG), que son modelos numéricos que representan procesos físicos en la atmósfera, en los océanos, en la criósfera y en la superficie terrestre. Estos MCG son las herramientas disponibles más avanzadas para simular la respuesta del sistema climático global ante el incremento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Estos modelos tienen una resolución espacial de decenas de kilómetros y contienen una mejor representación de la topografía y los usos de suelo en la región de interés. Hay numerosos MCG regionales y escenarios de emisión de GEI, basados en diferentes trayectorias de concentración representativa (RCP); estos RCP son escenarios que se centran en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en los impulsores naturales como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales de CH₄ o N₂O; estos también pueden representar una variedad de políticas climáticas, es decir, cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. Por ejemplo, el RCP 2.6 es un escenario de mitigación, en donde las emisiones de GEI están disminuyendo y las políticas públicas están surtiendo efecto para reducirlas. El RCP 4.5 y 6.0 son escenarios de estabilización, en los cuales los GEI están aumentando para el año 2100 con lentitud; mientras que el RCP 8.5 es un escenario con altas concentraciones de GEI y en donde las políticas y la combinación de factores socioeconómicos, hacen que las emisiones aumenten rápidamente (IPCC, 2015).

Debido a los numerosos modelos climáticos regionales y sus diferentes RCP, evidencia la incertidumbre presente en la modelación del clima futuro, por ello uno de los principales retos para la construcción de escenarios de vulnerabilidad es la selección de un subconjunto de escenarios que

tengan la menor incertidumbre, para lo cual se analizó su capacidad de reproducir el clima histórico, considerando que si pueden reproducir de manera certera el pasado, tendrán la capacidad de reproducir el clima en el futuro. Adicionalmente, se utilizó como método de selección los percentiles, ya que provee una justificación para la selección de escenarios de emisiones que son representativos de un conjunto completo de escenarios disponibles. Este método selecciona hasta 10 escenarios sobre una base estadística, tal que 5 escenarios son seleccionados debido a que representan el 5°, 25°, 50°, 75°, y 95° percentiles tanto para el parámetro climático relacionado con las variaciones en la temperatura media como para la precipitación total acumulada. Estos subconjuntos de escenarios representan una gama completa de climas futuros previstos, y por lo tanto, pueden ser utilizados para investigar la tendencia central por medio del grupo de climas, así como el efecto de climas más extremos (Ministry of Environment, 2010) (Ver Figura 18). Los MCG utilizados, así como su RCP correspondiente y la posición que guardan dentro de la selección por percentiles se pueden visualizar en la Tabla 14.

La Figura 17 describe una distribución normal con los percentiles considerados, con el fin de integrar la mayor variedad de climas futuros a la investigación.

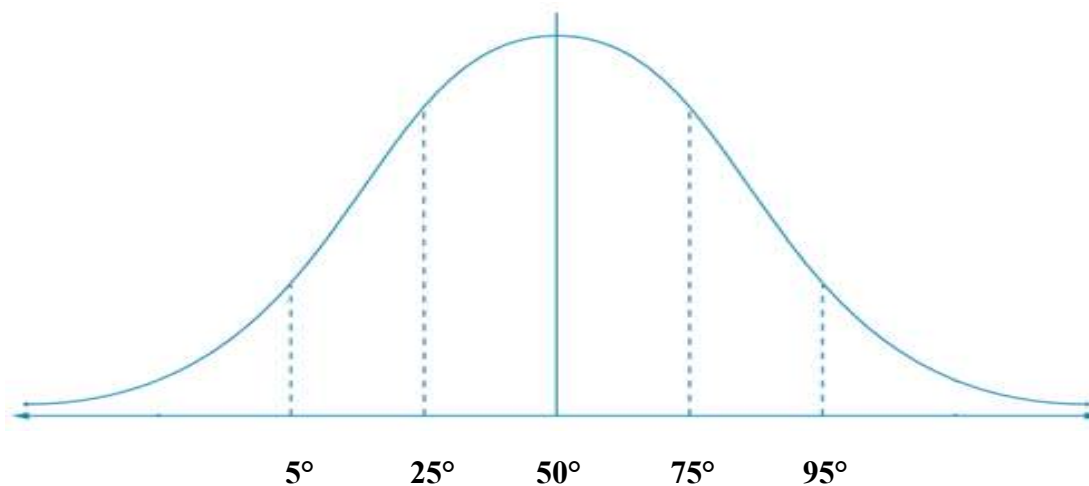


Fig. 17 Percentiles utilizados para la selección de escenarios de cambio climático

Los escenarios seleccionados fueron elaborados tanto para la variación de la temperatura media anual (en °C) como para la variación proyectada para la precipitación total acumulada (en %), para tres horizontes de tiempo que comprenden el corto plazo (2015-2039), el mediano plazo

(2045-2069) y el largo plazo (2075-2099). Los escenarios seleccionados para esta investigación se detallan en la Tabla 15:

Tabla 15. Escenarios de cambio climático seleccionados con su respectivo RCP e institución responsable de desarrollarlo

Posición	Escenario	Institución Responsable	País	RCP
5	CNRMCM5	National Centre for Meteorological Research	EE.UU	4.5
15	MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	8.5
50	GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EE.UU	8.5
75	HADGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	4.5
95	HADGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	8.5

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado, se generaron un total de 15 mapas por componente (i.e., temperatura media y precipitación total acumulada), es decir, un mapa para cada uno de los 5 escenarios climáticos seleccionados, para tres horizontes de tiempo antes especificados. La Figura 18 muestra la ubicación del área de estudio dentro de la retícula de escenarios climáticos en de la Península de Yucatán, a su vez la porción que será utilizada como escenarios climáticos a escala local.

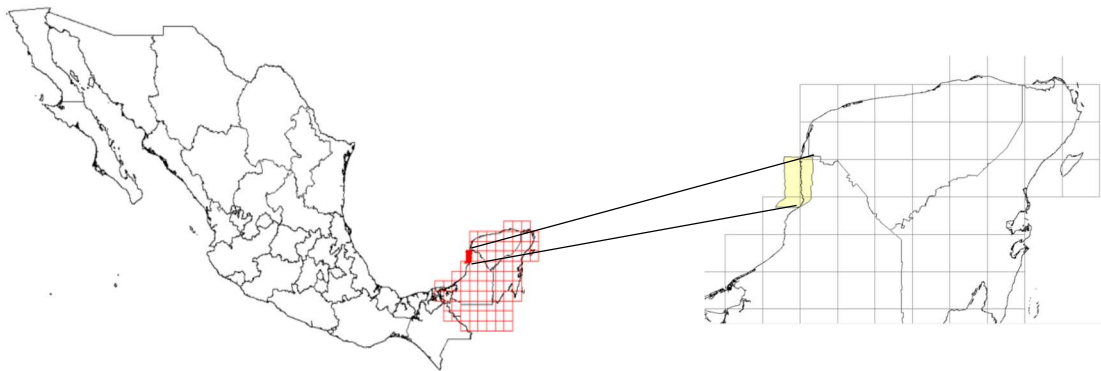


Fig. 18 Escenarios de Cambio climático en la Reserva de la Biosfera Petenes.

En el siguiente apartado se presentan los resultados de la estimación del modelo Logit y la construcción de escenarios de vulnerabilidad para la especie *Rhizophora mangle* en la RBLP.

4.4 Conclusiones del capítulo

La RBLP es considerada una área natural muy importante, debido a las grandes extensiones de manglar con la que cuenta y al grado de conservación del mismo, que ha logrado mantener a pesar de la fuerte presión antropogénica y climática, derivadas del impacto de huracanes o tormentas tropicales. Su conservación es fundamental ya que posee 4 especie de manglar catalogadas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 con el estatus de amenazada, también es un humedal con importancia para la conservación o RAMSAR que provee de numerosos servicios ecosistémicos que benefician a las comunidades aledañas.

Para el análisis de la vulnerabilidad de la RBLP es necesario el uso de diferentes mecanismos de medición para obtener los parámetros climáticos durante el periodo de muestreo (2009-2016), para esto se obtuvo la información tanto del Servicio meteorológico Nacional como de la Misión de Medición de Lluvia Tropical y con la ayuda tecnológica de programas como el software ERIC, el buscador GIOVANNI de la NASA, se pudo obtener todos los parámetros necesitados. también el aprovechamiento de softwares como SIG ArcMap con el que se trabajó toda la información volviendo esta información un mapa en formato ráster.

El análisis y comparación de dos áreas de manglar tiene la finalidad de observar los cambios que este tienen bajo condiciones de contacto directo a asentamientos humanos (Río Verde) y una zona completamente conservada (Petén Neyac), además de que ambas zonas la vegetación es distinta; ya que en la primera existe una mezcla de manglar y selva en la segunda predomina el manglar; también, el analizar dos áreas que se encuentran en la misma zona, pero con características diferentes permite tener un mayor acercamiento a la vulnerabilidad de la RBLP. Otros parámetros que se tomaron en cuenta para conocer la vulnerabilidad de la zona son la temperatura, la salinidad, el potencial redox y el pH del agua intersticial y estos datos se obtuvieron in situ y mensual durante el periodo analizado. Con todos estos datos recopilados se generó una base de datos que alimentó el modelo de sensibilidad, el modelo fue complementado con el análisis y construcción de graficas para visualizar los niveles de tolerancia de cada parámetro medido con el fin de identificar la tendencia de estos y así poder compararlo con los niveles de tolerancia para este fenotipo en la reserva.

Entre las condiciones ambientales que han sido modificadas por el clima se encuentran la fisicoquímica del suelo, las cuales son el potencial redox, el pH, la salinidad y la temperatura intersticial. Estos parámetros en el manglar son altamente dependientes de la magnitud de las variables climáticas. Para la estimación de los modelos de sensibilidad sólo se consideraron las variables de temperatura y precipitación, debido a que son las únicas con las que se contó con información. Sin embargo, estas variables constituyen los principales parámetros climáticos con base en los cuales se construyen escenarios de cambio climático. Con base en el modelo teórico, se parte de que las variables independientes como el Redox, el pH, la salinidad y la temperatura intersticial pueden ser afectadas como resultado de la variabilidad de la temperatura y la precipitación, las cuales constituyen el componente de exposición, relacionando así el hecho de que la sensibilidad del sistema esta directamente relacionada a la exposición que tiene este ante los cambios climáticos. Por ello se genera un modelo Logit, el cual permite conocer la sensibilidad del ecosistema estudiado, obteniendo la variación de la precipitación y la temperatura, o sus efectos combinados en el sistema. Por medio de la estimación de la sensibilidad de los parámetros fisicoquímicos del manglar ante la variabilidad histórica de la temperatura y de la precipitación, es posible conocer cómo se verá afectada la salud del manglar ante los escenarios de cambio climático en el corto, mediano y largo plazo. De allí, la relevancia de utilizar el modelo Logit, con el fin de poder construir escenarios de vulnerabilidad de la especie *Rhizophora mangle* ante los impactos del cambio climático.

Ahora bien, con la información derivada de la aplicación del modelo podemos inferir la vulnerabilidad de los sistemas actualmente y poder generar proyecciones que nos permita ver que sucederá con el sistema con el paso del tiempo ante los cambios climáticos que se presentaran en el futuro. Los escenarios climáticos nos darán una descripción plausible de un posible estado del clima futuro en el mundo, siendo proyecciones posibles mas no pronósticos de lo que sucederá. Para construir dichos escenarios se estimaron Modelos de Circulación General de la atmosfera (MCG), que son modelos numéricos que representan procesos físicos en la atmosfera, en los océanos, en la criósfera y en la superficie terrestre. uno de los principales retos para la construcción de escenarios de vulnerabilidad es la sección de un subconjunto de escenarios que tengan la menor incertidumbre, para lo cual se analizó su capacidad de reproducir el clima histórico, considerando

que si pueden reproducir de manera certera el pasado, tendrán la capacidad de reproducir el clima en el futuro.

Con estos escenarios contruidos se pueden tomar decisiones de acción en la zona de estudio para contrarrestar los efectos futuros del cambio climático, que como sabemos aun cuando es un proceso natural actualmente es un proceso acelerado que afectara al mundo y en el caso de la RBLP podría ser una buena manera de generar mejores acciones de conservación para así proteger a la población relacionada con ella.

IV. RESULTADOS

5. Escenarios de vulnerabilidad para *Rhizophora mangle* ante el cambio climático

Para conocer los escenarios de vulnerabilidad futura de la especie, primero se hizo un análisis de las condiciones ambientales en las que se encontraba y se encuentra, estos datos a su vez nos brindaran a grandes rasgos la tendencia que tienen los datos y su posible comportamiento a futuro, esto sin considerar aun escenarios de cambio climático, que es el siguiente paso para determinar la vulnerabilidad de *Rhizophora mangle* a corto, mediano y largo plazo.

5.1 Comportamiento histórico de la temperatura y precipitación en la RBLP

La información climática brindada por las estaciones meteorológicas consultadas, indican que la temperatura tiene una tendencia a incrementarse dentro del intervalo de tiempo del muestreo, siendo el año 2015 el periodo en el que se registró la máxima observación (28.19°C); por su parte, el año 2010 es el año con la temperatura promedio más baja que se registró (24.03°C). La figura 19 representa la temperatura media anual en RBLP en el eje vertical y el año de muestreo en el horizontal.

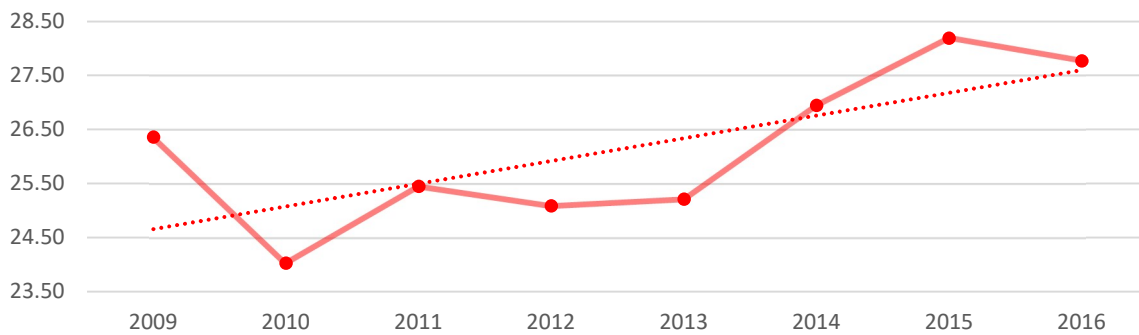


Fig. 19 Comportamiento de la temperatura atmosférica en la zona de estudio entre los años 2009-2016. Elaboración propia con datos de Agraz Hernandez

Con respecto a la a precipitación total acumulada en el área de estudio durante el periodo de muestreo, se identificó una ligera tendencia a incrementarse. El año más húmedo corresponde al 2013 con aproximadamente 1,432.60 mm en promedio con respecto a la precipitación total acumulada, según los datos de las estaciones meteorológicas consultadas. El año en donde se identificó un déficit de precipitación total acumulada es el año 2009 con 859 mm, dado que en este año se identificó un periodo de sequía severa; lo anterior coincide con lo reportado por Agraz Hernández (2015). La Figura 20 representa la variación de precipitación en mm por cada año de muestreo.

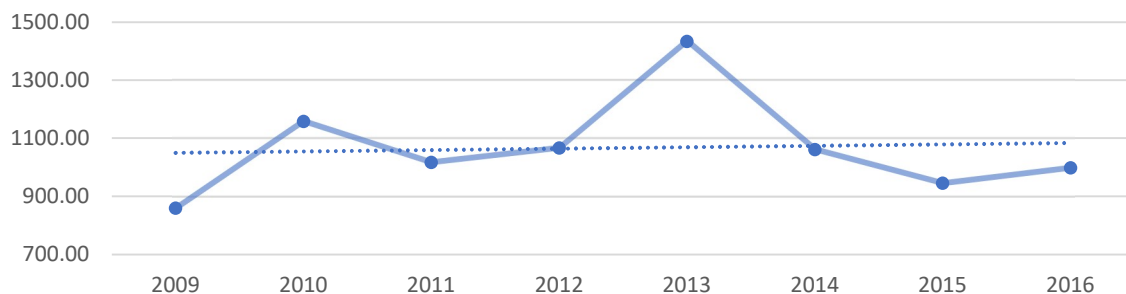


Fig.20 Comportamiento de la precipitación en la zona de estudio entre los años 2009-2016. Elaboración propia con datos de Agraz Hernandez

Es evidente una acción inversa entre precipitación y temperatura, es decir en años con mayor precipitación como son el 2010 y 2013, también tienen menor temperatura, asimismo, en los años

2009 y 2015 son años con menor precipitación tuvo en el periodo de muestreo y a su vez es el que mayor temperatura alcanzo. Es probable que estos picos en la precipitación, en especial en el 2013 hayan sido resultado de la acción de diversos fenómenos hidrometeorológicos que tuvieron influencia directa en el área de estudio. La tendencia nos dice que la temperatura tendio a incrementarse rápidamente con respecto al tiempo, mientras que la precipitación también lo hizo, pero de manera más tenue.

5.2 Comportamiento de las variables fisicoquímicas en Petén Río Verde

Para el análisis de las variables fisicoquímicas se considera la siguiente clasificación (ver tabla 16:

Tabla 16. *Clasificación de la salinidad y potencial redox del agua intersticial en los bosques de manglar, con base en Cronk and Siobhan Fennessy (2001); Agraz Hernández et al. (2007); Chan Keb (2007).*

Clasificación Salinidad	Intervalo (UPS)
Dulceacuicola	0-9
Oligohalino	10-19
Mesohalino	20-45
Euhalino	46-70
Hiperhalino	+70
Clasificación Redox	Intervalo (mV)
Óxico	Redox > -220
Óxico-Hipóxico	(-221) – (-300)
Hipóxico	Redox < -300
Clasificación pH	Grado de Acidez
Muy Ácido	pH<5.5
Ácido	5.6>pH>6.5
Neutro	6.6>pH>7.5
Básico o Ligeramente alcalino	7.6>pH>8.5
Muy alcalino	pH>8.6

Con los datos obtenidos en el área de estudio, se elaboraron gráficas para conocer el comportamiento de las variables fisicoquímicas del agua intersticial, estudiadas en el lapso muestreado. Las gráficas muestran las mediciones promedio por franja de manglar orilla, bosque orilla y manglar interno.

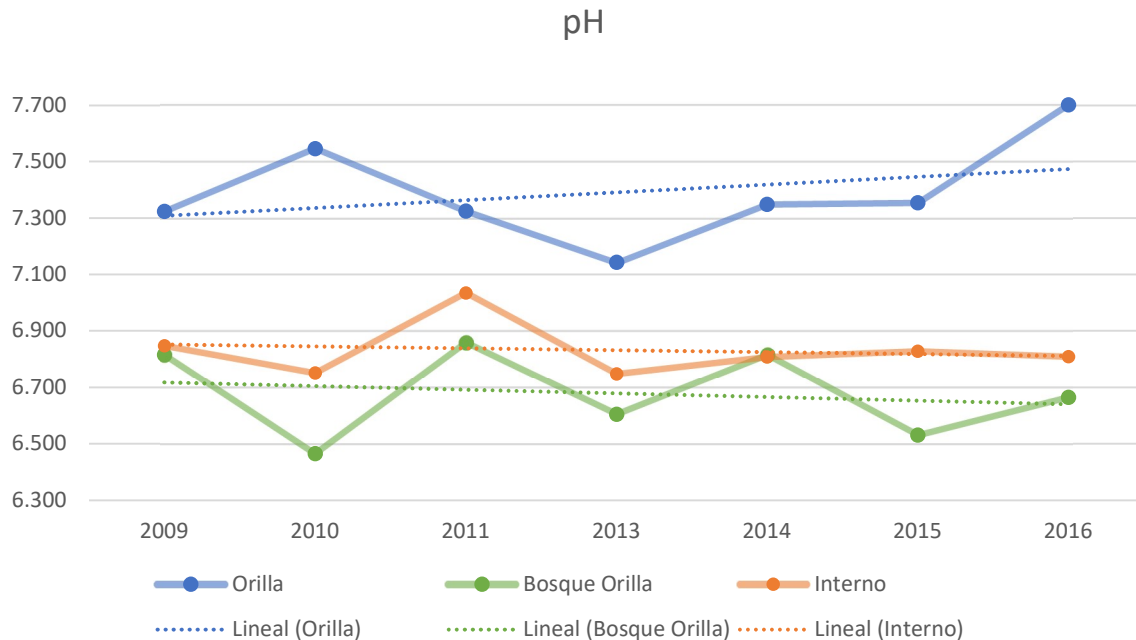


Fig. 21 Comportamiento del pH en el periodo 2009-2016 en Petén Río Verde. Elaboración propia con datos de Agraz Hernández

El potencial de hidrógeno se comporta de manera diferente en cada franja; la franja de la orilla tiene niveles ligeramente alcalinos, a la cercanía con el mar y la cantidad de sales que contiene, y a la meteorización de compuestos calcáreos, generando la presencia de más compuestos alcalinos con los que entra en contacto. Por su parte, la franja de manglar interno es ligeramente ácido, mientras que los bosques de la orilla presentan los niveles de acidez más altos de la zona. El año 2010 y 2016 presentan un grado de acidez mayor, esto podría deberse a la acción de la marea y la precipitación, los compuestos carbonatados son lavados, y esto aunado a la gran producción de hojarasca típico de este ecosistema y la formación de ácidos que produce su degradación, esto es posible que provoque que el nivel de pH se acidifique como se muestra en la Figura 21, en donde el eje horizontal representa los años de muestreo, mientras que el eje vertical el valor de pH, esto para cada una de las franjas de manglar estudiado.

La temperatura del agua intersticial se comporta de acuerdo con las estaciones y periodos de lluvias y secas en la zona, la franja de la orilla es la que presenta mayor temperatura, provocado probablemente por la falta de sombra generada por la copa de los árboles; en caso contrario a la franja de bosque de la orilla en donde las mediciones de temperatura fueron más bajas, debido a la menor acción de radiación solar sobre el sedimento, ya que el dosel impediría la entrada directa de

los rayos solares. El valor de temperatura máximo alcanzado fue de 29.04 °C en el año 2009 en la franja de la orilla; mientras que el mínimo se registró en el año 2011 en la franja de bosque de la orilla y fue de 25.60 °C. En la figura 22 se observa el comportamiento de esta variable con respecto a los años de muestreo.

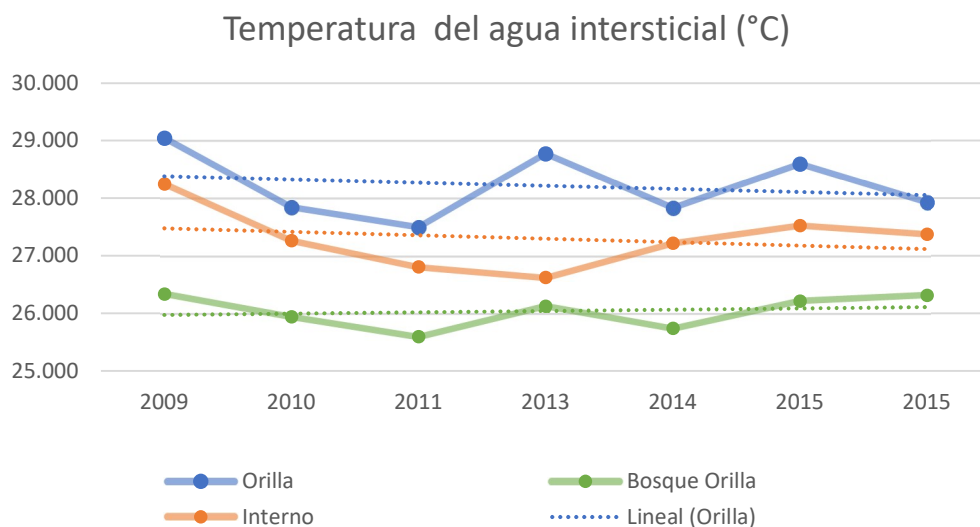


Fig. 22 Comportamiento de la Temperatura de agua intersticial en el periodo 2009-2016 en Petén Río Verde. Elaboración propia, con datos de Agraz Hernández.

La Figura 23 representa el valor del potencial redox con respecto a los años de muestreo. El potencial redox es un indicador de la presencia de oxígeno en el agua, y podría estar relacionado con la descomposición de la hojarasca del manglar y procesos de bacterianos y de sedimentación. El potencial redox por franja es diferente entre cada una, en donde se presenta condiciones de óxicas a hipóxicas; en el sentido contrario al cuerpo de agua, es decir la orilla del manglar posee condiciones óxicas; los bosques de la orilla van de hipóxicas a anóxicas; y el manglar interno son hipóxicas. Es clara la influencia de los tipos fisionómicos de manglar sobre este parámetro, ya que en las primeras dos franjas al ser un manglar del tipo borde hace que exista una mayor producción de biomasa comparado con un tipo matorral como en las franja interna, esto se traduciría en hojarasca que potencialmente se oxidará, y proveerá de mayor cantidad de oxígeno a la planta. En caso contrario, al manglar interno en donde al ser un matorral su producción de biomasa es reducida, y por ende, hay condiciones con menor cantidad de oxígeno que utilizan métodos bacterianos y fúngicos para su obtención .

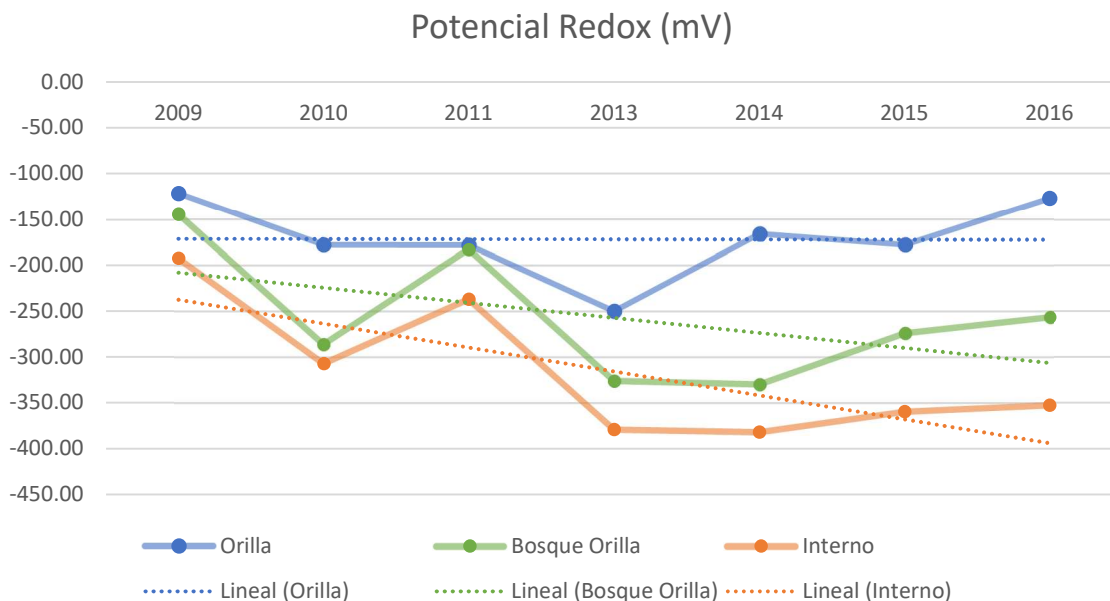


Fig. 23 Comportamiento del Redox en el periodo 2009-2016 en Petén Río Verde. Elaboración propia, con datos de Agraz Hernández

La salinidad se comportó diferente en cada franja de manglar, el interior es el que presento las salinidades más altas, esta franja es dominada por *Avicennia germinans*, especie con mayor tolerancia a este parámetro (Jiménez & Lugo, 2000). Por su parte, las franjas de orilla y bosques de la orilla se comportan de manera similar, pero el gradiente de salinidad aumenta conforme se aleja del cuerpo de agua principal (Figura 24).

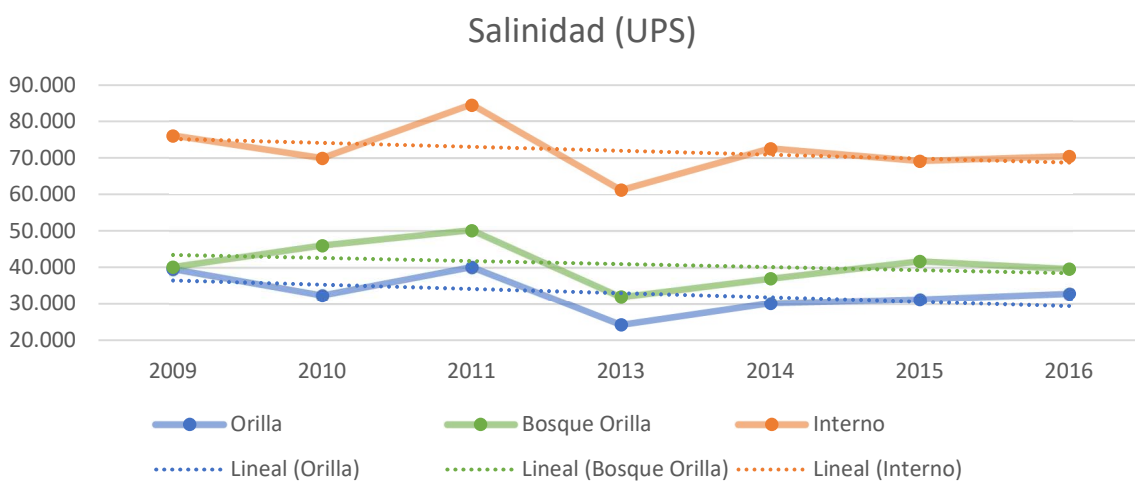


Fig. 24 Comportamiento de la salinidad en el periodo 2009-2016 en Petén Río Verde. Elaboración propia con datos de Agraz Hernández.

Dichas condiciones de salinidad solo hacen posible que el mangle negro tenga mayor presencia en la franja interna, caso contrario a *Rhizophora mangle* que es rara en esa franja esto debido a que no tolera salinidades tan altas. Las plantas que habitan esta franja se caracterizan por tener un menor tamaño de las hojas, menor altura, bifurcación más temprana y profusa, y la asignación de una proporción más alta de biomasa en las raíces, además de tener menor capacidad fotosintética y de transpiración, este último como mecanismo para hacer frente a la salinidad (Yañez et al., 2009). La figura 24 representa gráficamente el nivel de salinidad promedio en Petén Rio Verde durante el periodo de muestreo.

5.3 Comportamiento de las variables fisicoquímicas en Petén Neyac

El comportamiento del pH en Neyac va de condiciones básicas a ligeramente ácidos con respecto a la cercanía con el mar. Cada franja en este peten posee distintos niveles de pH, la orilla posee mayor alcalinidad como la mayoría de los suelos minerales, debido principalmente a la acción de la marea y de la escorrentía, que arrastran todos los sedimentos calcáreos y carbonatados. Las franjas de bosque de la orilla e interno tiene niveles de pH ligeramente ácido a neutro, debido principalmente a la naturaleza orgánica de los suelos y la acumulación de ácidos derivados de los procesos de descomposición de la hojarasca. La figura 25 muestra las variaciones en los niveles de pH por franja estudiada durante el periodo de muestreo, así como la tendencia de los datos.

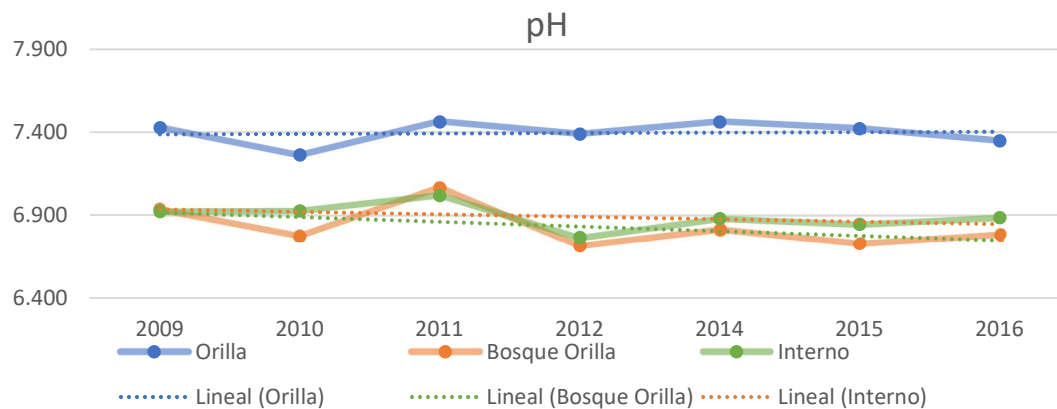


Fig. 25 Comportamiento del pH en el periodo 2009-2016 en Petén Neyac. Elaboración propia con datos de Agraz Hernández

La temperatura del agua en el sedimento osciló entre los 25°C y los 28°C, la temperatura actúa de forma coherente con los años menos cálidos en todo el muestreo (2010-2013), la diferencia en temperatura entre cada franja se da de acuerdo a la incidencia de la radiación solar sobre el suelo, la franja con mayor temperatura es la orilla, como consecuencia de la acción directa de los rayos solares. El manglar interno tiene una temperatura intermedia con respecto a la orilla y al interno, esto podría ser derivado de sus atributos forestales y morfológicos propios de un matorral y también a como consecuencia de la alta salinidad en la franja, provocando que los rayos solares ingresen en mayor medida sobre el suelo del manglar. Por último la franja con menor temperatura registrada durante el muestreo son los bosques de la orilla, gracias al tamaño del dosel y tamaño de la hoja de la planta, lo cual dificulta que los rayos solares impacten sobre el suelo y manteniendo una temperatura óptima para su crecimiento y procesos de descomposición de hojarasca. En la figura 26 se puede visualizar la temperatura del agua intersticial del Peten Neyac durante todo el muestreo y su comportamiento por franja.

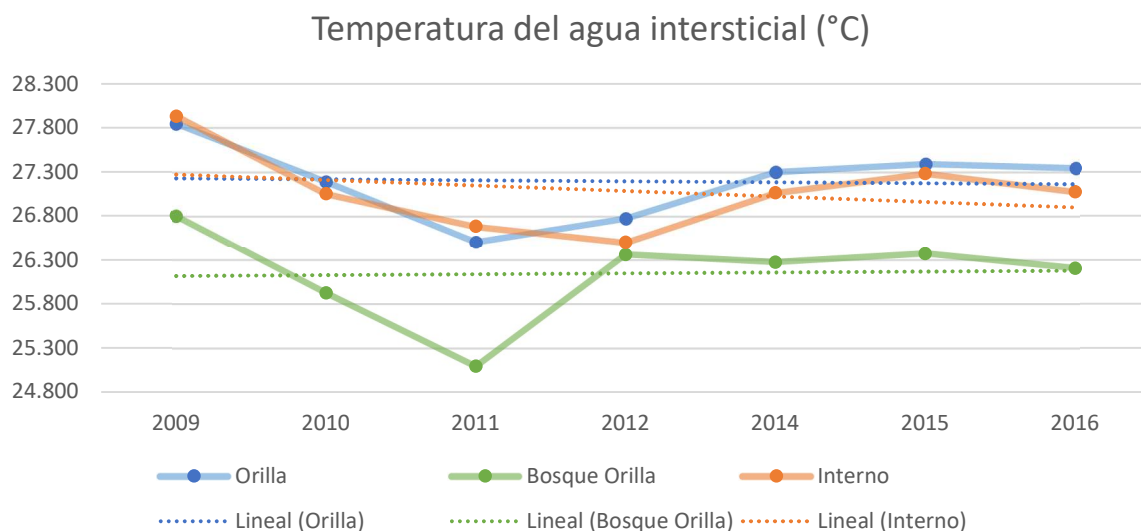


Fig. 26 Comportamiento de la Temperatura del agua intersticial en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac. Elaboración propia con dato de Agraz Hernández.

En la figura 27 se pueden visualizar los distintos niveles de potencial oxido-reducción por franja muestreada de los años 2009 al 2016 en la RBLP, y sus tendencias, se puede notar que cada franja muestra distintos niveles dependiendo de la cercanía con el cuerpo de agua y el tipo fisionómico del manglar. El Potencial redox en Peten Neyac van desde condiciones oxicas a hipóxicas en general (Ver Tabla 15), el análisis por franja dio como resultado que el manglar

interno tiende a ser hipóxico, estos valores se dan como consecuencia de largos periodos de residencia del agua, escaso flujo de agua dulce y salada y un alto porcentaje de materia orgánica. El tipo fisionómico del manglar interno es tipo cuenca, el cual favorece los estancamientos de agua e imposibilitan la circulación de la misma por hidroperiodo. El suelo de los manglares de la orilla tienen tendencia a ser óxico en los primeros años de muestreo, pero con años con mayor tendencia hacia lo hipóxico, pero a menor nivel que el nivel interno, los primeros 3 años de muestreo mostraron un comportamiento errático, con picos en cuanto a oxidación y reducción, el 2009 fue el año con niveles más oxidantes en toda la franja. El año 2011 se visualiza un punto de inflexión hacia niveles de condiciones más reductoras, es el año en el que este parámetro comienza a estabilizarse en niveles oxicos-hipoxicos, como consecuencia a la disminución del flujo de agua dulce sobre la franja, evitando la oxigenación del suelo. Por su parte la franja de la orilla la más cercana al cuerpo de agua presenta condiciones oxicas como resultado de la acción de la marea que permite la oxigenación del suelo, estas condiciones van a tender a incrementar el estado de oxidación.

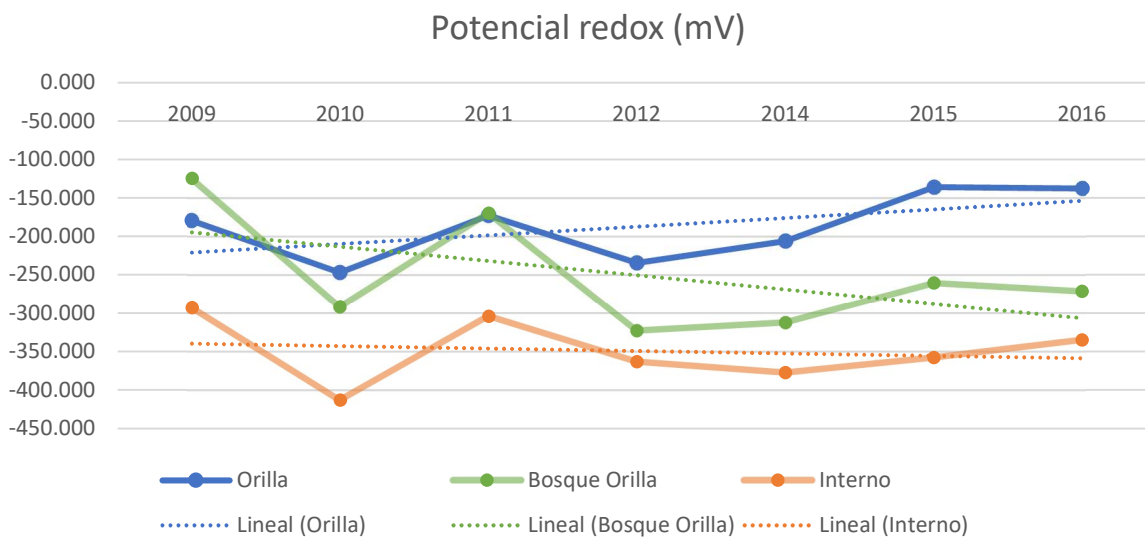


Fig. 27 Comportamiento del potencial redox en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac. Elaboración propia con datos de Agraz Hernández

La salinidad en las franjas de Peten Neyac son distintas, su valor al igual que las otras variables se dan por distintos factores como la cercanía al mar, el grado de impacto de las mareas, las fuentes de agua dulce (escurrimientos, influencia de ríos, precipitación) y la microtopografía local, que condiciona el flujo o estancamiento y salinización de un área; teniendo en cuenta esto es

congruente los niveles de salinidad que se reflejan en la figura 28, en donde la franja interior es la región con mayores niveles de salinidad; en esta región los manglares son del tipo matorral con dominancia de *Avicennia germinans*, debido a la salinidad de entre 45 y 60 ups presentes, aunado a la carencia de flujos de agua dulce. Por otra parte la zona con mayor estructura forestal y con condiciones de salinidad óptimas para el correcto desarrollo de la especie, es la franja de la orilla y franjas de la orilla, además el hidroperiodo en dichas zonas se da de forma óptima para beneficio del mangle rojo. En la figura 28 se pueden observar las diferencias en salinidad entre cada franja para el periodo de muestreo 2009-2016.

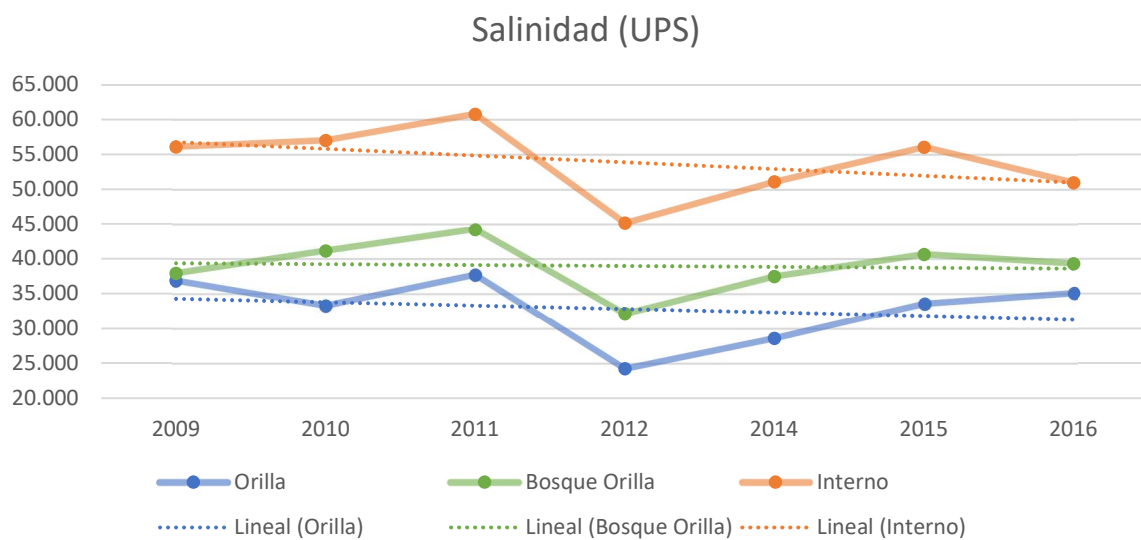


Fig. 28 Comportamiento de la salinidad en el periodo 2009-2016 en Peten Neyac. Elaboración propia con datos de Agraz Hernández

5.4 Resultados de los modelos estimados

5.4.1 Sensibilidad a los parámetros fisicoquímicos de *R. mangle* en la RBLP

- Significación estadística

Se considero un valor de $\alpha < 0.05$ en la regresión, si el valor calculado se encuentra dentro de ese rango, la precipitación y temperatura influirán sobre el parámetro fisicoquímico analizado. Aquello fuera del rango resultaron como un “No Significante”. En Peten Neyac el único valor obtenido como “No Significante” fue la relación entre la temperatura del agua intersticial y la precipitación con un $\alpha = 0.1664$ mientras que en Peten Rio verde, resultaron no significativo la

relación entre el Potencial redox y precipitación ($\alpha = 0.1498$) y temperatura intersticial con precipitación ($\alpha = 0.1664$), el resto de los resultados son significativos como se puede observar en la tabla 17.

Tabla 17. Significación estadística de los variables climáticas con respecto a los valores fisicoquímicos en cada sitio de muestreo.

Peten Neyac				
Variable	pH	Redox	T° Intersticial	Salinidad
Temperatura	S (0.0000)	S (0.0000)	S (0.0000)	S (0.0000)
Precipitación	S (0.0013)	S (0.0000)	NS (0.1664)	S (0.0000)
Peten Rio Verde				
Temperatura	S (0.0000)	S (0.0000)	S (0.0000)	S (0.0000)
Precipitación	S (0.0000)	NS (0.1498)	NS (0.5444)	S (0.0066)

En donde: S = Significativa, NS = No significativa y los valores dentro del paréntesis es el valor α

- Coeficientes de sensibilidad obtenidos por el modelo logit

Los valores de elasticidad obtenidos mediante el modelo implican el grado de sensibilidad que tiene el parámetro fisicoquímico ante un cambio porcentual de la variable climática, el resultado obtenido tiene una relación proporcional, es decir que por cada aumento o decremento en el 1% de la variable climática la sensibilidad se dará en la misma magnitud. Es importante mencionar, que solo la variable potencial redox fue transformada para que se le pudiera ser calculado el modelo, y la interpretación se da de manera inversa, es decir el aumento o decremento en 1% involucra el cambio en la misma magnitud, pero en sentido contrario. Los valores β para cada variable fisicoquímica en Peten Neyac y Rio Verde se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. *Coefficientes de sensibilidad (β) de las variables fisicoquímicas ante la precipitación y temperatura en ambos sitios de muestreo.*

Peten Neyac		
Parámetro	$\beta_{T^{\circ}}$	β_{Precip}
Redox	-1.815	-0.096
PH	0.627	0.027
Salinidad	1.25	0.091
T° intersticial	0.995	NS
Peten Rio Verde		
Redox	-1.460	NS
PH	0.609	0.023
Salinidad	1.230	0.052
T° intersticial	0.995	NS

- Pruebas de validación del modelo

Los modelos fueron validados para determinar su robustez, para lo cual se evaluaron la heterocedasticidad y autocorrelación a fin detectar sesgos en la información. Para la heterocedasticidad se empleó la prueba Breusch-Pagan-Godfrey, cuya Hipótesis nula (H_0) es que existe homocedasticidad. Por consiguiente, dado que $\alpha > 0.05$ todos los valores dentro de ese rango se consideran con homocedasticidad, pero cualquier valor menor a 0.05 es indicador de un problema de heterocedasticidad. Por otra parte, la autocorrelación fue evaluada con la prueba de Breusch-Godfrey Serial Correlation, cuya Hipótesis nula (H_0) es ausencia de autocorrelación. Por consiguiente, aquellos valores de $\alpha < 0.05$ harían efectiva la hipótesis nula, lo cual significa que no hay problema de autocorrelación, en caso de salir de este rango, se rechaza la hipótesis nula y habría un problema de autocorrelación. La tabla 19 muestra todos los resultados de las pruebas de validación aplicadas en el modelo. El pH en Peten Neyac y la salinidad en Peten Rio Verde fueron las únicas variables con problema de homocedasticidad, sin embargo se determinó que no es significativa, ya que los valores de los parámetros con dicho problema son muy parecidos entre si y que no ameritan su corrección. Para consultar a detalle los resultados de cada una de las pruebas ver el Anexo I

Tabla 19. Pruebas de validación del modelo logit y su correspondiente valor α .

Peten Neyac		
Parámetro	Autocorrelación	Heterocedasticidad
PH	NO (0.0005)	SI (0.6816)
Redox	NO (0.0000)	NO (0.0172)
T° intersticial	NO (0.0000)	NO (0.0000)
Salinidad	NO (0.0000)	NO (0.0156)
Peten Rio Verde		
PH	NO (0.0000)	NO (0.0000)
Redox	NO (0.0000)	NO (0.0389)
T° intersticial	NO (0.0000)	NO (0.0000)
Salinidad	NO (0.0000)	SI (0.5691)

5.4.2 Sensibilidad de los parámetros fisicoquímicos bajo los escenarios climáticos

Los valores β_i de sensibilidad tanto de temperatura como precipitación fueron sumados para obtener un efecto combinado de las variables climáticos. Finalmente se obtuvieron los siguientes valores β totales para cada horizonte de tiempo y para cada escenario seleccionado. En esta zona los escenarios climáticos que tendrán mayor impacto sobre las variables climáticas serán: Para el horizonte 2015-2039, el escenario GFDL-CM3 RCP8.5 muestra un aumento de hasta 1.41°C y la precipitación bajo el escenario HADGEM-ES indica una disminución de la lluvia de hasta -4.95%. Por su parte para el horizonte de tiempo 2045-2069, los escenarios son los mismos que el horizonte anterior y los valores son de un aumento de 2.94°C y una reducción de precipitación de -9.63% . Por último, para el horizonte lejano (2075-2099), el escenario HADGEM-ES RCP 8.5, exhibe el mayor incremento en la temperatura con 4.67°C, en cuanto a la precipitación con una reducción del -16.11% perteneciente al escenario MPI-ESM-LR siendo el que tiene el mayor impacto sobre la zona. El potencial redox es en promedio el parámetro fisicoquímico que muestra mayor sensibilidad para los 3 horizontes de tiempo y por el contrario el pH cuenta con los valores más bajos de sensibilidad para los mismos horizontes (Ver tabla 20).

- β totales para Peten Neyac

Tablas 20. Comportamiento de las variables fisicoquímicas bajo el efecto combinado de distintos escenarios climático, en 3 horizontes de tiempo en Peten Neyac.

2015-2039							
Escenario	RCP	Δ _Temp	Δ _Precip	β REDOX	β pH	β Salinidad	β T° Agua Intersticial
CNRMCM5	4.5	0.691	1.671	-1.010	0.460	0.938	0.688
GFDL-CM3	8.5	1.412	3.349	-2.063	0.938	1.913	1.405
HADGEM-ES	4.5	1.266	-4.958	-1.850	0.655	1.300	1.2603
HADGEM-ES	8.5	1.384	-0.817	-2.021	0.824	1.661	1.377
MPI-ESM-LR	8.5	1.087	-3.725	-1.588	0.575	1.144	1.082
PROMEDIO		1.287	-0.896	-1.706	0.691	1.391	1.162
2045-2069							
CNRMCM5	4.5	1.420	-3.861	-2.953	0.783	1.424	1.414
GFDL-CM3	8.5	2.946	8.100	-4.564	2.073	4.429	2.932
HADGEM-ES	4.5	2.099	-5.854	-4.378	1.153	2.090	2.089
HADGEM-ES	8.5	2.926	-4.962	-5.793	1.696	3.207	2.912
MPI-ESM-LR	8.5	2.330	-9.635	-5.165	1.193	2.034	2.319
PROMEDIO		2.344	-3.242	-4.570	1.379	2.637	2.333
2075-2099							
CNRMCM5	4.5	1.630	3.015	-2.666	1.106	2.315	1.622
GFDL-CM3	8.5	4.535	8.441	-7.416	3.079	6.449	4.514
HADGEM-ES	4.5	2.745	-6.960	-5.659	1.527	2.798	2.732
HADGEM-ES	8.5	4.670	-7.695	-9.227	2.713	5.138	4.647
MPI-ESM-LR	8.5	3.634	-16.111	-8.158	1.830	3.071	3.616
PROMEDIO		3.442	-3.862	-6.624	2.051	3.954	3.426

- β totales para Peten Rio Verde

En este sitio de muestreo los escenarios de cambio climático que tendrían un mayor impacto son: Para el caso de la temperatura en el horizonte 2015-2039 se obtuvo con un aumento de 1.45°C en el escenario HADGEM-ES con un RCP 8.5, mientras que para la precipitación en el mismo horizonte, su mayor déficit de lluvias se encuentra en el escenario HADGEM-ES RCP 4.5 con hasta 5.514% de reducción en la precipitación. En el horizonte 2045-2069, el escenario HADGEM-ES RCP.8.5 es el que tiene un mayor incremento en temperatura (3.065°C), por su parte la precipitación, con un déficit de -6.605, siendo el valor más bajo y el cual pertenece al escenario HADGEM-ES 4.5. En el futuro lejano (2075-2099) el aumento de temperatura más pronunciado

se espera bajo el escenario HADGEM-ES RCP8.5, mientras que para la precipitación, el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 presenta un déficit de -14.195% de lluvia. En cuanto al valor de los coeficientes de sensibilidad (β), al igual que en Peten Neyac el potencial redox resulto ser en promedio la variable fisicoquímica más sensible y el pH la menos sensible en los 3 horizontes de tiempo. El análisis por horizontes arrojó que los valores máximos de los coeficientes β se reparten entre los escenarios GFDL-CM3 RCP 8.5 (potencial redox, T° del agua intersticial) y HADGEM-ES RCP 8.5 (pH y salinidad) (ver tabla 21).

Tabla 21. Comportamiento de las variables fisicoquímicas bajo el efecto combinado de distintos escenarios climáticos, en 3 horizontes de tiempo en Peten Rio Verde.

2015-2039							
Escenario	RCP	Δ _Temp	Δ _Precip	β REDOX	β pH	β Salinidad	β T° Agua Intersticial
CNRMCM5	4.5	0.705	1.839	-1.029	0.472	0.963	0.701
GFDL-CM3	8.5	1.410	3.679	-2.060	0.945	1.928	1.403
HADGEM-ES	4.5	1.350	-5.514	-1.972	0.694	1.374	1.344
HADGEM-ES	8.5	1.450	-1.100	-2.117	0.857	1.727	1.442
MPI-ESM-LR	8.5	1.130	-3.092	-1.651	0.616	1.230	1.125
PROMEDIO		1.158	-0.837	-1.766	0.717	1.445	1.203
2045-2069							
CNRMCM5	4.5	1.462	-4.439	-2.136	0.787	1.568	1.455
GFDL-CM3	8.5	2.955	7.859	-4.315	1.984	4.047	2.940
HADGEM-ES	4.5	2.204	-6.605	-3.219	1.188	2.368	2.193
HADGEM-ES	8.5	3.065	-5.790	-4.477	1.732	3.471	3.050
MPI-ESM-LR	8.5	2.468	-5.032	-3.605	1.386	2.775	2.456
PROMEDIO				-3.550	1.415	2.846	2.419
2075-2099							
CNRMCM5	4.5	1.648	2.599	-2.407	1.065	2.164	1.640
GFDL-CM3	8.5	4.559	7.973	-6.658	2.964	6.028	4.536
HADGEM-ES	4.5	2.873	-7.865	-4.196	1.567	3.125	2.858
HADGEM-ES	8.5	4.872	-8.943	-7.116	2.760	5.530	4.848
MPI-ESM-LR	8.5	3.774	-14.195	-5.512	1.968	3.904	3.755
PROMEDIO				-5.178	2.064	4.150	3.527

Ya con los coeficientes de sensibilidad calculados, se hizo la relación con respecto a la variación de precipitación y temperatura de cada escenario, posteriormente y debido a que los estos parámetro actúan de manera combinada, cada coeficiente obtenido fue sumado para obtener un coeficiente único de sensibilidad. Con esta información y para el análisis de las variables

fisicoquímicas se consideró que el cambio del 1% de la variable climática, implica una variación de la misma magnitud en la variable fisicoquímica, teniendo en cuenta que, para establecer si se trata de aumento o disminución, se consideró la respuesta natural del ambiente ante estos cambios, por lo tanto se concluyó que el 1% del coeficiente de sensibilidad implica la reducción del 1% en las variables pH y potencial redox(acidificación y reducción), mientras que para la salinidad, el cambio en 1% resulta en el aumento del 1% (salinización). El resultado de tal relación se visualiza en las tablas 22 a 27.

Tabla 22. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2015-2039 en Peten Neyac.

VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM
PH	Sup Orilla.	7.909	7.873	7.835	7.857	7.844	7.864	7.850
	Inters Orilla	6.880	6.843	6.805	6.828	6.814	6.834	6.820
	Bosque_1	6.867	6.831	6.793	6.816	6.802	6.822	6.808
	Bosque_2	6.742	6.705	6.667	6.690	6.676	6.696	6.682
	Bosque_3	6.894	6.858	6.820	6.842	6.829	6.849	6.835
	Bosque_4	6.828	6.792	6.754	6.777	6.763	6.783	6.769
	Inter_1	6.928	6.892	6.854	6.876	6.863	6.883	6.869
	Inter_2	7.010	6.973	6.935	6.958	6.944	6.964	6.950
	Inter_3	6.883	6.847	6.809	6.831	6.818	6.838	6.824
	Inter_4	6.785	6.749	6.711	6.734	6.720	6.740	6.726
SALINIDAD	Sup Orilla.	33.672	33.988	34.316	34.110	34.231	34.057	33.731
	Inters Orilla	33.277	33.593	33.921	33.715	33.836	33.662	33.336
	Bosque_1	33.338	33.655	33.983	33.776	33.898	33.724	33.398
	Bosque_2	39.697	40.013	40.341	40.135	40.256	40.082	39.756
	Bosque_3	44.231	44.547	44.875	44.669	44.790	44.616	44.290
	Bosque_4	41.185	41.501	41.829	41.622	41.744	41.570	41.244
	Inter_1	63.136	63.452	63.781	63.574	63.696	63.522	63.196
	Inter_2	45.500	45.816	46.144	45.938	46.059	45.885	45.559
	Inter_3	59.446	59.763	60.091	59.884	60.006	59.832	59.506
	Inter_4	51.877	52.193	52.521	52.315	52.436	52.262	51.936
REDOX	Sup Orilla.	-72.697	-73.431	-74.197	-74.042	-74.166	-73.851	-71.852
	Inters Orilla	-288.362	-289.096	-289.861	-289.706	-289.831	-289.516	-287.516
	Bosque_1	-241.303	-242.037	-242.803	-242.648	-242.773	-242.458	-240.458
	Bosque_2	-214.686	-215.421	-216.186	-216.031	-216.156	-215.841	-213.841
	Bosque_3	-258.058	-258.792	-259.558	-259.403	-259.527	-259.212	-257.213
	Bosque_4	-260.985	-261.719	-262.484	-262.330	-262.454	-262.139	-260.139
	Inter_1	-371.208	-371.942	-372.707	-372.553	-372.677	-372.362	-370.363
	Inter_2	-289.165	-289.900	-290.665	-290.510	-290.635	-290.320	-288.320
	Inter_3	-337.593	-338.327	-339.093	-338.938	-339.063	-338.748	-336.748
	Inter_4	-340.684	-341.419	-342.184	-342.029	-342.154	-341.839	-339.839

Tabla 23. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2045-2069 en Peten Neyac.

VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM	
PH	Sup Orilla..	7.909	7.847	7.745	7.818	7.775	7.815	7.800	
	Inters Orilla	6.880	6.818	6.716	6.788	6.745	6.785	6.770	
	Bosque_1	6.867	6.805	6.703	6.776	6.733	6.773	6.758	
	Bosque_2	6.742	6.680	6.578	6.650	6.607	6.647	6.633	
	Bosque_3	6.894	6.832	6.730	6.803	6.760	6.800	6.785	
	Bosque_4	6.828	6.767	6.664	6.737	6.694	6.734	6.719	
	Inter_1	6.928	6.866	6.764	6.837	6.794	6.834	6.819	
	Inter_2	7.010	6.948	6.846	6.918	6.875	6.915	6.901	
	Inter_3	6.883	6.821	6.719	6.792	6.749	6.789	6.774	
	Inter_4	6.785	6.723	6.621	6.694	6.651	6.691	6.676	
	SALINIDAD	Sup Orilla..	33.672	34.152	35.164	34.376	34.752	34.357	33.781
		Inters Orilla	33.277	33.756	34.768	33.981	34.357	33.962	33.386
Bosque_1		33.338	33.818	34.830	34.042	34.419	34.023	33.448	
Bosque_2		39.697	40.177	41.188	40.401	40.777	40.382	39.806	
Bosque_3		44.231	44.710	45.722	44.935	45.311	44.916	44.340	
Bosque_4		41.185	41.664	42.676	41.889	42.265	41.870	41.294	
Inter_1		63.136	63.616	64.628	63.840	64.216	63.821	63.246	
Inter_2		45.500	45.980	46.992	46.204	46.580	46.185	45.609	
Inter_3		59.446	59.926	60.938	60.150	60.527	60.131	59.556	
Inter_4		51.877	52.356	53.368	52.581	52.957	52.562	51.986	
REDOX		Sup Orilla..	-72.697	-74.844	-76.015	-75.879	-76.909	-76.452	-76.020
		Inters Orilla	-288.362	-290.509	-291.680	-291.544	-292.573	-292.116	-291.684
	Bosque_1	-241.303	-243.450	-244.621	-244.486	-245.515	-245.058	-244.626	
	Bosque_2	-214.686	-216.833	-218.005	-217.869	-218.898	-218.441	-218.009	
	Bosque_3	-258.058	-260.205	-261.376	-261.240	-262.270	-261.813	-261.381	
	Bosque_4	-260.985	-263.132	-264.303	-264.167	-265.197	-264.739	-264.308	
	Inter_1	-371.208	-373.355	-374.526	-374.390	-375.420	-374.963	-374.531	
	Inter_2	-289.165	-291.312	-292.483	-292.348	-293.377	-292.920	-292.488	
	Inter_3	-337.593	-339.740	-340.911	-340.776	-341.805	-341.348	-340.916	
	Inter_4	-340.684	-342.831	-344.003	-343.867	-344.896	-344.439	-344.007	

Tabla 24. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2075-2099 en Peten Noyac.

VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM
PH	Sup Orilla..	7.909	7.822	7.666	7.788	7.695	7.764	7.747
	Inters Orilla	6.880	6.792	6.636	6.759	6.665	6.735	6.717
	Bosque_1	6.870	6.783	6.627	6.750	6.656	6.726	6.708
	Bosque_2	6.742	6.654	6.498	6.621	6.527	6.597	6.579
	Bosque_3	6.894	6.807	6.651	6.773	6.680	6.750	6.732
	Bosque_4	6.828	6.741	6.585	6.708	6.614	6.684	6.666
	Inter_1	6.928	6.841	6.684	6.807	6.713	6.783	6.766
	Inter_2	7.010	6.922	6.766	6.889	6.795	6.865	6.847
	Inter_3	6.883	6.796	6.639	6.762	6.668	6.738	6.721
	Inter_4	6.785	6.698	6.542	6.665	6.571	6.641	6.623
SALINIDAD	Sup Orilla..	31.705	32.439	33.750	32.592	33.334	32.679	31.867
	Inters Orilla	35.745	36.480	37.790	36.633	37.375	36.719	35.908
	Bosque_1	35.953	36.687	37.998	36.840	37.582	36.927	36.115
	Bosque_2	40.576	41.310	42.621	41.463	42.205	41.550	40.738
	Bosque_3	49.500	50.234	51.545	50.387	51.129	50.474	49.662
	Bosque_4	40.672	41.406	42.717	41.559	42.301	41.646	40.834
	Inter_1	69.167	69.901	71.211	70.054	70.796	70.141	69.329
	Inter_2	76.530	77.265	78.575	77.418	78.160	77.504	76.693
	Inter_3	73.758	74.492	75.802	74.645	75.387	74.731	73.920
	Inter_4	71.379	72.113	73.424	72.266	73.008	72.353	71.541
REDOX	Sup Orilla	-72.697	-74.636	-78.088	-76.811	-79.402	-78.628	-77.513
	Inters Orilla	-288.362	-290.300	-293.753	-292.476	-295.067	-294.293	-293.178
	Bosque_1	-241.303	-243.242	-246.694	-245.417	-248.008	-247.234	-246.119
	Bosque_2	-214.686	-216.625	-220.078	-218.800	-221.392	-220.617	-219.502
	Bosque_3	-258.058	-259.997	-263.449	-262.172	-264.763	-263.989	-262.874
	Bosque_4	-260.985	-262.923	-266.376	-265.099	-267.690	-266.916	-265.801
	Inter_1	-371.208	-373.146	-376.599	-375.322	-377.913	-377.139	-376.024
	Inter_2	-289.165	-291.104	-294.557	-293.279	-295.870	-295.096	-293.981
	Inter_3	-337.593	-339.532	-342.984	-341.707	-344.298	-343.524	-342.409
	Inter_4	-340.684	-342.623	-346.076	-344.798	-347.390	-346.615	-345.500

Tabla 25. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2015-2039 en Peten Rio Verde.

VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM
PH	Sup Orilla..	7.960	7.923	7.885	7.905	7.892	7.911	7.903
	Inters Orilla	6.845	6.807	6.770	6.790	6.777	6.796	6.788
	Bosque_1	6.735	6.697	6.660	6.680	6.667	6.686	6.678
	Bosque_2	6.613	6.575	6.537	6.557	6.544	6.563	6.555
	Bosque_3	6.536	6.498	6.461	6.481	6.468	6.487	6.479
	Bosque_4	6.819	6.781	6.743	6.763	6.750	6.770	6.762
	Inter_1	6.788	6.751	6.713	6.733	6.720	6.739	6.731
	Inter_2	6.862	6.825	6.787	6.807	6.794	6.813	6.805
	Inter_3	6.872	6.835	6.797	6.817	6.804	6.823	6.815
	Inter_4	6.801	6.763	6.726	6.746	6.733	6.752	6.744
SALINIDAD	Sup Orilla..	31.705	32.011	32.316	32.141	32.253	32.095	32.163
	Inters Orilla	35.745	36.051	36.357	36.181	36.293	36.136	36.204
	Bosque_1	35.953	36.259	36.565	36.389	36.501	36.343	36.411
	Bosque_2	40.576	40.881	41.187	41.012	41.123	40.966	41.034
	Bosque_3	49.500	49.806	50.112	49.936	50.048	49.890	49.958
	Bosque_4	40.672	40.977	41.283	41.108	41.220	41.062	41.130
	Inter_1	69.167	69.472	69.778	69.603	69.714	69.557	69.625
	Inter_2	76.530	76.836	77.142	76.966	77.078	76.920	76.988
	Inter_3	73.758	74.063	74.369	74.193	74.305	74.148	74.216
	Inter_4	71.379	71.684	71.990	71.815	71.926	71.769	71.837
REDOX	Sup Orilla	-78.702	-79.512	-80.323	-80.254	-80.368	-80.001	-80.092
	Inters Orilla	-242.533	-243.343	-244.154	-244.085	-244.199	-243.833	-243.923
	Bosque_1	-254.186	-254.996	-255.808	-255.739	-255.853	-255.486	-255.576
	Bosque_2	-247.031	-247.841	-248.652	-248.584	-248.697	-248.331	-248.421
	Bosque_3	-264.852	-265.662	-266.473	-266.404	-266.518	-266.151	-266.242
	Bosque_4	-234.572	-235.382	-236.194	-236.125	-236.239	-235.872	-235.962
	Inter_1	-307.233	-308.044	-308.855	-308.786	-308.900	-308.533	-308.624
	Inter_2	-301.547	-302.357	-303.169	-303.100	-303.214	-302.847	-302.937
	Inter_3	-311.203	-312.013	-312.825	-312.756	-312.870	-312.503	-312.593
	Inter_4	-322.641	-323.451	-324.262	-324.193	-324.307	-323.940	-324.031

Tabla 26. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2045-2069 en Peten Rio Verde.

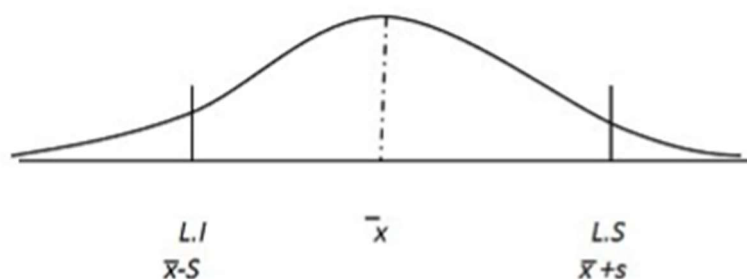
VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM
PH	Sup Orilla..	7.960	7.898	7.802	7.866	7.822	7.850	7.848
	Inters Orilla	6.845	6.782	6.687	6.750	6.707	6.735	6.732
	Bosque_1	6.735	6.672	6.577	6.640	6.597	6.625	6.622
	Bosque_2	6.613	6.550	6.455	6.518	6.475	6.502	6.500
	Bosque_3	6.536	6.473	6.378	6.441	6.398	6.426	6.423
	Bosque_4	6.819	6.756	6.661	6.724	6.681	6.708	6.706
	Inter_1	6.788	6.726	6.631	6.694	6.651	6.678	6.676
	Inter_2	6.862	6.800	6.704	6.768	6.724	6.752	6.750
	Inter_3	6.872	6.810	6.714	6.778	6.734	6.762	6.760
	Inter_4	6.801	6.738	6.643	6.706	6.663	6.691	6.688
SALINIDAD	Sup Orilla..	31.705	32.202	32.988	32.456	32.805	32.585	32.607
	Inters Orilla	35.745	36.243	37.029	36.496	36.846	36.625	36.648
	Bosque_1	35.953	36.450	37.237	36.704	37.054	36.833	36.855
	Bosque_2	40.576	41.073	41.859	41.327	41.676	41.456	41.478
	Bosque_3	49.500	49.997	50.783	50.251	50.601	50.380	50.402
	Bosque_4	40.672	41.169	41.955	41.423	41.772	41.552	41.574
	Inter_1	69.167	69.664	70.450	69.917	70.267	70.047	70.069
	Inter_2	76.530	77.028	77.814	77.281	77.631	77.410	77.433
	Inter_3	73.758	74.255	75.041	74.508	74.858	74.638	74.660
	Inter_4	71.379	71.876	72.662	72.130	72.479	72.259	72.281
REDOX	Sup Orilla	-78.702	-80.383	-82.098	-81.235	-82.226	-81.539	-81.496
	Inters Orilla	-242.533	-244.214	-245.929	-245.066	-246.057	-245.370	-245.327
	Bosque_1	-254.186	-255.867	-257.583	-256.720	-257.710	-257.023	-256.980
	Bosque_2	-247.031	-248.712	-250.427	-249.564	-250.555	-249.868	-249.825
	Bosque_3	-264.852	-266.533	-268.248	-267.385	-268.376	-267.689	-267.646
	Bosque_4	-234.572	-236.253	-237.969	-237.105	-238.096	-237.409	-237.366
	Inter_1	-307.233	-308.914	-310.630	-309.767	-310.757	-310.071	-310.028
	Inter_2	-301.547	-303.228	-304.944	-304.081	-305.071	-304.384	-304.342
	Inter_3	-311.203	-312.884	-314.600	-313.737	-314.727	-314.040	-313.998
	Inter_4	-322.641	-324.322	-326.037	-325.174	-326.165	-325.478	-325.435

Tabla 27. Valores esperados totales por cada escenario con respecto al valor base para el horizonte de tiempo 2075-2099 en Peten Rio Verde.

VAR	FRANJA	BASE (09-16)	CNRMCM5	GFDL-CM3	HADGEM-ES 4.5	HADGEM-ES 8.5	MPI-ESM-LR	PROM
PH	Sup Orilla..	7.960	7.876	7.724	7.836	7.741	7.804	7.796
	Inters Orilla	6.845	6.760	6.609	6.720	6.625	6.688	6.681
	Bosque_1	6.735	6.650	6.499	6.610	6.515	6.578	6.571
	Bosque_2	6.613	6.528	6.377	6.488	6.393	6.456	6.448
	Bosque_3	6.536	6.451	6.300	6.411	6.316	6.379	6.372
	Bosque_4	6.819	6.734	6.583	6.694	6.599	6.662	6.654
	Inter_1	6.788	6.704	6.553	6.664	6.569	6.632	6.624
	Inter_2	6.862	6.778	6.626	6.738	6.643	6.706	6.698
	Inter_3	6.872	6.788	6.636	6.748	6.653	6.716	6.708
	Inter_4	6.801	6.716	6.565	6.676	6.581	6.644	6.637
SALINIDAD	Sup Orilla..	31.705	32.391	33.616	32.696	33.458	32.943	33.021
	Inters Orilla	35.745	36.432	37.657	36.737	37.499	36.983	37.061
	Bosque_1	35.953	36.639	37.864	36.944	37.707	37.191	37.269
	Bosque_2	40.576	41.262	42.487	41.567	42.329	41.814	41.892
	Bosque_3	49.500	50.186	51.411	50.491	51.253	50.738	50.816
	Bosque_4	40.672	41.358	42.583	41.663	42.425	41.910	41.988
	Inter_1	69.167	69.853	71.078	70.158	70.920	70.404	70.483
	Inter_2	76.530	77.217	78.442	77.521	78.284	77.768	77.846
	Inter_3	73.758	74.444	75.669	74.749	75.511	74.995	75.074
	Inter_4	71.379	72.065	73.290	72.370	73.132	72.617	72.695
REDOX	Sup Orilla	-78.702	-80.596	-83.942	-82.004	-84.302	-83.040	-82.777
	Inters Orilla	-242.533	-244.427	-247.773	-245.836	-248.133	-246.871	-246.608
	Bosque_1	-254.186	-256.081	-259.427	-257.489	-259.787	-258.524	-258.261
	Bosque_2	-247.031	-248.925	-252.271	-250.334	-252.632	-251.369	-251.106
	Bosque_3	-264.852	-266.746	-270.092	-268.154	-270.452	-269.190	-268.927
	Bosque_4	-234.572	-236.467	-239.812	-237.875	-240.173	-238.910	-238.647
	Inter_1	-307.233	-309.128	-312.474	-310.536	-312.834	-311.572	-311.309
	Inter_2	-301.547	-303.442	-306.788	-304.850	-307.148	-305.885	-305.622
	Inter_3	-311.203	-313.098	-316.444	-314.506	-316.804	-315.541	-315.278
	Inter_4	-322.641	-324.535	-327.881	-325.943	-328.241	-326.979	-326.716

5.5 Escenarios de vulnerabilidad de *Rhizophora mangle* con respecto a sus límites de tolerancia en Peten Rio Verde

El calculo de los limites de tolerancia es parte fundamental de esta investigación ya que nos permite poner en perspectiva el estado que guardan las variables fisicoquimicas del suelo de *Rhizophora mangle* en el área de estudio y cual será el estado que guarde bajo los distintos escenarios de cambio climático. Los limites inferiores, superiores y el promedio (L.I, L.S y \bar{x}) de las variables (Fisicoquímicas y biológicas) para el área de estudio esta definido de acuerdo a las características in situ, adquiriendo una distribución normal. Los limites obtenidos se pueden visualizar en la tabla 26.



Donde: \bar{x} = promedio de la variable a medir

S = Desviación estándar de la variable medida

Fig. 29 Grafica de distribución normal y el calculo de los limites inferior y superior

Tabla 28. Limites mínimos y máximos de los parámetros fisicoquímicos en Peten Rio Verde

FRANJA ORILLA Y BOSQUES DE LA ORILLA		
Parametro	Limite mínimo	Limite máximo
Salinidad	41	45
Potencial Redox	-238	-279
pH	6.48	6.76
FRANJA BOSQUE INTERNO		
Salinidad	71	79
Potencial Redox	-280	-310
pH	6.64	6.84

5.5.1 PH

El pH entre cada franja es distinto, la franja 1 posee valores que van de neutros a ligeramente ácidos, el resultado de la aplicación del modelo con respecto a los escenarios climáticos nos indican que solo 3 escenarios: GFDL-CM3 para el futuro medio y lejano y el HADGEM-ES 8.5 para el futuro lejano, fueron los únicos que se posicionaron dentro de los límites de tolerancia de la especie en esta región, sin embargo, estos valores no están muy alejados de estos límites (ver Fig. 30). Por su parte la franja 2, tiene a la mayoría de los escenarios dentro de su rango de tolerancia, a excepción de los escenarios GFDL-CM3 y HADGEM-ES 8.5, ambos en el futuro lejano (Ver Fig. 31). En ambas franjas la tendencia de los escenarios es a la reducción de pH, a consecuencia de un potencial proceso de acidificación.

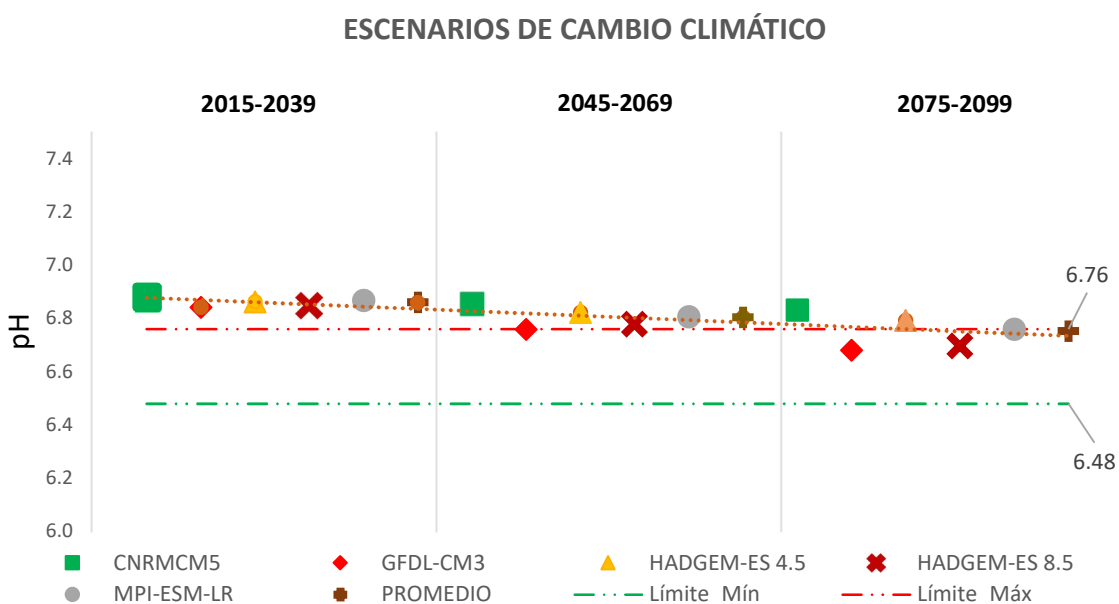


Fig. 30 Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Rio Verde.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

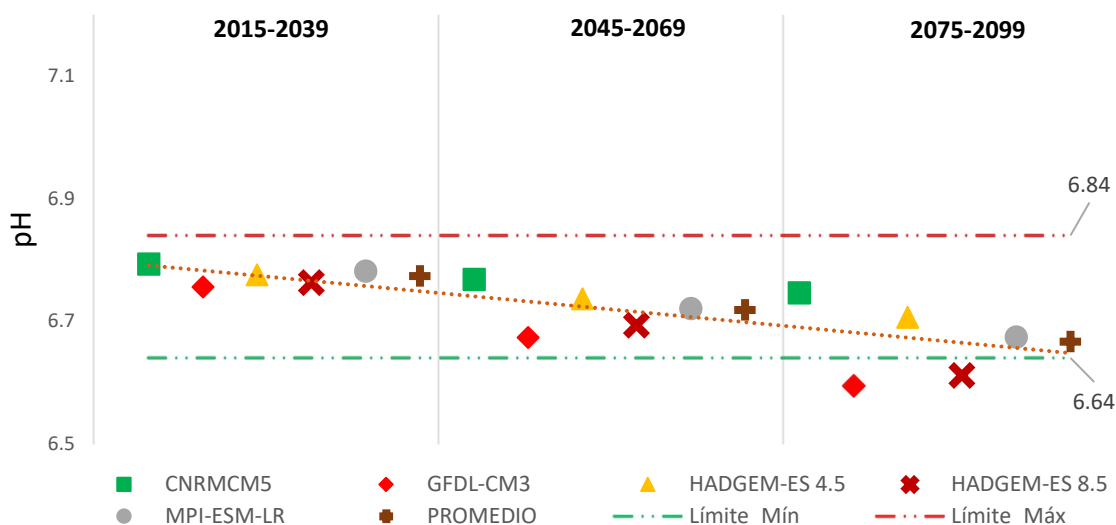


Fig. 31 Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Rio Verde.

5.5.2 Salinidad

En este sitio de muestreo, los escenarios mostraron diferencias marcadas entre cada una de las franjas. En la franja 1 (Fig. 32) los valores arrojados por los distintos escenarios de cambio climático y horizonte de tiempo oscilan a nivel mesohalino de acuerdo a la clasificación de la tabla 15, los cuales a su vez se encuentran por debajo de sus límites de tolerancia mínimos; se identificó al escenario GFDL-CM3 en el 2075-2099 como el valor que más se acerca a estos límites. Por su parte la franja 2 (Fig. 33), los valores de los escenarios muestran que se encuentran dentro de su límite de tolerancia, pero a diferencia de la franja anterior las condiciones de salinidad son más severas, haciendo de este un lugar hipersalino, más sin embargo es posible encontrar algunos individuos de la especie cercanos a la frontera con la franja 1, ya que el resto de la franja es ampliamente dominada por matorrales de *Avicennia germinans*, especie que es altamente tolerante a condiciones de hipersalinidad imperantes en la franja 2. La tendencia nos dice que las condiciones de salinidad aumentaran conforme aumente el tiempo en ambas franjas.

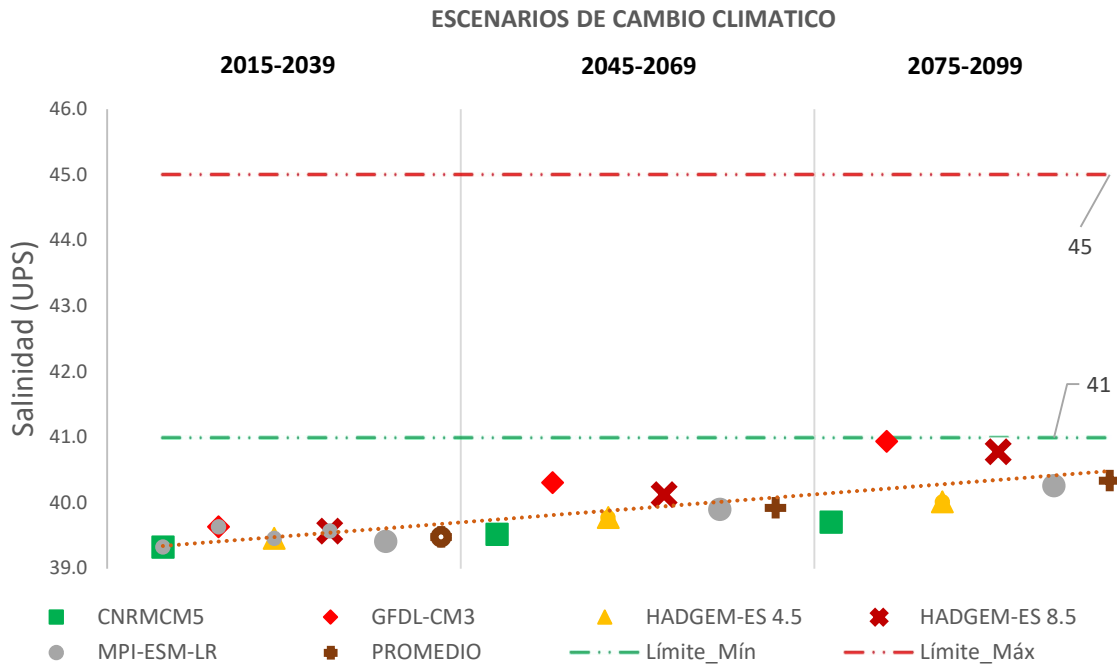


Fig. 32 Escenarios climáticos de la *salinidad* y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Rio Verde.

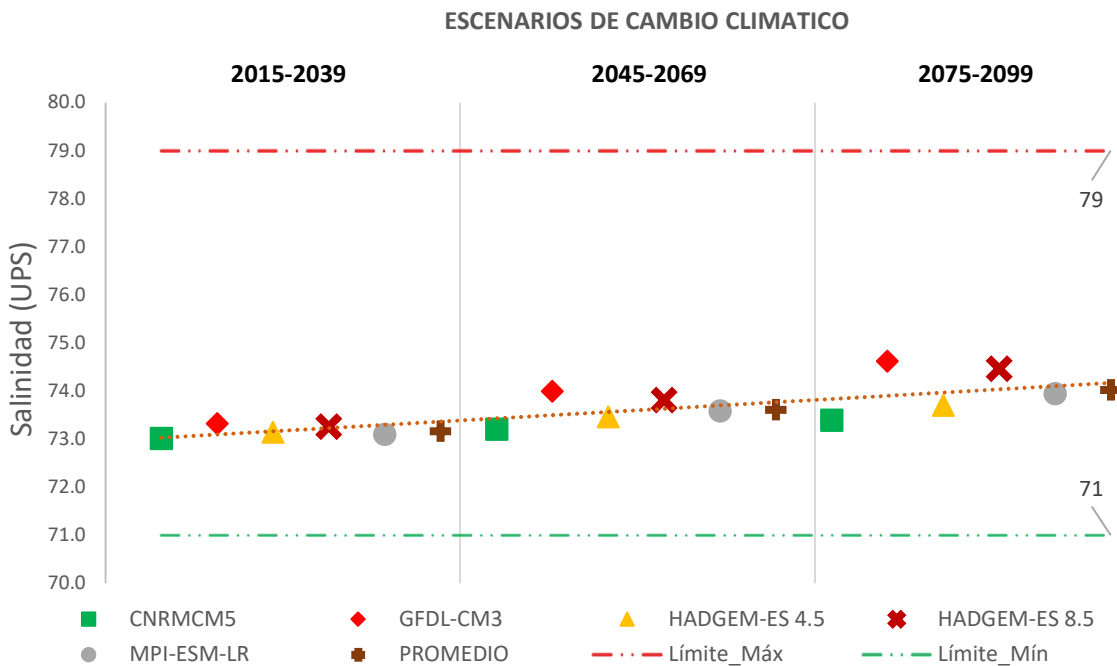


Fig. 33 Escenarios climáticos de la *salinidad* y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Rio Verde.

5.5.3 Potencial redox

Los escenarios de cambio climático para ambas franjas se situaron fuera de los límites de tolerancia propios de la especie en el área de estudio, la diferencia reside en el sentido de dicha variación con respecto a estos; la franja 1 (Fig. 34) ubica a la totalidad de los resultados en el intervalo correspondiente a un ambiente óxico - hipóxico y por encima del límite máximo, con variaciones muy ligeras entre cada uno de los horizontes de tiempo; por otro lado la franja 2 (Fig. 35), lo hace en sentido contrario y sus valores se posicionan en un ambiente hipóxico y por debajo del límite inferior de tolerancia al potencial redox; para ambos franjas hay una tendencia hacia un ambiente de mayor reducción con respecto al periodo base y se acentuara conforme el paso de los años.

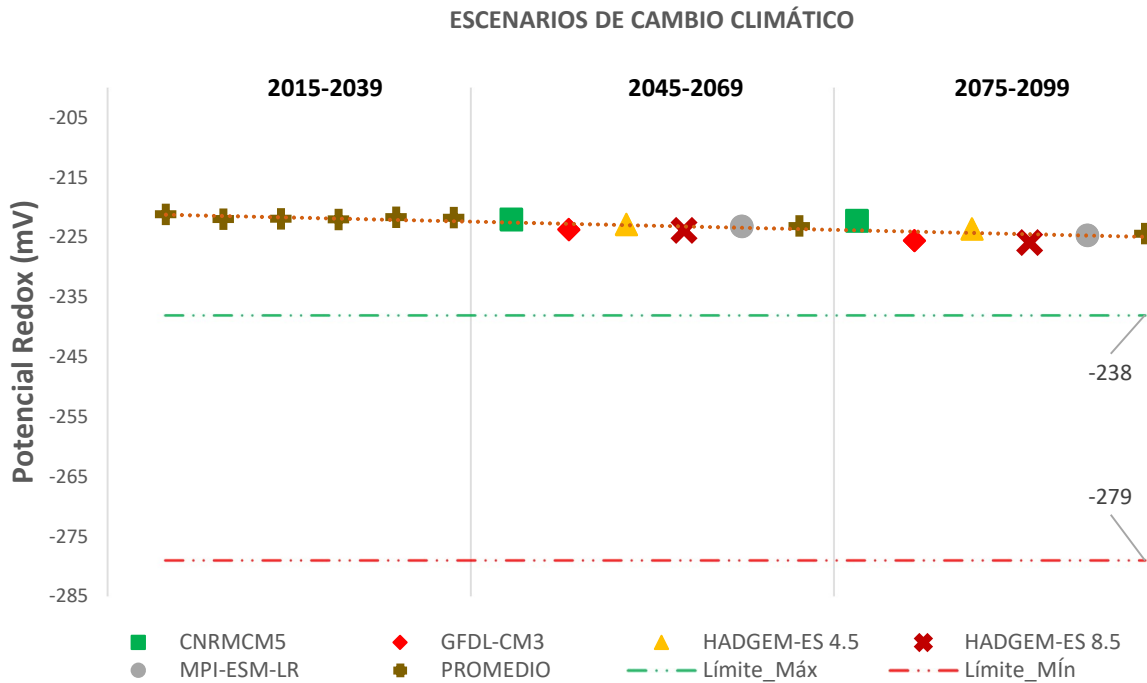
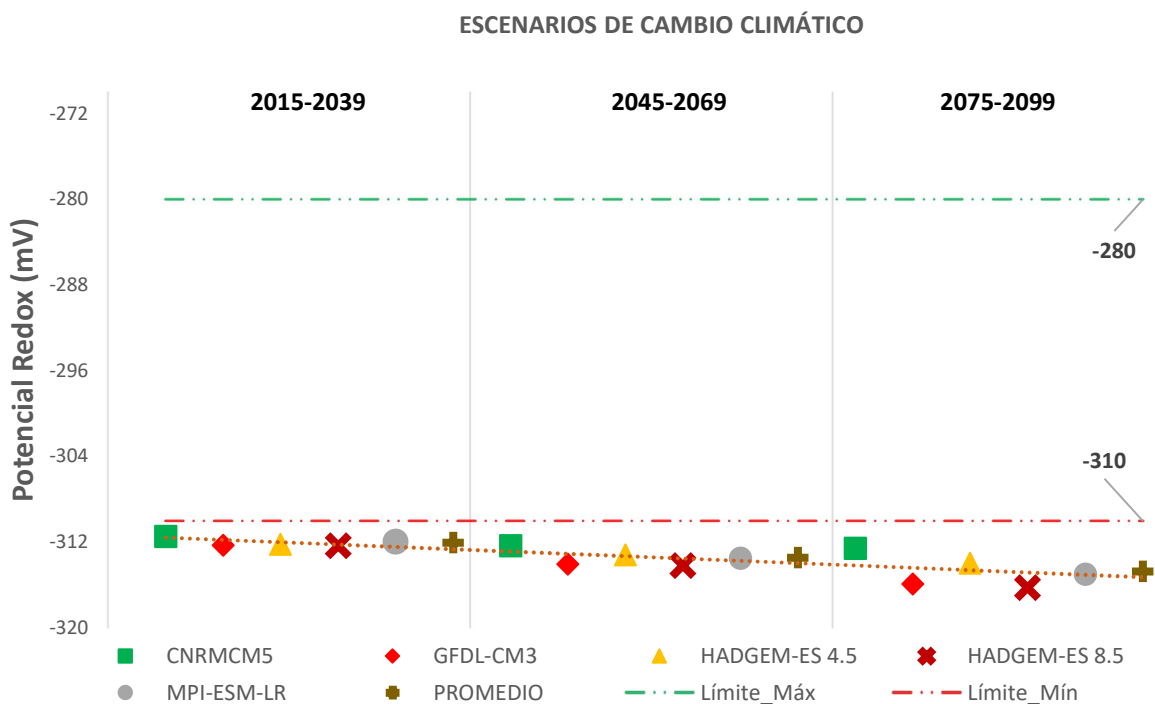


Fig. 34 Escenarios climáticos del potencial redox y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Rio Verde



5.6 Escenarios de vulnerabilidad de *Rhizophora mangle* con respecto a sus límites de tolerancia en Peten Neyac.

De la misma forma se calcularon los límites máximos y mínimos de la parcela de Rio Verde dando como resultado los datos en la Tabla 29.

Tabla 29. Límites mínimos y máximos de los parámetros fisicoquímicos en Peten Rio Verde

FRANJA ORILLA Y BOSQUES DE LA ORILLA		
Parametro	Limite mínimo	Limite máximo
Salinidad	37	41
Potencial Redox	-200	-278
pH	6.69	6.87
FRANJA BOSQUE INTERNO		
Salinidad	56	62
Potencial Redox	-369	-349
pH	6.76	6.9

5.6.1 PH

Los resultados muestran pocas diferencias en cuanto al comportamiento de la salinidad bajo cada escenario de cambio climático, dichas diferencias se observan en el grado de acidez entre cada franja. En la franja 1 (fig. 36) se puede visualizar que los datos se encuentran en su mayoría fuera de los límites de tolerancia de la especie, a excepción de los escenarios GFDL-CM3 RCP8.5 para el futuro medio y lejano y HADGEM-ES RCP8.5 solo para el lejano, que se encuentran dentro de este rango de tolerancia, por su parte el escenario con el menor grado de emisiones GEI y que en papel es el menos severo (CNRMCM5), se posiciono como aquel con valores más cercanos a la neutralidad, pero hay una notoria acidificación al pasar los años. Para la franja 2, los valores son ligeramente más ácidos que la franja 1, el comportamiento de los escenarios fue contrario a la franja anterior, aquí los escenarios están en su mayoría dentro del rango de tolerancia y los escenarios más severos (GFDL-CM3 RCP8.5 y HADGEM RCP8.5) si se ubicaron fueron de los límites con dirección a la acidez en los horizontes medio y lejano y el escenario menos severo fue el que más se acercó al nivel neutro (ver Fig. 37). Para ambas franjas hay una tendencia a acidificarse en cada horizonte de tiempo.

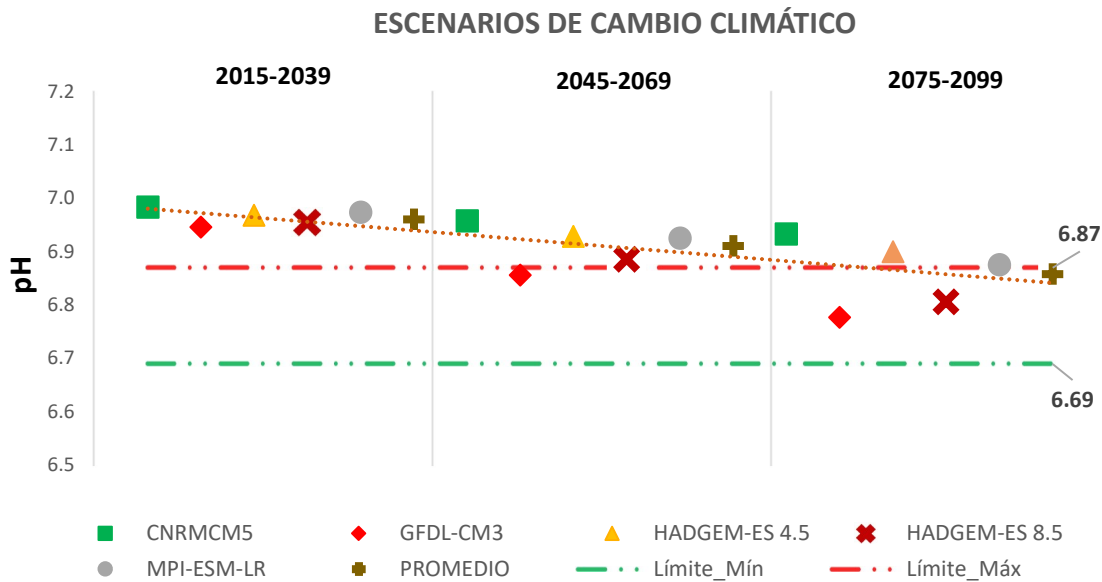


Fig. 36 Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac.

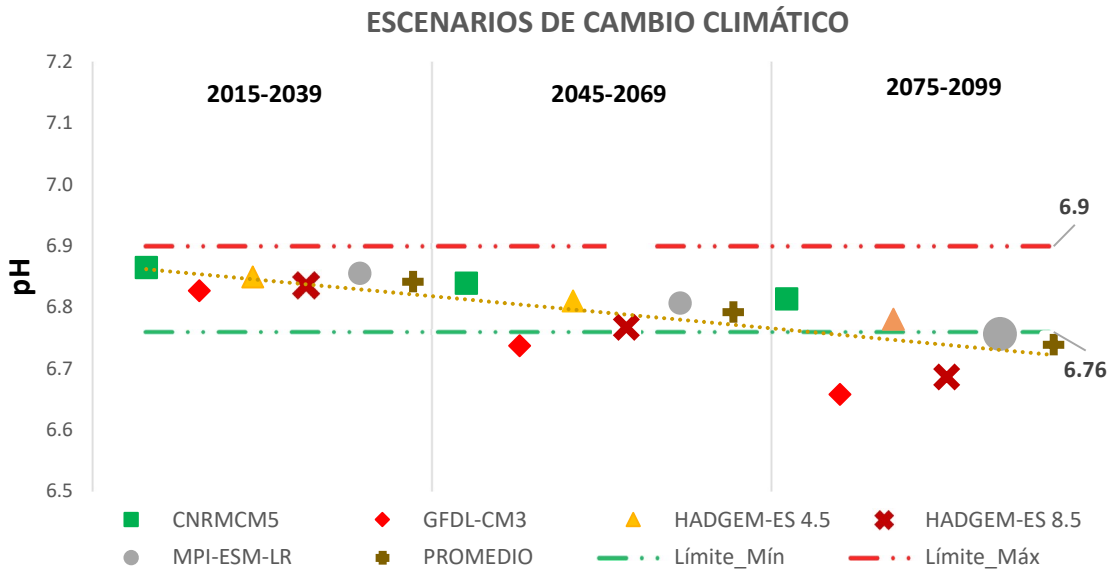


Fig. 37 Escenarios climáticos del pH y su comportamiento con respecto a sus límites en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac

5.6.2 Salinidad

En este sitio se presentaron resultados contrastantes entre ambas franjas, los escenarios de la franja 1, muestran condiciones mesohalinas y los valores obtenidos se encuentran en el rango de tolerancia en los primeros dos horizontes de tiempo, sin embargo, en el futuro lejano el escenario GFDL-CM3 es el escenario que se ubica en el umbral de tolerancia, siendo este el escenario más severo para esta franja (ver. Fig. 38). La franja 2 por su parte presenta condiciones hiperhalinas en todos los horizontes de tiempo, el comportamiento de los escenarios es casi constante para todos los escenarios y todos se encuentran muy por encima del límite de tolerancia de *Rhizophora mangle*, la cual está mezclada con matorrales de *Avicennia germinans*, tal y como se observa en la figura 39.

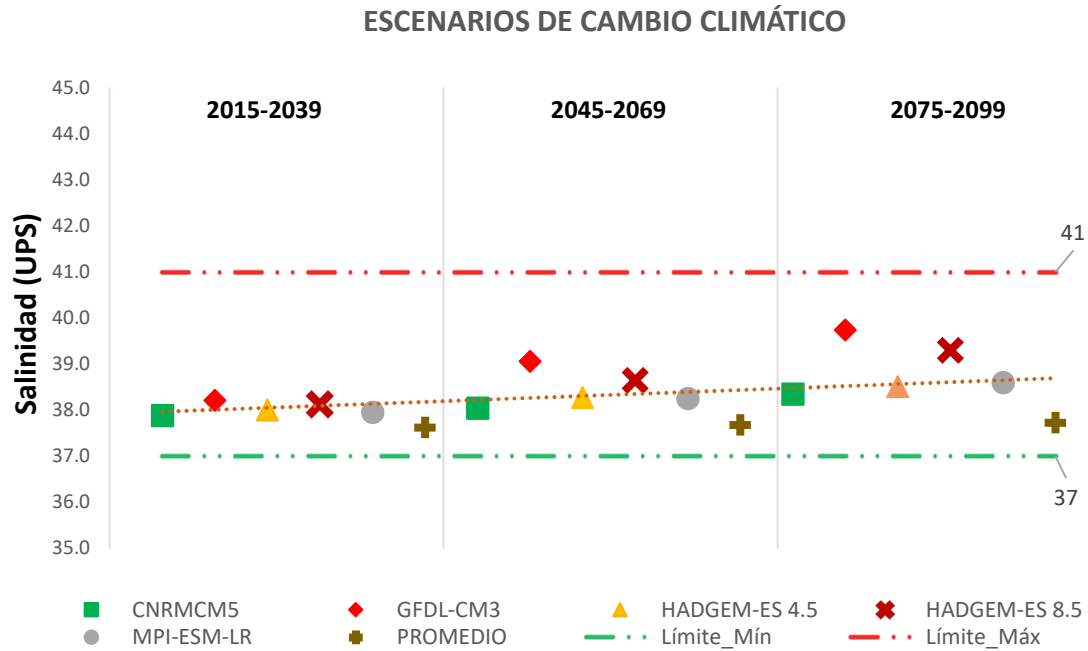


Fig. 38 Escenarios climáticos de la salinidad y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac.

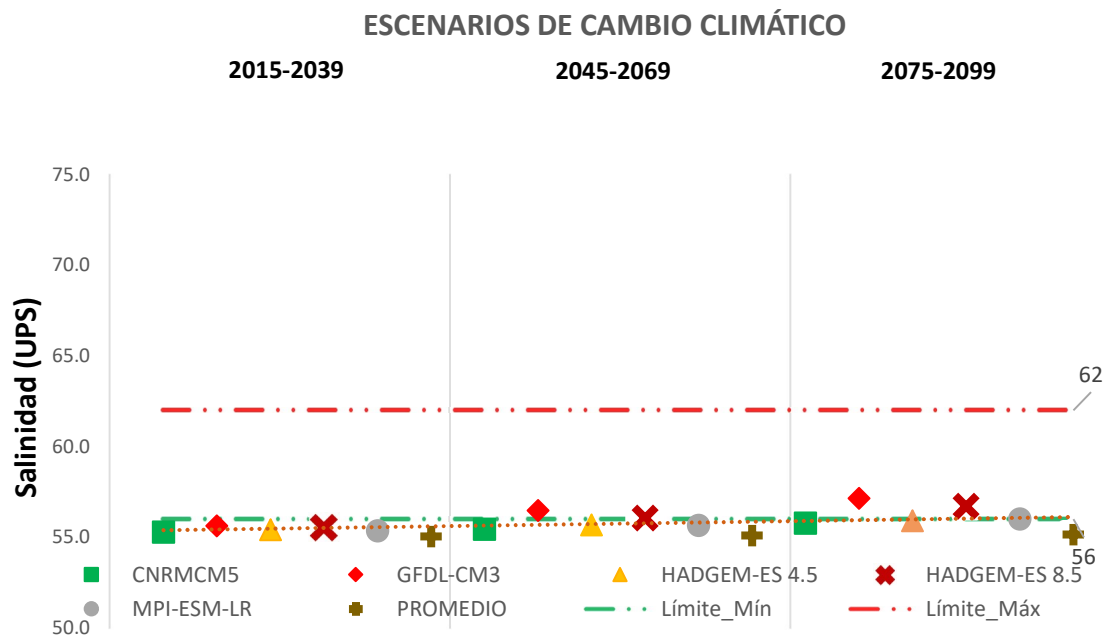


Fig. 39 Escenarios climáticos de la salinidad y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac.

5.6.3 Potencial redox

El valor de redox resultante del modelo de sensibilidad aplicado bajo los escenarios de cambio climático indican que este parámetro se comporta casi de manera constante en las dos franjas, la diferencia reside en el hecho de que mientras en la franja 1 se mantiene en condiciones óxicas (fig. 40), en la franja 2 se encuentra en condiciones hipóxicas (fig. 41), aunado a esto los valores de la franja 1 se encuentran dentro de los límites de tolerancia, mientras que los valores de la franja dos se encuentran por encima de los límites de tolerancia en dirección hacia la oxidación. Los escenarios con una ligera mayor influencia sobre el sitio son los escenarios con un RCP8.5, es decir el escenario GFDL-CM3, HADGEM-M5 y MPI-ESM-LR. Ambas franjas tienen tendencia a disminuir los valores de oxido-reducción conforme avanza el tiempo, lo cual podría tener implicaciones negativas hacia *Rhizophora mangle*.

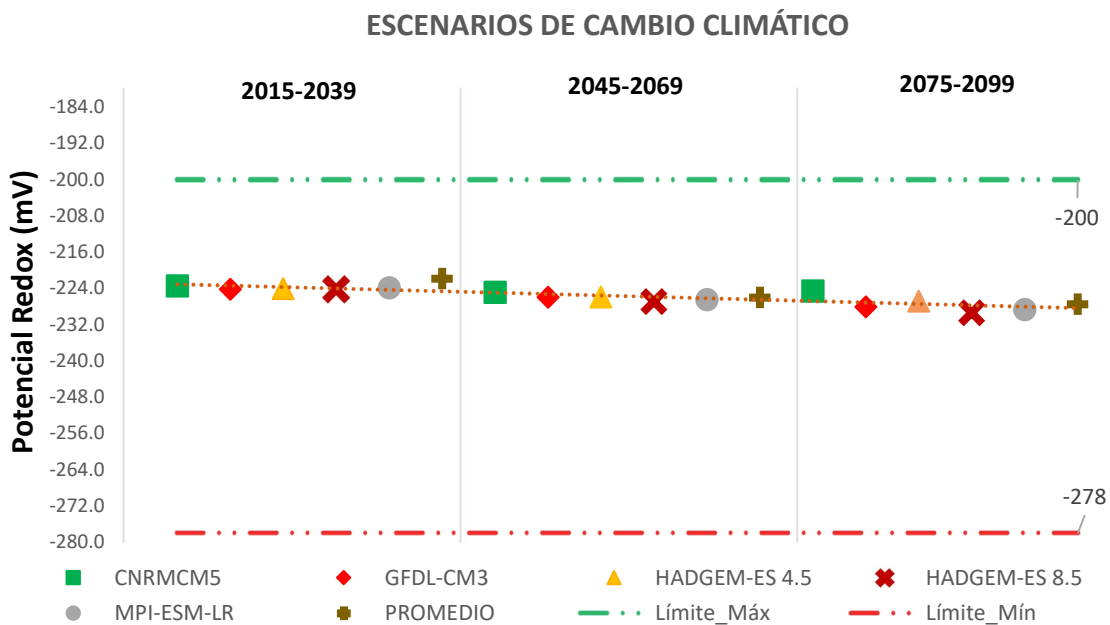


Fig. 40 Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas superficial orilla e intersticial orilla de Peten Neyac.

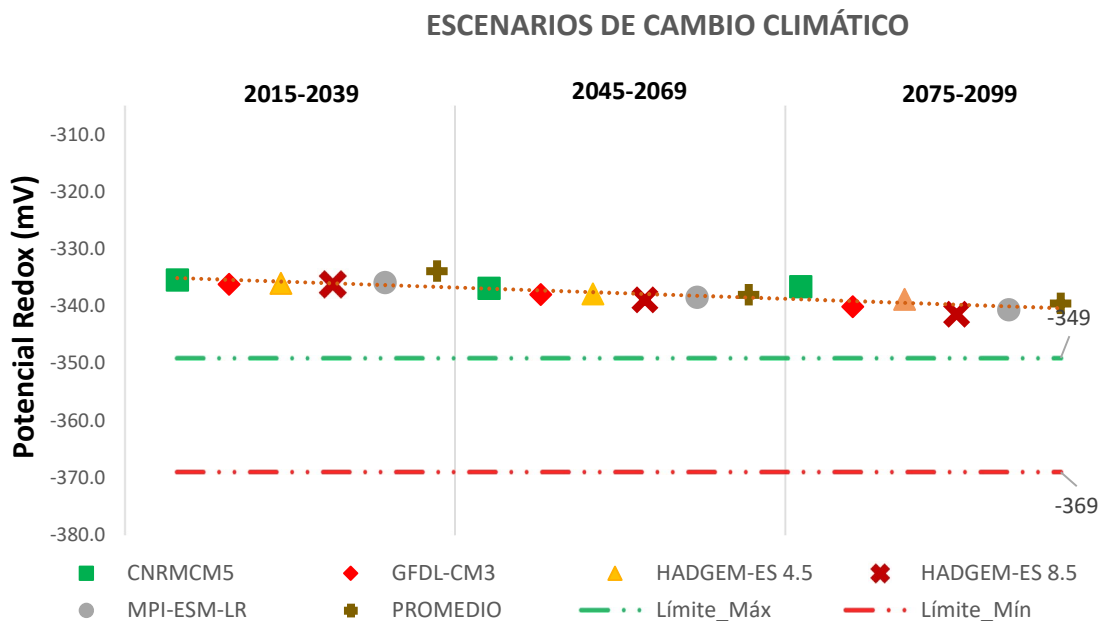


Fig. 41 Escenarios climáticos del REDOX y su comportamiento con respecto a sus límites de tolerancia en las franjas bosque de la orilla y bosque interno de Peten Neyac.

V. Discusión

Los sitios de muestreo en la RBLP se proyectan altamente vulnerables a escenarios climáticos con un alto nivel de emisiones, aquellos escenarios con un RCP de 8.5, tales como GFDL-CM3 RCP8.5 y HADGEM RCP8.5, es evidente que al pasar los años los efectos que traen consigo impactarán de mayor manera a las variables fisicoquímicas de *Rhizophora mangle*. También se encontró que las variables más sensibles según el modelo de sensibilidad fueron la salinidad y el potencial redox, pH y finalmente la temperatura del agua intersticial la cual no tuvo una significancia estadística para este estudio.

De los dos sitios muestreados, Peten Rio Verde resultó ser la parcela más vulnerable según los escenarios de cambio climático elegidos y modelados, ya que sus valores de salinidad y potencial redox se posicionaron fuera de los límites de tolerancia de la especie en ambas franjas, no así el pH, el cual se ubicó dentro del rango de tolerancia. La franja de manglar interno en Rio Verde es la que sufrirá mayor impacto debido principalmente a las condiciones hipersalinas e hipóxicas que probablemente existan como consecuencia del aumento de temperatura y déficit de

lluvias; además esta franja fue considerada dentro del estudio a pesar de ser ampliamente dominada por matorrales de *Avicennia germinans*, ya que existe la presencia *Rhizophora mangle* en la frontera con los bosques de la orilla en una zona de transición entre estas especies. Las condiciones imperantes en este sitio han provocado ya la pérdida de atributos forestales del mangle rojo, hasta niveles de inhibición fotosintética y enzimática, los cuales de empeorar pondrán en peligro la existencia de esta especie en esta franja, puesto a que los niveles de estrés ya son insostenibles para la planta, no así para el mangle negro, cuyos rangos de tolerancia son más amplios y aun resisten tal estrés. Esta pérdida de atributos forestales en Rio Verde se relaciona directamente con la construcción de una carretera contigua a la zona de manglar, provocando que sedimento terrigenicos obstaculicen y modifiquen el hidroperiodo, incrementando los tiempos de residencia del agua. Aunado a estas condiciones de estrés ya existentes, le sumamos los posibles efectos del cambio climático, es probable que las condiciones de estrés sean sean mas severos para *Rhizophora mangle*, no solo de la franja interna del manglar, sino también de aquellos en la orilla, aunque el impacto dependerá mucho de la tasa de sedimentación, el aumento relativo en el nivel del mar y de otros factores de importancia ecológica para el manglar y que para su análisis se requieren estudios a largo plazo para determinar sus efectos.

Peten Neyac es vulnerable a todos los parámetros fisicoquímicos evaluados, pero el grado varía entre ambas franjas, el mangle interno es altamente vulnerable a la salinidad y al potencial redox, mientras que los manglares de la orilla lo son al pH. Las causas probables de esta combinación de resultados, tendría que ver con el mayor déficit de lluvia que hay sobre la zona, lo cual generaría, menor tasa de sedimentación y arrastre, los cuales modificarían la microtopografía, que, en adición al aumento del nivel del mar proyectado en el área, provocaría que el área de inundación aumente llegando a niveles superiores a los que normalmente había, sobrepasando la capacidad de las raíces aéreas para realizar la respiración aerobia; en consecuencia, *Rhizophora mangle* haría dependerá de organismos anaerobios para respirar, generando la disminución del pH en los bosques de la orilla y ambientes más reducidos, debido a la generación de compuestos ácidos como consecuencia de la degradación bacteriana de la hojarasca en ambientes inundados que sumarian a la acidificación ya existente en los océanos a consecuencia de los altos niveles de CO₂ atmosférico que se precipita a este.

Las consecuencias sobre las plantas de vivir en ambientes con alto estrés es probable que se vea reflejado directamente en la estructura y composición forestal; para *Rhizophora mangle* en la RBLP es probable que se vean modificados otros aspectos morfológicos y fisiológicos como la producción de hojarasca, tamaño de hoja, cantidad de clorofila, capacidad fotosintética y asimilación de dióxido de carbono (Ball, 2002; Ball y Farquhar, 1984; Clarke y Hannon, 1967; Twilley & Chen, 1998) a consecuencia del aumento sostenido en salinidad y reducción en el potencial redox, todo esto para poder enfrentar a la falta de oxígeno y a la cantidad de energía que debe emplear para lograr una respiración y exclusión de sal adecuada para la planta. Otra característica que se verían afectadas serían, la fenología, ya que *Rhizophora mangle* es una especie que tiene una producción de hojas y órganos reproductivos estacional y ha sido asociada a una disminución en la salinidad debido a las lluvias estacionales, si hay periodos de sequía pronunciados, entonces los ciclos de floración y reproducción se verían modificados (Ball, 1988), generando que los tiempos de reproducción sean diferentes; en cuanto a competencia, *Rhizophora mangle* al enfrentar condiciones de estrés cercanas o por encima de su umbral de tolerancia, ve comprometida su supervivencia, no así para especies asociadas al mangle rojo con mayor tolerancia y cuyas aptitudes las hacen prosperar en estos sitios.

En cuanto al potencial redox, los niveles tan reducidos de redox encontrados en la franja 2 de ambos sitios de muestreo serían el resultado de prolongados periodos de inundación, este incremento en la cantidad de agua que llega a la franja interna del manglar, podría atribuirse a un aumento importante en el nivel del mar que afecta directamente la franja borde, lo que ocasiona una mayor facilidad del agua para acceder a esta zona, además la falta de lluvia y acarreo de sedimentos, genera que la tasa de sedimentación sea menor que el ritmo al cual el mar se eleva, ocasionando mayor superficie de inundación y mayor tiempo de residencia del agua. El desarrollo de *Rhizophora mangle* en ambientes altamente reducidos promueve la pérdida de oxígeno de las raíces hacia la rizosfera (Kludze & DeLaune, 1995). Este estrés por hipoxia puede ocasionar que las enzimas involucradas en la fotosíntesis sean inhibidas, lo cual reduce la capacidad de las raíces para respirar de forma aerobia, generando alto estrés en la planta hasta niveles de toxicidad. Los procesos metabólicos bacterianos anaerobios utilizados por la planta como forma alterna de obtención de oxígeno, puede dar pie a la acumulación de compuestos tóxicos que incluyen formas reducidas de Fe y Mn, etanol, ácido láctico, acetaldehído y ácidos alifáticos como el ácido fórmico, acético, ácidos butíricos y compuestos cianogénicos. La acumulación de estos compuestos puede

afectar al crecimiento de la planta o en caso del H₂S puede ser tóxico para las raíces de la planta (Pezeshki & DeLaune, 2012).

La respiración anaeróbica producto de procesos de inundación y con ambientes reducidos, es mucho menos eficiente en cuanto a la producción de energía, ya que de cada molécula rota de glucosa a ácido pirúvico se obtienen 2 ATP, mientras que en un ambiente aerobio puede llegar a formar de 36-38; esta deficiencia energética afecta negativamente a las funciones metabólicas de la planta como la toma de agua y nutrientes, transporte interno de solutos y la fijación de carbono fotosintético, además el aumento en el consumo de glucosa durante los procesos de fermentación da lugar al agotamiento de los carbohidratos que provocan un bajo crecimiento de la planta (Pezeshki & DeLaune, 2012).

La nutrición de *Rhizophora mangle* en un ambiente altamente reducido provocará la inhibición de la toma de nutrientes y transporte debido a la disfunción de raíces, muerte y bloqueos en el sistema vascular y aerénquima resultado de daños por fitotoxinas. También la disponibilidad de nutrientes se verá afectada y es que no todos los nutrientes son reducidos, sin embargo, los nutrientes esenciales como: P, K, Mg, Ca, si son reducidos, pero su disponibilidad cambia por la reacción con otros elementos (Armstrong, et al., 1996)

Pero sin duda el mayor efecto que tendrá el potencial redox es a valores de entre -250 y -350 mV, ya que bajo condiciones anóxicas y reductoras y la acción de varios grupos fisiológicos involucrados en la degradación antes de la despolimerización como las bacterias fermentadoras, convierten los productos de la hidrólisis a una variedad de productos, principalmente ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno. Una conversión adicional a través de la acción de fermentadores secundarios sulfato-reductores, acetogénicos y metanogénicos generan productos finales como CO₂, CH₄, H₂S, siendo estos importantes gases de efecto invernadero. Estos productos son transportados a través de los espacios gaseosos de la planta y son liberados a la atmósfera, lo cual significaría la pérdida de la capacidad del ecosistema como sumidero de carbono y que, de manera contraria, añadiría más GEI a la atmósfera, contribuyendo a que el efecto invernadero, lo cual terminaría por agravar aquellos parámetros a los cuales es vulnerable (Brix et al. 1996; Jespersen et al. 1998)

Conforme a los datos obtenidos en esta investigación, bajo el modelo de sensibilidad y sus potenciales efectos bajo los distintos escenarios de cambio climático, se encontró que la franja 2

(Bosques de la orilla y bosque interno) de ambos sitios de muestreo, los niveles de oxido-reducción son tales que tal fenómeno de liberación de CO₂ es probable que ya esté ocurriendo y tendrá la tendencia a agravarse, por lo que es necesario llevar a cabo más estudios a fin de reafirmarlo o refutarlo. Este fenómeno provocara que otras variables fisicoquímicas se vean afectadas, tal es el caso del pH y salinidad.

El mangle rojo es una especie altamente tolerante a la salinidad, sin embargo, muy sensible a un régimen fluctuante de salinidad; el estrés hídrico es el principal efecto de la alta salinidad sobre *Rhizophora* (Clough, 1984), estas fluctuaciones tendrán efectos negativos en la fotosíntesis y en la tasa de crecimiento de la planta si es comparado con una salinidad constante (Lin & Sternberg, 1992).

Como consecuencia de esto el manglar tendrá que enfrentar los problemas a nivel morfológico, fisiológico y funcional que trae consigo la mayor presencia de sal en sus tejidos y la disminución en la disponibilidad de agua. Morfológicamente las plantas que se encuentran bajo condiciones de estrés hídrico y por alta salinidad, son plantas con una altura baja, con diámetro de dosel inferior y tamaño de hojas reducido para hacer descender la transpiración y con reducción de nervios y estomas lo cual se origina principalmente por disminución en la tasa de asimilación neta de agua por unidad de área de hoja (Ball, 1988), esta disminución está asociada con el decremento en la conductancia estomatal y tasa de respiración de la planta, ya que inhibe la difusión del CO₂ en la hoja. Generalmente los manglares son altamente eficientes en el uso del agua, la cual se ve incrementada a medida que haya mayor estrés ambiental, para ello la planta maximiza la fijación de carbono fotosintético, mientras que minimiza la pérdida de agua. De mara tal que en ambientes con elevados niveles de CO₂ como los escenarios climáticos con RCP8.5 podría haber una mejora en la tasa de crecimiento del manglar, esto si el crecimiento de la planta estuviera limitado por el agua, carbono y nitrógeno, pero, en ambientes donde la salinidad es demasiado elevada para que las especies mantengan su suministro de agua el CO₂ este tendría poco efecto en el crecimiento, mientras que la salinidad por su parte sería un factor que limita el crecimiento (Ball & Munns, 1992).

VI. Conclusión

Rhizophora mangle dentro de las parcelas estudiadas en la RBLP y bajo los escenarios climáticos utilizados, muestran un alto grado de vulnerabilidad al aumento sostenido de temperatura y a la disminución en la precipitación, lo cual se traducirá en la modificación de las variables fisicoquímicas del agua intersticial; en este estudio se encontró que el Potencial Redox y la salinidad son los principales parámetros que se verán modificados por la acción del cambio climático. El impacto en cada una de las parcelas resulto diferenciado, pero significativo, Peten Neyac es el sitio de muestreo que probablemente sea el más afectado por la mayor presencia de la especie todas sus franjas, no así para Peten Rio Verde, en donde la población de mangle rojo se ve limitada a la franja más cercana a la orilla y en menor proporción en mangle interno, en donde *Avicennia germinans* tiene una amplia dominancia.

Los escenarios de cambio climático según el modelo de sensibilidad agravaran las condiciones de oxido-reducción, presentes en la zona, llevándolo a niveles en los cuales la planta ($Eh < -350$ mv) perderá su capacidad de retener el CO_2 en los espacios gaseosos en sus tejidos y con ello el servicio ecosistémico como sumidero de Carbono desaparecería, peor aún será que todo el carbono almacenado en el sustrato, será liberado en forma de metano (CH_4), un fuerte gas de efecto invernadero y contribuyendo a que las condiciones ambientales del manglar sean más severas, comprometiendo su salud y supervivencia. Otro factor que contribuye a la vulnerabilidad de la zona es la modificación del suelo, ya sea por la construcción de caminos cercanos a la zona, estas actividades alteran el hidropereodo al cambiar la configuración microtopográfica en cada parcela. La anterior de gran importancia debido a la vulnerabilidad de la zona al aumento del nivel del mar, como lo dicen Ortiz Pérez y Méndez, Linares, 1999, los cuales identificaron a la RBLP como un punto altamente vulnerable en las costas del Golfo de México, esto debido a que esta zona es una planicie de inundación con escaso gradiente de pendiente, además de ser la zona con mayor hundimiento de planicies estructurales en toda la península de Yucatán. El grado en el cual se presente el aumento en el nivel del mar determinara el grado de afectación que tendrá sobre el de por si ya estresante ambiente del manglar en la zona; por lo cual el incluir es necesario incluir al aumento en el nivel del mar como una amenaza más, que sin duda jugara un rol muy importante en la forma en la que el ambiente se comporte y para el cual es necesario una investigación exhaustiva que involucre un monitoreo a largo plazo para así poder proyectar los niveles que podría

alcanzar en los distintos horizontes de tiempo y con esto complementar los resultados presentados en esta investigación. además para dar mayor certeza al modelo de sensibilidad empleado, es necesario incorporar la mayor información posible, es decir incorporar al modelo la mayor de variables medioambientales y fisiológicas involucradas en el impacto del cambio climático sobre *Rhizophora*, para ello es recomendable contar con información a mediano y largo plazo derivada de monitoreos. En la RBLP esta información es incipiente y es necesario incorporar monitoreos a mediano y a largo de la línea de costa, de sedimentación y acreción, así como de producción de hojarasca, también de cambios en la marea e hidroperiodo. Otro punto para considerar es lo relacionado con la calidad de la información climática, es necesario contar con estaciones meteorológicas más cercanas a la RBLP, o en su caso actualizar las ya existentes, como es el caso de la localizada en Celestún, esto con el objetivo de brindar mayor cantidad y calidad de información, que son el alimento del modelo de sensibilidad.

La presente investigación nos presenta un panorama general de cómo podría impactar el CC a *Rhizophora mangle*, su fin principal es brindar un análisis preliminar del estado actual y futuro de este ecosistema con respecto al CC, nos sienta las bases para conocer las áreas sensibles o frágiles sobre las cuales se debe actuar en primera instancia, y así poder fortalecer la capacidad adaptativa de este ecosistema, mediante instrumentos desarrollados con ese fin y que sean capaces de brindar la información necesaria para que los tomadores de decisión generen mecanismos de conservación, preservación y uso sustentable tales que posean un enfoque integral que considere al cambio climático como una seria amenaza que debe ser atendida.

VII. Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Agráz-Hernández, C.M; Noriega-Trejo, R.; López-Portillo, J.; Flores-Verdugo, F.J.; Jiménez-Zacarías, J.J. (2006). *Guía de Campo. Identificación de los Manglares en México*. Universidad Autónoma de Campeche. 45 pp.
- Agraz Hernández, C. M., Osti Sáenz, J., Chan Keb, C. A., Chan Canul, E., Gómez Ramírez, D., Requena Pavón, G. y J. E. Reyes Castellanos. 2012. Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto FN010. México, D.F.
- Agraz Hernández C. M., C. A. Chan Keb, S. I. Iriarte-Vivar, G. Posada Vanegas, B. E. Vega Serratos y J. Osti Sáenz. (2015). Phenological variation of *Rhizophora mangle* and ground water chemistry associated to changes of the precipitation. *Hidrobiológica* 25 (1): 49-61
- Aizpuru M., Achard F., Blasco F. (2000). Global assessment of cover change of the mangrove forests using satellite imagery at medium to high resolution. EEC research project no. 15017-1999-05 FIEF ISP FR – Joint Research Centre, Ispra
- Allen, A. (2002). *Rhizophora mangle* L. In: Vozzo, J., ed. *Tropical Tree Seed Manual: Part II, Species Descriptions*. Agric. Handb. 712. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture: 690-692.
- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331-349. <https://doi.org/10.1017/s0376892902000231>
- Alongi, D. M. (2015). The Impact of Climate Change on Mangrove Forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30-39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Andrews, T. J., & Muller, G. J. (1985). Photosynthetic gas exchange of the mangrove, *Rhizophora stylosa* Griff., in its natural environment. *Oecologia*, 65(3), 449-455. <https://doi.org/10.1007/bf00378922>
- Armstrong, J., Armstrong, W., Beckett, P. M., Halder, J. E., Lythe, S., Holt, R., & Sinclair, A. (1996). Pathways of aeration and the mechanisms and beneficial effects of humidity- and Venturi-induced convections in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *Aquatic Botany*, 54(2-3), 177-197. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01044-3](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01044-3)
- Ball, M. C., & Farquhar, G. D. (1984). Photosynthetic and Stomatal Responses of Two Mangrove Species, *Aegiceras corniculatum* and *Avicennia marina*, to Long Term Salinity and Humidity Conditions. *Plant Physiology*, 74(1), 1-6. <https://doi.org/10.1104/pp.74.1.1>
- Ball, M., & Munns, R. (1992). Plant Responses to Salinity Under Elevated Atmospheric Concentrations of CO₂. *Australian Journal of Botany*, 40(5), 515. <https://doi.org/10.1071/bt9920515>

- Ball, M. C. (2002). Interactive effects of salinity and irradiance on growth: implications for mangrove forest structure along salinity gradients. *Trees*, 16(2-3), 126-139. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0169-3>
- Bhosale, L. J. and Mulik, N.G. (1991). Strategies of seed germination in mangroves. In “Proceedings on International Seed Symposium” (N. S. David and S. Mohammed, eds), pp. 201-205. Jodhpur, India.
- Cahoon, D. R. (2014). Estimating Relative Sea-Level Rise and Submergence Potential at a Coastal Wetland. *Estuaries and Coasts*, 38(3), 1077-1084. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9872-8>
- Camacho V., & Ruiz A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4).
- Cardona, O. D. (2002). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 18 pp.
- Carrasco M. N., (2013). Reconstrucción y Analisis de la Variación de la Temperatura en México. Tesis para optar por el grado de Maestra en Ciencias (Física de la Atmósfera). Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 151 pp.
- CEPAL, (2011). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe (in Spanish). United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean, Spain.
- Cintron, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., & Morris, G. (1978). Mangroves of Arid Environments in Puerto Rico and Adjacent Islands. *Biotropica*, 10(2), 110. <https://doi.org/10.2307/2388013>
- Chaix, B., Bobashev, G., Merlo, J., & Chauvin, P. (2004). Re: “Detecting patterns of occupational illness clustering with alternating logistic regressions applied to longitudinal data”. *American journal of epidemiology*, 160(5), 505–506.
- Chapman, V. J. (1976). Mangrove vegetation. Vaduz : J. Cramer
- Cherry, J.A., McKee, K.L. & Grace, J.B. (2009). Elevated CO₂ enhances biological contributions to elevation change in coastal wetlands by offsetting stressors associated with sealevel rise. *Journal of Ecology*, 97(1), 67-77.
- Clark, W.C., Jager, J., Corell, R., Kaspersen, R., McCarthy, J.J., Cash, D., Cohen, S.J., Desanker, P., Dickson, N.M., Epstein, P., Guston, D.H., Hall, J.M., Jaeger, C., Janetos, A., Leary, N., Levy, M.A., Luers, A., MacCracken, M., Melillo, J., Moss, R., Nigg, J.M., Parry, M.L., Parson, E.A., Ribot, J.C., Schellnhuber, H.-J., Seielstad, G.A., Shea, E., Vogel, C., Wilbanks, T.J., (2000). Assessing Vulnerability to Global Environmental Risks—Report of the workshop on Vulnerability to Global Environmental Change :Challenges for Research, Assessment and Decision Making, Warrenton, VA. Research and Assessment Systems for Sustainability Program Discussion Paper 2000–12, Cambridge, MA :Environment and Natural Resources Program, Belfer Center for Science and International Affairs (BCSIA), Kennedy School of Government, Harvard University.

- Clarke, L. D., & Hannon, N. J. (1970). The Mangrove Swamp and Salt Marsh Communities of the Sydney District: III. Plant Growth in Relation to Salinity and Waterlogging. *The Journal of Ecology*, 58(2), 351. <https://doi.org/10.2307/2258276>
- Clough B.F. (1984) Growth and salt balance of the mangroves, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. & *Rhizophora stylosa* Griff, in relation to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology* 11, 419-430.
- CMNUCC. (1999). Convención Marco sobre el Cambio Climático. Secretaría del Cambio Climático. Bonn. Alemania.30 p. 1999. El Protocolo de Kyoto de la Convención Marco sobre el Cambio Climático. Secretaría del Cambio Climático. Bonn. Alemania.37 p.
- CONABIO. (2009). Manglares de México: Extensión y distribución. 2ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 99 pp.
- CONABIO. (2009b). Mangle negro. Fichas de Especies Mexicanas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México. Compilado por Elizabeth Torres Bahena; Revisado por Carlos Galindo Leal. Marzo 2009. Diseño: Astrid Domínguez.
- CONABIO-CONANP. (2009). Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*). Fichas de especies mexicanas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México, D.F. Compilado por Elizabeth Torres Bahena; Revisado por Carlos Galindo Leal. Marzo 2009.
- CONANP. (2006). Programa de conservación y manejo: reserva de la Biosfera Los Petenes. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 203 pp., México, DF.
- CONAFOR. (s/f). Fichas técnicas para reforestación: *Conocarpus erectus*. Mexico. 5 pp
- Conde A., C., & Saldaña Z., S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23–30.
- Cronk, J. K., & Fennessy, M. S. (2001). *Wetland plants: Biology and ecology*. Lewis Publishers.
- Day, J. W., A. Yáñez-Arancibia, J. H. Cowan, R. H. Day, R. R. Twilley y J. R. Rybczyk. (2009a). Global climate change impacts on coastal ecosystems in the Gulf of Mexico: Considerations for integrated coastal management, Chapter 14. In: J. W. Day y A. Yáñez Arancibia (Eds.), *The Gulf of Mexico Ecosystem-based Management*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A & M University Press, College Station, TX
- De Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L. van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Doyle, T. W., Krauss, K. W., Conner, W. H., & From, A. S. (2010). Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 770-777. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.023>

- Duke, N. C., & Allen, J. A. (2006). *Rhizophora mangle*, *R. samoensis*, *R. racemosa*, *R. harrisonii* (Atlantic–East Pacific red mangrove). *Traditional Trees of Pacific Islands: Their Culture, Environment, and Use*. Permanent Agriculture Resources (PAR), Holualoa, Hawaii, 623–640.
- Duke, N. C., et al. (2007): A World Without Mangroves? *Science*, 317 (5834), pp. 41-42 . doi: 10.1126/science.317.5834.41b
- Duke, N. C., & Schmitt, K. (2015). Mangroves: Unusual Forests at the Seas Edge. In M. Köhl & L. Pancel (Eds.), *Tropical Forestry Handbook* (pp. 1–24). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41554-8_129-1
- Ellison, J.C. (1994). Climate change and sea level rise impacts on mangrove ecosystems. *Impacts of climate change on ecosystems and species*. A marine conservation and development report, IUCN.
- Ellison J.C. (2000). Chapter 15: How South Pacific mangroves may respond to predicted climate change and sea level rise. In: Gillespie A, Burns W (eds) *Climate change in the South Pacific: impacts and responses in Australia, New Zealand, and Small Islands States*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 289–301
- Ellison, J. C. (2012). *Climate Change Vulnerability Assessment and Adaptation Planning for Mangrove Systems*. Washington, DC: World Wildlife Fund (WWF)
- Ellison, J. C. (2014). Climate Change Adaptation: Management Options for Mangrove Areas. In I. Faridah-Hanum, A. Latiff, K. R. Hakeem, & M. Ozturk (Eds.), *Mangrove Ecosystems of Asia* (pp. 391–413). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8582-7_18
- Ellison, J. C. (2015). Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands Ecology and Management*, 23(2), 115–137. <http://doi.org/10.1007/s11273-014-9397-8>
- Ezcurra, E., Aburto, O., & Rosenzweig, L. (2010). Los riñones del mundo: porqué debemos proteger los manglares de México. *Investigación Ambiental Ciencia Y Política Pública*, 1(2). Retrieved from <http://www.revista.inecc.gob.mx/article/view/36>
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2006). *Global Forest Resources Assesment 2005: Progress Towards Sustainable Forest Management*, Rome, Forestry Department, FAO
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2007). *The world’s mangroves 1980-2005*. FAO Forestry Paper 153. Food and Agricultural Organization, Rome,Italy . 77 pp.
- Feller, I.C., & McKee, K.L. (2002). *MANGROVE ECOLOGY: A Manual for a Field Course A Field Manual Focused on the Biocomplexity on Mangrove Ecosystems*.
- Field, C. D. (1995). Impact of expected climate change on mangroves. In *Asia-Pacific Symposium on Mangrove Ecosystems* (pp. 75–81). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0289-6_10
- Fisher P, Spalding M.D. (1993) *Protected areas with mangrove habitat*. Draft Report World Conservation Centre, Cambridge, 60pp

- Flores V., F.; F. González F.; D. Segura Z. y P. Ramírez. 1992. Mangrove ecosystems of the Pacific Coast of Mexico: distribution, structure, litterfall and detritus dynamics. In: U. Seeliger, ed. Coastal Plant Communities in Latin America. Academic Press, Nueva York. p:269-288.
- Fritzsche K., S. S. (2014). El libro de la Vulnerabilidad : Concepto y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad. (M. V. Gratton, Trad.) Bonn, Alemania: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Gallopín, G.C., 2003. Box 1. A systemic synthesis of the relations between vulnerability, hazard, exposure and impact, aimed at policy identification.
- Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Gill, A. M. and P. B. Tomlinson. 1977. Studies on the growth of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) 4. The adult root system. *Biotropica* 9: 145-155.
- Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., & Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 237–250.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., ... Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data: Status and distributions of global mangroves. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Grimm, A. 2011. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25:537–554.
- Groombridge B., (1992). Global biodiversity: status of the earth's living resources. WCMC/The National History Museum/IUCN/UNEP/WWF/WRI, Chapman and Hall, London, 594pp
- Hogarth, P. J. (2007). The biology of mangroves and seagrasses. Oxford: Oxford University Press. 304 pp.
- Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguera, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. (Eds.), (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
- Instituto Nacional de Ecología. (2005). Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. México, D.F. pp 21
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- IPCC, 2013: “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen,

- J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, (2014): Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- IPCC, (2014b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jennerjahn, T., Gilman, E., Krauss, K., Lacerda, L., Nordhaus, I. and Wolanski, E. (2017). Mangrove Ecosystems under Climate Change. In: Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective, 1st ed. Switzerland: Victor H. Rivera-Monroy, pp.211-244.
- Jiménez, J.A. (1985) *Rhizophora mangle* L. Red Mangrove. SO-ITF-SM-2. US Forest Service. Silvics Manual. Institute of Tropical Forestry. Puerto Rico. 7 pp.
- Jimenez, J.A., 1994. Los manglares del Pacífico centroamericano. Fundación UNA. Heredia, Costa Rica.
- Jiménez, J.A. y Lugo, A.E. (2000). *Avicennia germinans*. Previamente publicado en inglés: Jiménez, Jorge A., Lugo, Ariel E. [s.f.]. *Avicennia germinans* (L.) L. SO-ITF-SM- 4. New Orleans, LA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, pp. 59-64
- Jiménez, J. A. (2000). *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f. Mangle blanco Combretaceae Familia de las combretums. General Technical Report IITF, 15, 304.
- Jones, C., and L. Carvalho. 2013. Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. *Journal of Climate* 26:6660–6678.
- Kathiresan, K., & Bingham, B. L. (2001). Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 40, 81–251.
- Kathiresan K, Qasim S.Z. (2005). Biodiversity of mangrove ecosystems. New Delhi: Hindustan Pub. Corp.
- Kitoh, A., S. Kusunoki, and T. Nakaegawa. 2011. Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM). *Journal of Geophysical Research* 116:D06105.
- Kludze, H., & DeLaune, R. D. (1995). Gaseous exchange and wetland plant response to soil redox intensity and capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 59(3), 939-945. doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900030045x

- Lacerda, L. D. (Ed.). (2002). *Mangrove Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04713-2>
- López Portillo, J. y E. Ezcurra. 2002. Los manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques*. Número especial: 27-51.
- Lot, H. A., Vázquez, Y. C., Menendez, L. F., University of Florida., & International Symposium on Biology and Management of Mangroves. (1975). Physiognomic and floristic changes near the northern limit of mangroves in the Gulf Coast of Mexico. Gainesville, Florida: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Lovelock, C. E., & Ellison, J. C. (2007). Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change. Recuperado a partir de <http://eprints.utas.edu.au/2218/>
- Lugo, A. E. (1980). Mangrove Ecosystems: Successional or Steady State? *Biotropica*, 12(2), 65. <https://doi.org/10.2307/2388158>
- Lugo, A.E & S.C. Snedaker. (1974). The ecology of mangroves. *Annual Review*
- Liu, Z. D. Ostrenga, W. Teng and S. Kempler, (2012). Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Data Services for Research and Applications, *Bulletin of the American Meteorological Society*, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00152.1>
- Lin, G. & Sternberg, L., (1992). Effects of growth form, salinity, nutrient, and sulphide on photosynthesis, carbon isotope discrimination and growth of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.). *Aust. J. Plant Physiol.*, 19: 509-517.
- Magaña, R. V., (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En J. Martínez, & A. Fernández Bremauntz (compiladores), *Cambio Climático: una visión desde México*. México D.F., Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Págs. 17-28
- Magrin, G. O., M. L. Travasso, M. O. Grondona & G. R. Rodríguez (2007). Variabilidad climática, cambio climático y sector agropecuario. s/d
- Martínez, J., Fernández Bremauntz, A., Osnaya, P., & Mexiko (Eds.). (2005). *Cambio climático: una visión desde México (Primera reimpresión)*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- McKee, K. L. 1993. Soil physicochemical patterns and mangrove species distribution: reciprocal effects?. *Journal of Ecology* 81: 477-487. *of Ecology and Systematics*, 5: 39-64.
- Medina, E., 1999. Mangrove physiology: the challenge of salt, heat, and light stress under recurrent flooding, p. 109-126. In: A. Yáñez-Arancibia y A. L. Lara-Domínguez (eds.). *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. 380 p.
- Mendez Gonzalez, J., J.J. Navar Chaidez, V. Gonzalez Ontiveros. (2008). Analisis de tendencias de precipitacion (1920-2004) en Mexico. *Investigaciones Geograficas*, 65, 38-55.
- Met Office. (2011). *Climate: observations, projections and impacts: Mexico*. Met Office, University of Nottingham, pp. 149.

- Metzger, M.J., R. Leemans, & D. Schröter, (2005). A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7: 253–267.
- Millennium Ecosystem Assessment, (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Mitra, A. (2013). *Sensitivity of Mangrove Ecosystem to Changing Climate*. New Delhi: Springer India. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-1509-7>.
- Monterroso R. A., A. Fernández E., R. I. Trejo V., A. C. Conde A., J. Escandón C., L. Villers R. & C. Gay G. (2014). Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático Universidad Nacional Autónoma de México.
- Murillo, D. M., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A. F., & Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Revista Ingenierías USBMed*, 3(1), 62–68.
- O'Brien, K., Eriksen, S. E., Schjolden, A., & Nygaard, L. P. (2004). What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research. CICERO Working Paper. Recuperado a partir de <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/192322>
- Ortiz Pérez, M A; Méndez Linares, A P; (1999). Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas (Mx)*. 68-81. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56903905>.
- Panda, A. (2009). Assessing Vulnerability to Climate Change in India. *Economic and Political Weekly*, 44(16), 105-107. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40279163>
- Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.) 2007: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Pres.
- Pavia, E.G., Graef, F. & Reyes, J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29 (9), 1324-1329, (July 2009). ISSN: 1097-0088
- Peralta A.R., Balling, R.C. & Barba-Martinez, L.R. (2009). Analysis of near-surface diurnal temperature variations and trends in southern Mexico. *International Journal of Climatology*, 29, 205-209.
- Pezeshki, S. R., & DeLaune, R. D. (2012). Soil Oxidation-Reduction in Wetlands and Its Impact on Plant Functioning. *Biology*, 1(2), 196–221. <https://doi.org/10.3390/biology1020196>
- Polidoro B. A., Carpenter K.E., Collins L., Duke N.C., Ellison A.M., et al. (2010). The Loss of Species: Mangrove Extinction Risk and Geographic Areas of Global Concern. *PLoS ONE* 5(4): e10095. doi: 10.1371/journal.pone.0010095
- Polsky C., Neff R., Yarnal B., (2007). Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram. *Global Environ Change* 17:472–485

- Reyes-Chargoy, M. A. (2003). Reforestación con *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* en la costa de Chiapas. Tesis de Licenciatura, Universidad del Mar, Puerto Ángel
- Rico - Gray, V., 1981. *Rhizophora harrisonii* (Rhizophoraceae), un nuevo registro para las costas de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 7: 163-165.
- Rodríguez-Zúñiga, M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule, A. D., Márquez-Mendoza, J. D., Vázquez-Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Velázquez-Salazar, S., Cruz-López, M. I., Ressler, R., Uribe-Martínez, A., Cerdeira-Estrada, S., Acosta-Velázquez, J., Díaz-Gallegos, J., Jiménez-Rosenberg, R., Fueyo Mac Donald, L. y Galindo-Leal, C. 2013. Manglares de México/Extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 128 pp.
- Romero, R., Adams, D., Astúa, J., Castro, C., Cavazos, M., & Garduño, R. et al. (2015). Fenómenos climáticos y su relevancia para el cambio climático regional futuro. En Reporte mexicano de cambio climático. GRUPO I BASES CIENTÍFICAS. MODELOS Y MODELACIÓN (1st ed., pp. 261-294). Ciudad de Mexico: Carlos Gay y García, Angelina Cos Gutiérrez/, Claudia Tatiana Peña Ledón.
- Rzedowski, J., 2006. Tipos de Vegetación de Mexico. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Saenger P. (2002). Mangrove Structure and Classification. In: Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation. Springer, Dordrecht
- Saenger P., Moverly J. (1985). Vegetative phenology of mangroves along the Queensland coastline. *Proc Ecol Soc Aust* 13:257–265.
- Sánchez-González, E., & Egea-Jiménez, C. (2011). Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales. Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de Población*, 17 (69), 151-185.
- Sanders, C., J. Smoak, A. Naidu, and S. Patchineelam. 2008. Recent sediment accumulation in a mangrove forest and its relevance to local sea-level rise (Ilha Grande, Brazil). *Journal of Coastal Research* 24:533–536. Sanders, C., J. Smoak, L.
- Sanders, A. Naidu, & S. Patchineelam. 2010. Organic carbon accumulation in Brazilian mangal sediments. *Journal of South American Earth Sciences* 30:189–192.
- Saintilan, N., N. Wilson, K. Rogers, A. Rajkara, & K. Krauss. 2014. Mangrove expansion and salt marsh decline at mangrove poleward limits. *Global Change Biology* 20:147–157.
- SEMARNAT. 2006. El medio ambiente en México 2005: En resumen. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 91 pp
- Smith, S.M. and Snedaker, S.C. (1995). Salinity responses in two populations of viviparous *Rhizophora mangle* L. seedlings. *Biotropica* 27 (4), 435-440.
- Smit, B., Wandel, J., -(2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* 16 (3), 282–292.
- Snedaker SC (1993) Impact on mangroves. In: Maul GA (ed) Climate change in the intra-American seas: implications of future climate change on the ecosystems and socio-economic structure of the marine

and coastal regimes of the Caribbean Sea, Gulf of Mexico, Bahamas and N. E. Coast of South America. Edward Arnold, London, pp 282–305

- Snedaker SC (1995). Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia* 295:43–49
- Soares, M., G. Duque Estrada, V. Fernandez, and M. Pereira Tognella. 2012. Southern limit of the Western South Atlantic mangroves: assessment of the potential effects of global warming from a biogeographical perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 101:44–53.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A., Wratt, D., 2007. Technical summary. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Spalding M.D., Blasco F., Field C.D. (eds), (1997). *World mangrove atlas*. International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, p 178
- Spalding, M., Kainuma, M., & Collins, L. (2010). *World atlas of mangroves*. London, UK: Washington, DC : Earthscan.
- Tomlinson, P. B. (1986). *The botany of mangroves*. Cambridge [Cambridgeshire: Cambridge University Press
- Trejo T., J. (2009). Un mangle de plata (*Conocarpus erectus*). Desde El Herbario CICY, (1), 21-22.
- Troche S., C., Rodríguez-Zúñiga, M.T., Velázquez-Salazar, S., Valderrama Landeros, L., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, A., Vázquez-Balderas, B., Cruz-López, M.I. y Ressler, R. (2016). Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo (1970/1980— 2015). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- Turner B.L., Kasperson R.E., Matson P.A., McCarthy J.J., Corell R.W., Christensen L., Ecklet N., Kasperson J.X., Luers A., Martello M.L., Polsky C., Pulipher A., Schiller A. (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci* 100:8074–8079
- Twilley, R.R. and Chen, R. (1998). A water budget and hydrology model of a basin mangrove forest in Rookery Bay, Florida. *Marine and Freshwater Research*, 49 : 309–323.
- UNEP (1994) Assessment and monitoring of climatic change impacts on mangrove ecosystems. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 154. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme: 62 pp.
- UNESCO (1973) *International classification and mapping of vegetation*. United Nations Education, Scientific and Cultural Organization, Paris.

- UNESCO (1992). Coastal systems studies and sustainable development. In: Proceedings of the COMAR interregional scientific conference, UNESCO, Paris, 21–25 May 1991, 276pp
- Vázquez-Lule, A. D.; J. E. Reyes-Castellanos y C. Agraz-Hernández. Caracterización del sitio de manglar Petenes, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2009). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.
- Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM.
- Velázquez de Castro González, F. (2005). Cambio climático y protocolo de Kioto. Ciencia y estrategias: Compromisos para España. Revista española de salud pública, 79(2), 191–201
- Viera, M. A. D., & González, R. C. (2002). Geoestadística aplicada. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ministerio de Ciencia, Tecnología Y Medio Ambiente de Cuba: México DF, Mexico, 31–57.
- Villalobos Z, G. (2004). Reservas de la Biósfera: Los Petenes y Ría Celestún. El Manejo Costero en México. UAC/CETYS Univesidad/UQROO/SEMARNAT. México, 397-412
- Von Carlowitz, P.G., G.V., Wolf y R.E.M., Kemperman. 1991. The Multipurpose and Shrub Database. An Information and Decision-Support System. Manual. Versión 1.0. ICRAF. Nairobi, Kenia.
- Waisel, Y. (1972). Biology of Halophytes. Amsterdam University Press.
- Williams, S.E., L.P. Shoo, J.L. Isaac, A.A. Hoffmann, and G. Langham. (2008). Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. PloS Biology 6: 2621–2626
- Yáñez , A., et al. Los manglares frente al Cambio Climático ¿Tropicalización global del Golfo de México?. En Yáñez-Arancibia, A., ed., (2010). Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera. Instituto de Ecología A.C. Inecol, Texas Sea Grant Program Houston, INE-Semarnat, México DF. 180 p
- 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.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., & Day, R. H. (2014). Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. Madera y bosques, 20 (SPE), 39–75
- Yáñez-Espinosa L., Angeles G, López-Portillo J, Barrales S. (2009). *Variación anatómica de la madera de Avicennia germinans en la Laguna de La Mancha Veracruz, México*. Bol Soc Bot México 15:7–15.

ANEXO I. Modelo de sensibilidad y pruebas de validacion

1. Resultados de la regresión

1.1 Regresiones para Peten Neyac

- *Potencial Redox*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGREDOX

Method: Least Squares

Sample: 1 642

Included observations: 642

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	1.815379	0.020969	86.57617	0.0000
LOGPRECIP	-0.096895	0.016870	-5.743779	0.0000
R-squared	-0.089841	Mean dependent var		5.569144
Adjusted R-squared	-0.091544	S.D. dependent var		0.387736
S.E. of regression	0.405095	Akaike info criterion		1.033720
Sum squared resid	105.0253	Schwarz criterion		1.047629
Log likelihood	-329.8242	Hannan-Quinn criter.		1.039118
Durbin-Watson stat	0.873114			

Prueba de Autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	185.4683	Prob. F(2,638)	0.0000
Obs*R-squared	236.0320	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de Heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	4.089487	Prob. F(2,639)	0.0172
Obs*R-squared	8.113524	Prob. Chi-Square(2)	0.0173
Scaled explained SS	8.626295	Prob. Chi-Square(2)	0.0134

- *PH*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGPH
Method: Least Squares
Sample: 1 642
Included observations: 642

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	0.627027	0.010741	58.37707	0.0000
LOGPRECIP	-0.027845	0.008641	-3.222362	0.0013
R-squared	-0.077803	Mean dependent var		1.946143
Adjusted R-squared	-0.079487	S.D. dependent var		0.199721
S.E. of regression	0.207507	Akaike info criterion		-0.304196
Sum squared resid	27.55778	Schwarz criterion		-0.290287
Log likelihood	99.64686	Hannan-Quinn criter.		-0.298798
Durbin-Watson stat	1.726413			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	7.706033	Prob. F(2,638)	0.0005
Obs*R-squared	15.14289	Prob. Chi-Square(2)	0.0005

Prueba de Heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	0.383486	Prob. F(2,639)	0.6816
Obs*R-squared	0.769650	Prob. Chi-Square(2)	0.6806
Scaled explained SS	157.1124	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

- *Salinidad*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGSAL

Method: Least Squares

Sample: 1 642

Included observations: 640

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	1.251392	0.018675	67.00917	0.0000
LOGPRECIP	-0.091612	0.015026	-6.096943	0.0000
R-squared	-0.073040	Mean dependent var		3.741400
Adjusted R-squared	-0.074722	S.D. dependent var		0.348016
S.E. of regression	0.360784	Akaike info criterion		0.802044
Sum squared resid	83.04517	Schwarz criterion		0.815986
Log likelihood	-254.6540	Hannan-Quinn criter.		0.807455
Durbin-Watson stat	0.741186			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	228.3962	Prob. F(2,636)	0.0000
Obs*R-squared	267.5231	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	4.188408	Prob. F(2,637)	0.0156
Obs*R-squared	8.307027	Prob. Chi-Square(2)	0.0157
Scaled explained SS	29.35480	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

- *Temperatura del agua intersticial*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGTAG

Method: Least Squares

Date: 11/16/17 Time: 16:05

Sample: 1 642

Included observations: 642

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	0.995192	0.004959	200.6924	0.0000
LOGPRECIP	0.005528	0.003989	1.385606	0.1664
R-squared	-0.256838	Mean dependent var		3.284631
Adjusted R-squared	-0.258802	S.D. dependent var		0.085386
S.E. of regression	0.095800	Akaike info criterion		-1.850006
Sum squared resid	5.873644	Schwarz criterion		-1.836097
Log likelihood	595.8518	Hannan-Quinn criter.		-1.844608
Durbin-Watson stat	1.008179			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	141.2355	Prob. F(2,638)	0.0000
Obs*R-squared	197.0147	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	87.69558	Prob. F(2,639)	0.0000
Obs*R-squared	138.2642	Prob. Chi-Square(2)	0.0000
Scaled explained SS	340.1761	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

1.2 Regresiones para Peten Rio Verde

- *Potencial Redox*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGREDOX
Method: Least Squares
Date: 11/16/17 Time: 22:26
Sample: 1 642
Included observations: 641

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	1.460535	0.044239	33.01466	0.0000
LOGPRECIP	-0.054112	0.037528	-1.441919	0.1498
R-squared	-0.001132	Mean dependent var		4.619666
Adjusted R-squared	-0.002699	S.D. dependent var		0.989787
S.E. of regression	0.991122	Akaike info criterion		2.823157
Sum squared resid	627.7045	Schwarz criterion		2.837083
Log likelihood	-902.8219	Hannan-Quinn criter.		2.828562
Durbin-Watson stat	0.629140			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	293.6650	Prob. F(2,637)	0.0000
Obs*R-squared	307.4976	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	3.262991	Prob. F(2,638)	0.0389
Obs*R-squared	6.490280	Prob. Chi-Square(2)	0.0390
Scaled explained SS	8.903576	Prob. Chi-Square(2)	0.0117

- pH

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGPH
Method: Least Squares
Date: 11/16/17 Time: 22:27
Sample: 1 642
Included observations: 642

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	0.609341	0.004343	140.2981	0.0000
LOGPRECIP	-0.023367	0.003687	-6.337607	0.0000
R-squared	-0.515829	Mean dependent var		1.925314
Adjusted R-squared	-0.518198	S.D. dependent var		0.079458
S.E. of regression	0.097904	Akaike info criterion		-1.806546
Sum squared resid	6.134538	Schwarz criterion		-1.792638
Log likelihood	581.9012	Hannan-Quinn criter.		-1.801148
Durbin-Watson stat	1.025045			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	103.2128	Prob. F(2,638)	0.0000
Obs*R-squared	156.9412	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	10.78817	Prob. F(2,639)	0.0000
Obs*R-squared	20.96958	Prob. Chi-Square(2)	0.0000
Scaled explained SS	31.75688	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

- Salinidad

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGSALINIDAD

Method: Least Squares

Date: 11/16/17 Time: 22:28

Sample: 1 642

Included observations: 640

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	1.230920	0.022555	54.57464	0.0000
LOGPRECIP	-0.052245	0.019158	-2.727128	0.0066
R-squared	-0.054676	Mean dependent var		3.870349
Adjusted R-squared	-0.056329	S.D. dependent var		0.493875
S.E. of regression	0.507594	Akaike info criterion		1.484850
Sum squared resid	164.3818	Schwarz criterion		1.498793
Log likelihood	-473.1521	Hannan-Quinn criter.		1.490262
Durbin-Watson stat	0.493356			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	418.0764	Prob. F(2,636)	0.0000
Obs*R-squared	363.5070	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	0.564230	Prob. F(2,637)	0.5691
Obs*R-squared	1.131770	Prob. Chi-Square(2)	0.5679
Scaled explained SS	3.181454	Prob. Chi-Square(2)	0.2038

- *Temperatura del agua intersticial*

Prueba de sensibilidad

Dependent Variable: LOGTAG
Method: Least Squares
Date: 11/16/17 Time: 22:29
Sample: 1 642
Included observations: 632

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOGTAIRE	0.995009	0.004036	246.5043	0.0000
LOGPRECIP	0.002071	0.003415	0.606449	0.5444
R-squared	-0.122936	Mean dependent var		3.295739
Adjusted R-squared	-0.124718	S.D. dependent var		0.085017
S.E. of regression	0.090163	Akaike info criterion		-1.971242
Sum squared resid	5.121470	Schwarz criterion		-1.957163
Log likelihood	624.9124	Hannan-Quinn criter.		-1.965774
Durbin-Watson stat	0.981171			

Prueba de autocorrelación

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	113.3161	Prob. F(2,628)	0.0000
Obs*R-squared	167.5944	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Prueba de heterocedasticidad

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey

F-statistic	36.64569	Prob. F(2,629)	0.0000
Obs*R-squared	65.95574	Prob. Chi-Square(2)	0.0000
Scaled explained SS	129.1929	Prob. Chi-Square(2)	0.0000



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00073

Matrícula: 2161801638

Escenarios de vulnerabilidad de la especie Rhizophora Mangle en la reserva de la biosfera "Los Petenes" ante el cambio climático.



Con base en la Legislación de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México se presentaron a las 15:00 horas del día 3 del mes de marzo del año 2021 POR VÍA REMOTA ELECTRÓNICA, los suscritos miembros del jurado designado por la Comisión del Posgrado:

DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ MENDIETA
DR. CARLOS ARMANDO CHAN KEB
DRA. MARIA ESTHER QUINTERO RIVERO

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

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: JOSE GUADALUPE GARCIA CASANOVA

JOSE GUADALUPE GARCIA CASANOVA
ALUMNO

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

Aprobado

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

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

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JESUS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE

DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ
MENDIETA

VOCAL

DR. CARLOS ARMANDO CHAN KEB

SECRETARIA

DRA. MARIA ESTHER QUINTERO RIVERO