



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

Tesis

Análisis cuantitativo del hidropериодо y el impacto ambiental del incremento de la temperatura en el ecosistema de manglar en Mahahual, Quintana Roo (enero 2010 – agosto 2012).

Presentado por:

Carballo Parra Rocío

División de Ciencias e Ingenierías DCI:

Ingeniería Ambiental

Director de tesis:

M. en C. Víctor Miranda Soberanis

Asesores:

Biól. Laura Patricia Flores Castillo

Dr. Ricardo Torres Lara

Chetumal, Quintana Roo, México. Junio 2013.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

INGENIERA AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS:

Director: _____

M. en C. Víctor Florentino Miranda Soberanis

Asesor propietario: _____

Biól. Laura Patricia Flores Castillo

Asesor propietario: _____

Dr. Ricardo Torres Lara

Asesor suplente: _____

M.C. José Martín Rivero Rodríguez

Asesor suplente: _____

M.C. Jennifer Denisse Ruiz Ramírez

Chetumal, Quintana Roo, México. Junio 2013.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todo lo que me ha brindado.

A mi Familia: A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, por creer en mí y por la sabiduría que siempre han sabido aportar a mi vida. A mi hermano, por brindarme parte de sus conocimientos, que enriquecieron mi formación académica; pero en especial, por llenar mi vida de alegrías.

A mi Director, por depositar su confianza en mí y aceptarme para la realización de mi tesis, por asesorarme en cada paso para el desarrollo de la misma y así permitirme lograr la culminación de este trabajo, y por su amabilidad.

A la profesora Patricia Flores, por guiarme en todo el transcurso de mi carrera y por apoyarme en la finalización de la misma.

Al profesor Ricardo Torres, por darme un voto de confianza y creer en mí para desarrollar este trabajo y por su participación constante en el mismo, también por motivarme a expandir mi formación académica.

Al profesor Martín Rivero, por ser sencillamente el mejor profesor que un alumno puede aspirar a tener, por sus conocimientos impartidos, y por sus bromas.

A la profesora Jennifer Ruiz, por su sencillez y hospitalidad. También por motivarme a mi crecimiento profesional.

A mis amigos, en especial a Leydy, Mayté, Silvia y Édgar, porque intencionalmente o no, han hecho de mí una mejor persona, en el ámbito profesional y personal.

A todos mis profesores, por formarme académicamente.

A la Universidad de Quintana Roo, por permitir mi formación académica. Y por apoyarme en la impresión de este trabajo de tesis.

La realización de la presente tesis se realizó con financiamiento del proyecto “Sensibilidad y vulnerabilidad de los ecosistemas costeros del Sureste de México ante el cambio climático global”, (YUC-2008-C06-108929) financiado por Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica (FOMIX) del estado de Yucatán, y ejecutado por la Red Interinstitucional de Cambio Climático del Sureste de México, la cual es liderada por el CINVESTAV Unidad Mérida.

ÍNDICE

Marco teórico.....	9
Antecedentes.....	14
Justificación	16
Objetivos.....	17
Metodología.....	18
Resultados.....	23
Discusión	41
Conclusión.....	58
Referencias	59
Anexos	65
Glosario	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los manglares de México	11
Figura 2. Ubicación geográfica de Mahahual	18
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo	19
Figura 4. Leveloader	20
Figura 5. Temperatura promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio	25
Figura 6. Temperatura promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo	25
Figura 7. Nivel de agua promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio	26
Figura 8. Nivel de agua promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo	27
Figura 9. Salinidad promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio	27
Figura 10. Salinidad promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo	28
Figura 11. Temperatura promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo	29
Figura 12. Nivel de agua promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo.....	30
Figura 13. Salinidad promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo	31
Figura 14. Serie de tiempo de temperatura para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.....	31
Figura 15. Serie de tiempo de nivel de agua para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.....	32
Figura 16. Serie de tiempo de salinidad para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.....	32
Figura 17. Estimación de la variación de la temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA.....	33

Figura 18. Estimación de la variación de la temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica	34
Figura 19. Estimación de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por salinidad, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA	35
Figura 20. Estimación de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por salinidad, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica.....	36
Figura 21. Estimación de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA.....	37
Figura 22. Estimación de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica.....	38
Figura 23. Estimación de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por temperatura, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA	39
Figura 24. Estimación de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por temperatura, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica.....	39
Figura 25. Secciones hidrogeológicas de la región Costa Maya	42
Figura 26. Presupuesto de un humedal	44
Figura 27. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 1	44
Figura 28. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 2	45
Figura 29. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 3	45
Figura 30. Escenarios de variación de la precipitación y temperatura para el estado de Quintana Roo	53
Figura 31. Temperatura promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.....	65

Figura 32. Temperatura promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.....	65
Figura 33. Temperatura promedio mensual durante el año 2012 para los tres sitios de muestreo.....	66
Figura 34. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.....	66
Figura 35. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.....	67
Figura 36. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2012 para los tres sitios de muestreo.....	67
Figura 37. Salinidad promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.....	68
Figura 38. Salinidad promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.....	68
Figura 39. Salinidad promedio mensual durante el año 2012 para los tres sitios de muestreo.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Meses contemplados en la clasificación de temporadas por CONAGUA y la propuesta empírica	21
Tabla 2. Periodo anual con fechas de inicio y finalización que cuentan con registros por sitio de muestreo	23
Tabla 3. Días efectivos y no efectivos para el periodo 2010 – 2012.....	23
Tabla 4. Valores descriptivos de los tres sitios de muestreo para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012.....	24
Tabla 5. Caracterización del hidroperiodo de los sitios de muestreo Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3	41
Tabla 6. Clasificación de los cuerpos de agua según su salinidad	46
Tabla 7. Estimación de las variaciones de temperatura y salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, e intervalo de confianza del 95% para las estimaciones.....	48
Tabla 8. Principales respuestas esperadas de los ecosistemas costeros tropicales frente a las predicciones sobre el cambio climático	51
Tabla 9. Límites de tolerancia a la salinidad para cuatro especies de mangle	55
Tabla 10. Especies de mangle presentes en los sitios de muestreo	55
Tabla 11. Pérdida neta en extensión de humedales (km ²) por algunos estados costeros de México asumiendo un ascenso en el nivel del mar de un metro para fines del siglo XXI .	57

MARCO TEÓRICO

Las regiones costeras son zonas de transición entre ecosistemas terrestres y ecosistemas marinos, por lo tanto, son consideradas ecotonos, en los cuales se puede encontrar una diversidad de biota perteneciente a los tipos de ambiente constituyentes de estas áreas. Por ejemplo, el manglar, que es uno de los ecosistemas pertenecientes a la región costera, posee dentro de su diversidad de especies, árboles llamados mangles, peces, crustáceos y moluscos.

Cervantes (2007, p.39) se refiere a los ecosistemas acuáticos costeros como todos aquellos cuerpos de agua que se encuentran en la zona litoral, manteniendo una comunicación permanente o temporal con el mar y que pueden o no estar conectados a sistemas dulceacuícolas. Lara (2008, p.111) menciona que la zona costera es aquella que abarca desde menos de 200 m de profundidad en el mar, hasta 100 km tierra adentro, o 50 m de elevación (lo que esté más cerca del mar).

Debido a las características bióticas (flora y fauna) resultantes de los ecosistemas costeros, estos son considerados zonas con una elevada productividad, que los hace al mismo tiempo muy vulnerables. La dualidad productividad-vulnerabilidad se refiere a que estos ecosistemas fungen como hábitat de especies de interés comercial (como por ejemplo los crustáceos y los recursos maderables) que son utilizadas como fuente de alimentación y vivienda de las regiones circundantes a los mismos, pero que derivado del crecimiento poblacional y del incremento en la demanda de necesidades básicas pueden ser sobreexplotados tornándolos vulnerables (a las actividades antropogénicas).

Como parte de los ecosistemas costeros se puede encontrar a los humedales, que de acuerdo al Convenio RAMSAR (1971), son extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea no exceda los seis metros.

Son determinadas características ambientales que deben conjuntarse para que los humedales puedan formarse y reproducirse: a) La precipitación debe ser mayor a la evaporación de agua y a la transpiración de las plantas. Cuando la lluvia es abundante el agua se acumula en el humedal, aun cuando haya una pérdida por la evaporación de agua causada por el sol y la transpiración de las plantas; b) el contorno del suelo debe permitir que se acumule el agua, es decir, debe existir un desnivel topográfico entre la superficie del suelo y el humedal. Según la profundidad del desnivel y el tipo de agua (dulce, salobre o salada), será el tipo de vegetación que domine el humedal y; c) hay una entrada de agua permanente como un río, o bien una entrada de agua temporal como escurrimientos artificiales, arroyos de temporal o incluso la elevación del manto freático (Moreno & Infante 2009, p.10).

Para la identificación y delimitación práctica de los humedales se utilizan tres criterios, relacionados con la funcionalidad del sistema: 1) presencia de agua: en la superficie o dentro de la zona de raíces; 2) suelos hídricos: suelos saturados, inundados o pantanosos

durante el tiempo suficiente como para desarrollar condiciones anaeróbicas en su parte superior y; c) vegetación hidrófila: plantas adaptadas a situaciones de inundación (Mitsch & Grosselink, 1993).

Los humedales representan a una diversidad de ecosistemas dentro de los cuales se encuentran los manglares. De acuerdo con la definición del Convenio RAMSAR, el ecosistema de manglar pertenece al grupo de los humedales debido a que son porciones de suelo sujetas a una inundación transitoria o constante caracterizada por la combinación de agua dulce y salada; lo que los clasifica como humedales tipo estuarinos.

Los manglares son una formación vegetal leñosa, densa, arbórea o arbustiva de 1 a 30 metros de altura, compuesta de una o varias especies de mangle y con poca presencia de especies herbáceas y enredaderas (CONABIO, 2010). En estos ecosistemas predominan distintas especies de mangles, los cuales, son árboles o arbustos que poseen raíces aéreas respiratorias llamadas neumatóforos y tienen la particularidad de ser plantas resistentes a la salinidad del agua (CONABIO, 2009, p.16). Los manglares son halófitas facultativas que pueden crecer a diferentes salinidades que van desde 0‰ (dulceacuícolas) hasta hipersalinas (entre 40 y 90‰), pero alcanzan su máximo desarrollo en condiciones salobres (alrededor de 15‰) (Agraz, 1999, p.1).

Los manglares se desarrollan en planicies costeras de los trópicos húmedos, principalmente alrededor de esteros y lagunas costeras, cerca de las desembocaduras de ríos y arroyos (CONABIO, 2009, p.16).

En México se pueden encontrar primordialmente cuatro especies de mangle de entre las más de 50 que existen en el mundo, éstas son: mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle negro (*Avicennia germinans*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). Se encontró (Ruiz, 2008, citado por Lara, 2008, p.113) que existe una amplia discrepancia en la literatura de los años pasados entre las distintas estimaciones de la superficie que ocupan los manglares en México, y esto se debe principalmente a cálculos hechos con diferentes métodos que no permiten comparar las distintas cifras. Los valores oscilan entre 440 000 hectáreas, estimación de FAO para el año 2000, y cerca de un millón y medio de hectáreas estimadas por Snedaker para el año 1991. La figura 1 presenta la distribución de los manglares en el territorio nacional.



Figura 1. Distribución de los manglares de México (CONABIO, 2008).

Lara (2008, p.113) cita a Flores, F., González, F. & Zaragoza, U. (1998) al hacer referencia sobre los diversos servicios ambientales que proporcionan los manglares: son sumideros de carbono, estabilizan la línea costera, forman barreras contra huracanes, son el hábitat de una variada fauna silvestre; también funcionan como filtros biológicos y son fuente de nutrientes para los hábitats de ambientes marinos adyacentes a las regiones áridas; además tienen valor económico como productores de madera y leña y como atractivo turístico y cultural. En ese sentido, se puede notar la importancia de las funciones ambientales, económicas y sociales de los manglares. Cabe mencionar, que cada una de las características y funciones del manglar están estrechamente relacionadas, de modo que si alguna de ellas se ve alterada el resultado afectará a todo el sistema en menor o mayor escala dependiendo del factor que se haya visto modificado. Por ejemplo, la deforestación de zonas de manglar para el establecimiento de sitios turísticos está enfocada a elevar la calidad de vida de los habitantes del área por su conversión en fuentes de empleo; sin embargo, la destrucción del área aumentará la presencia de dióxido de carbono, la fauna asociada a esa zona se verá obligada a emigrar hacia regiones circundantes, la construcción de edificaciones podría interrumpir el flujo de agua y el intercambio de nutrientes con el mar, lo que provocaría una disminución en la producción primaria que a su vez estaría asociada con la alteración de la cadena trófica.

Ahora bien, ya se ha mencionado que los humedales son extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua y, en ese sentido, se puede hablar de la cantidad de agua que contiene un humedal a lo largo de un periodo de tiempo. Esta cantidad de agua a lo largo del tiempo recibe el nombre de hidroperiodo. Como ya se mencionó, el hidroperiodo es el patrón estacional del nivel del agua en el humedal, el cual está determinado por tres importantes características: a) su duración (tiempo que permanece la inundación), b) frecuencia (el número de veces que se inunda en un tiempo dado), la profundidad que alcanza y c) la época de inundación (Moreno & Infante, 2009, p. 13). Las condiciones impuestas por el hidroperiodo son muy importantes para el mantenimiento de la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas, debido a que crean condiciones físicas y químicas únicas que afectan varios factores como la anaerobiosis del suelo, la acumulación de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, la riqueza y composición de especies, y la productividad primaria (Flores et al., 2007, p.34).

Paralelamente existe una variedad de factores ambientales que permiten el establecimiento del manglar, tales como el clima, el hidroperiodo, la disponibilidad de nutrientes provenientes de los ríos, del manto freático y de los escurrimientos terrestres, la salinidad intersticial y del agua, la luminosidad, el oleaje y corrientes, el viento, el tipo de suelo, las enfermedades y la herbivoría; así como por impactos negativos derivados de la actividad humana (Flores, Agraz & Benítez, 2005).

Agraz Hernández (1999, p.6) hace referencia a los manglares como ecosistemas sensibles a los cambios en el patrón de inundación (periodos de inundación y exposición al aire) que dan las condiciones hidrológicas netas producto de la combinación de las mareas, aportes fluviales/escurrimientos terrestres, precipitación-evaporación, efecto del viento, profundidad y geomorfología del cuerpo de agua adyacente y la extensión de su nivel topográfico óptimo.

Flores et al. (2005), señalan que los ambientes representados por los humedales costeros están fuertemente condicionados por el hidroperiodo y la salinidad del agua, por ende, la existencia y desarrollo de los manglares también está limitado por estos factores ambientales.

En el ecosistema de manglar existe un gradiente de salinidad en el agua, es decir, una variación de la salinidad, esto se explica por la combinación de agua dulce con agua salada (Moreno & Infante, 2009, p. 27). Para el desarrollo del manglar influye tanto la salinidad superficial del agua como la intersticial. La salinidad intersticial corresponde a la salinidad del agua en los sedimentos y es otro factor que influye en la zonación y el grado de desarrollo de los manglares (Flores et. al., 2005).

Las actividades humanas, que difieren de país a país, constituyen la principal amenaza para los manglares. Entre ellas están las relacionadas con el desarrollo urbano, industrial y turístico, así como el desarrollo agrícola, ganadero y acuícola, que compiten por el suelo en donde se asientan los manglares. Asimismo, los manglares han recibido presiones por efecto de la contaminación: desechos sólidos urbanos, contaminantes industriales,

pesticidas y fertilizantes agrícolas, derrames de petróleo, etc., así como modificaciones a las condiciones hidrológicas (CONABIO, 2008, p.8). Por otro lado, el incremento en el nivel del mar derivado de los cambios climáticos a nivel global también amenaza la extensión y productividad de este ecosistema. Al incrementarse el nivel del mar, la morfología costera sufriría cambios por las inundaciones, afectando directamente las actividades propias de las zonas y alterando los componentes de las cadenas tróficas (Majluf, 2002, p.18).

Con respecto al cambio climático, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), lo define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

El cambio climático global, específicamente los cambios en la temperatura, el CO₂, la precipitación, huracanes y tormentas, y el nivel del mar combinados con las amenazas antropogénicas amenazarán la resiliencia de los manglares; la respuesta de los manglares al cambio climático será el resultado de estos impactos que actúan sinérgicamente (McLeod & Salm, 2006, p.12).

Del párrafo anterior y de lo expuesto previamente, la posibilidad de encontrar alguna relación directa entre el cambio climático y su efecto en el ecosistema del manglar es latente, debido a la variación en los patrones de inundación, es decir, a las variaciones en el hidroperiodo, así como las implicaciones que traerían las variaciones en la temperatura en los procesos de crecimiento y desarrollo de los manglares. Dentro de los diversos efectos que se prevén con el cambio climático se encuentra la elevación del nivel del mar, lo que impactaría indudablemente la frecuencia, duración, profundidad y época de las inundaciones en los manglares, provocando con esto un posible aumento en la salinidad del agua, una reacción de las especies de mangle: enfocada a la dominancia de especies más tolerantes a la salinidad, etc.

ANTECEDENTES

La relación entre la alteración del hidropериодо y las modificaciones en los manglares se ha hecho evidente en las zonas intertropicales donde se localiza este ecosistema.

De acuerdo con el informe de los Manglares de las Islas del Pacífico, del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2006), algunas islas del Pacífico están experimentando un aumento en el nivel relativo del mar mientras que otras están experimentando una disminución en el nivel del mismo. Continuando con lo reportado en este informe, se menciona que los manglares podrían experimentar serios problemas debidos a la elevación del nivel del mar, así para el año 2100 es posible una pérdida de aproximadamente 13% de los manglares en las islas de la región del Pacífico.

En la Ciénega Grande de Santa Marta, Colombia, la modificación del hidropериодо debido a la construcción de infraestructura carretera y diques de contención, tuvo como consecuencia la mortandad de grandes extensiones de manglar. Estas obras civiles que se iniciaron durante los años 60 y 70 causaron la progresiva hipersalinización de los suelos y aguas, y la muerte masiva del manglar alcanzó 32 000 hectáreas aproximadamente (Botero, 1990, citado por Perdomo et al., 2001). Estas condiciones de salinidad excesiva provocaron la dominancia de especies de manglar más adaptadas a este tipo de ambientes.

Menéndez et al. (2003) estimaron que más de 30% de los manglares existentes en Cuba han sido afectados por causas naturales y antropogénicas. Con respecto a los agentes naturales Rodríguez et al. (2006) mencionan la acción abrasiva y el aumento en el nivel del mar, deposición de sedimentos, así como eventos meteorológicos extremos como huracanes y disminución de las precipitaciones. Por otro lado, también hacen énfasis que las afectaciones por la actividad humana son las que más daño le han ocasionado a estos ecosistemas, entre ellas se citan el represamiento de ríos, la construcción de viales, diques y pedraplenes que interrumpen el flujo de las aguas, la conversión del uso del suelo, la extracción de áridos, los incendios forestales y el turismo. Como se puede notar, tanto las implicaciones naturales como las antropogénicas vinculan la modificación del hidropериодо en la afectación de estos ecosistemas, los efectos del cambio climático también son mencionados dentro de las causas naturales cuando se hace referencia al aumento en el nivel del mar.

Flores Verdugo et al. (2007) mencionaron en su investigación sobre “La topografía y el hidropериодо” que la frecuencia y el periodo de inundación son factores determinantes para la ausencia o presencia de manglares, y las diferentes especies de mangle tienen distintas preferencias de inundación. Un ejemplo de lo anterior, es el proporcionado por Zaldívar, Herrera, Teutli, Hernández & Caamal (2010, p.138-139) en su descripción de los manglares de Yucatán, en la que menciona que en esta entidad federativa existen manglares con escenarios húmedo y seco: los manglares con escenario húmedo, están sujetos a un régimen hidrológico que combina la acción de la marea y la descarga del agua subterránea, cuya vegetación está denominada por mangle rojo y blanco; mientras que, los manglares con escenario seco, se caracterizan porque la inundación y los

aportes de agua están fuertemente influenciados por la estacionalidad de la precipitación, de manera que sus sedimentos son hipersalinos y con baja concentración de nutrientes, dando una vegetación dominada por mangle negro.

En Quintana Roo y Yucatán, México, las carreteras y terracerías interrumpen el flujo del agua en los manglares, alterando la tasa de recambio y la salinidad de las aguas que bañan los sistemas radicales, con lo que se provoca la mortalidad de grandes extensiones de manglar (Trejo et al., 1993).

Agraz Hernández (2006) menciona en su investigación realizada en el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, Cancún, Quintana Roo, que el efecto del huracán Wilma conjuntamente con las actividades antropogénicas, dañaron el manglar que se encuentra presente en esta área afectando la hidrología debido al asolvamiento que impide el correcto flujo del agua. Esta autora reportó en su informe final sobre el Diagnóstico ambiental del ecosistema de manglar en el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, que este sistema se encontraba bajo condiciones totalmente precarias, debido a la acumulación del impacto antropogénico que se ha venido ejerciendo con el tiempo sobre el humedal que lo bordea y el efecto del huracán Wilma al alterar el patrón hidrológico y la defoliación total de los árboles.

Hirales et al. (2010), realizaron un estudio sobre la tasa y los agentes de deforestación del manglar en las localidades de Mahahual e Xcalak, en el sur de Quintana Roo. Para determinar los agentes que afectan la deforestación de este ecosistema realizaron entrevistas a habitantes de los sitios mencionados. La interrupción del flujo de agua fue mencionada como uno de los factores de disturbio a este tipo de ambiente costero.

JUSTIFICACIÓN

Los manglares son sitios ecológica, económica y socialmente relevantes debido a que prestan servicios ambientales de provisión (comida, agua, madera), de regulación (como la de clima, control de inundaciones), culturales (ambientes de estéticos, recreativos y educativos) y de soporte (formación de suelos) (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005). Por lo tanto, el aprovechamiento sustentable de los mismos debe ser considerado una prioridad para la población cuyas viviendas se encuentren en zonas cercanas al manglar o bien, para la población que depende, de alguna manera, de ellos; sin embargo, para que tal aprovechamiento pueda llevarse a cabo, es indispensable, que se conozcan los factores que limitan su desarrollo y cuáles pueden ser las posibles amenazas que enfrentan estos ecosistemas.

De acuerdo con la CONABIO, la Región Península de Yucatán (integrada por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán) posee el 55% de los manglares del país, de acuerdo a la cuantificación realizada en el año 2005. De este porcentaje, Quintana Roo representa un 16.9% del mismo, es decir, esta entidad federativa cuenta con 129 921 hectáreas de manglar, de las 770 057 ha que posee la república mexicana. No obstante, a pesar de su representatividad e importancia, los estudios realizados referentes al hidroperiodo de este ecosistema en la región son escasos. Los manglares constituyen ecosistemas altamente especializados que mueren bruscamente cuando uno de los parámetros de su entorno se modifica, es por eso que en las costas tropicales son los primeros en detectar las variaciones del régimen hídrico por pequeñas que éstas sean (Blasco, 1991).

Considerando que la información con respecto al ecosistema de manglar en Quintana Roo es limitada, y teniendo presente, que es de mayor importancia el conocimiento de los factores que regulan su desarrollo para poder sentar una base en la toma de decisiones ante los posibles escenarios del cambio climático, se proponen los siguientes objetivos a alcanzar en este trabajo de Tesis.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Analizar la relación entre el hidroperiodo del ecosistema de manglar y el incremento de la temperatura, en la región Mahahual y su área circundante, identificando potenciales factores climáticos que afectan el desarrollo del ecosistema.

Objetivos específicos:

Caracterizar el hidroperiodo de los manglares de Mahahual y su área circundante.

Estimar el comportamiento de la temperatura y la salinidad como respuesta de las variaciones en el nivel de agua.

Advertir la capacidad de adaptación de los manglares ante los eventos del cambio climático.

Generar información confiable que permita una mejor comprensión sobre la situación actual del ecosistema de manglar en el área de estudio.

METODOLOGÍA

Área de estudio.

Mahahual se localiza en el Mar Caribe en la zona costera de la región sur de Quintana Roo; es una localidad del municipio de Othón P. Blanco, a una latitud de $18^{\circ} 42' 58''$ N y una longitud de $87^{\circ} 42' 26''$, con una temperatura media anual de 28.1°C y una precipitación media anual de entre 1 200 y 1 500 mm (Estación Climatológica Mahahual, Comisión Nacional del Agua, 2000, en Datlabuit, Cisneros & Valenzuela, 2007, p.78). Es una región plana, a cinco metros por encima del nivel del mar y pertenece a la provincia fisiográfica Costa Baja de Quintana Roo. La cobertura vegetal corresponde a selvas, sabanas, zonas de manglar, dunas costeras y zonas perturbadas (Datlabuit et al., 2007). De acuerdo con los datos publicados en el Censo de Población y Vivienda 2010, la localidad de Mahahual cuenta con 920 habitantes. Las actividades económicas que principalmente se desarrollan son la pesca, el turismo y el comercio (Datlabuit et al., 2007, p.83).

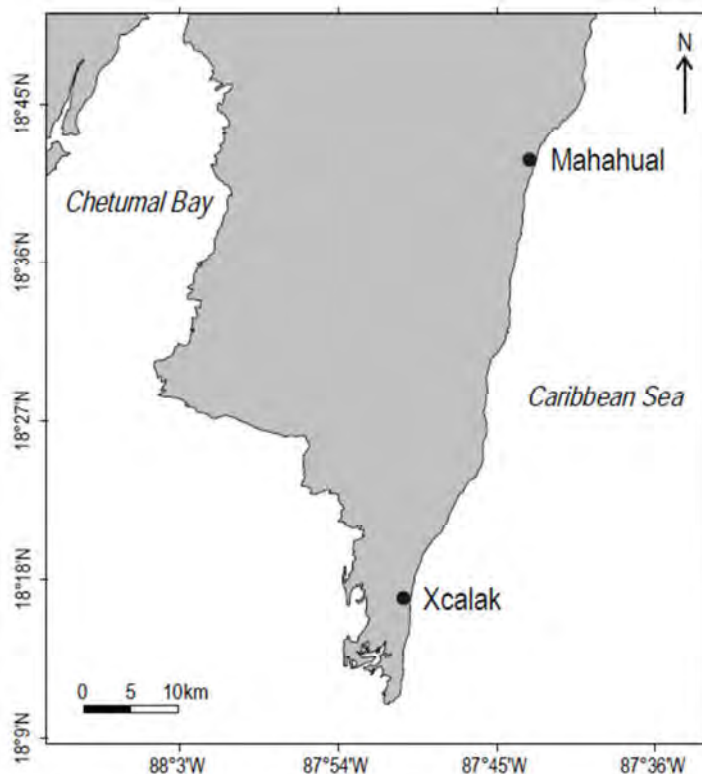


Figura 2. Ubicación geográfica de Mahahual (Hilares Cota, Espinoza Ávalos, Schmook, Ruiz Luna, & Ramos Reyes, 2010).

En esta localidad, se identificaron tres sitios de muestreo (figura 3): Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3. El sitio Mahahual 1 se encuentra en la línea de costa y se caracteriza por presentar aportes continuos de agua dulce propiciados por el Río Bermejo. En éste el agua fluye superficialmente durante la época de lluvias. Derivado de lo anterior, este sitio puede verse afectado directamente por incrementos en el nivel del mar. Los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3, se encuentran perpendiculares a la costa, y se localizan en una planicie inundable con predominancia de mangle chaparro, donde el único aporte de agua proviene de las precipitaciones pluviales, es decir, en estos sitios no hay contacto con las mareas marinas (Torres & Ruíz, 2011).

Uno de los criterios de inclusión para seleccionar los sitios de muestreo fue que se tuvieran representadas tanto la línea de costa como las condiciones tierra adentro. En la costa, se eligió un sitio (Mahahual 1) que tuviera influencia constante de agua marina y dulce, lo anterior con el propósito de conocer la dinámica del hidroperiodo en este lugar. Los sitios tierra adentro, denominados Mahahual 2 (a 8 km de la costa) y Mahahual 3 (a

36 km de la costa), se seleccionaron con la intención de representar diferentes tipos de vegetación y de condiciones biofísicas y de composición y funcionamiento del ecosistema a medida que se aleja de la costa. Todos los sitios seleccionados presentan poco impacto humano evidente (Torres & Ruíz, 2010). Lo anterior debido a que Mahahual no ha sido explotado como polo turístico y la infraestructura turística existente es mínima comparada con otros destinos como Cancún. Mahahual 1 es el único sitio que se encuentra inmerso directamente dentro de esta comunidad aunque su ubicación está relativamente distante de donde ocurre la actividad turística. Mahahual 2 y Mahahual 3 se encuentran aledaños a la carretera Mahahual-Cafetal y por ende a la localidad de Mahahual, por lo tanto, la vía de comunicación mencionada es el único impacto antrópico en estos sitios.



Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo.

Hidroperiodo.

Para conocer el hidroperiodo del área de estudio se utilizaron datos obtenidos de registradores automáticos localizados en los tres puntos de muestreo (figura 3), los cuales registran datos de nivel, conductividad y temperatura del agua, por hora. Es decir, se obtuvieron 24 registros horarios por día, durante el periodo de análisis, que abarca los meses de enero de 2010 a agosto de 2012.

Debido a que los registradores automáticos se encuentran en los puntos de monitoreo, se requirió de un dispositivo (“leveloader”) que permitiera recuperar esos datos para que posteriormente fueran transferidos a la computadora. Con base en los datos recopilados, se dispuso de una serie de tiempo donde la unidad de observación es el día.

Para describir el comportamiento de las variables se realizó un análisis descriptivo de las mismas considerando las siguientes medidas: promedio, desviación estándar, mínimo, percentil 40, percentil 60 y máximo, lo anterior con el fin de caracterizar el hidroperiodo y determinar cuál variable representaría al conjunto de datos.



Figura 4. Leveloader.

El análisis de series de tiempo se llevó a cabo ajustando modelos aditivos generalizados con regresión normal. Con los resultados de este modelo, se proporcionaron estimaciones del potencial impacto del incremento de la temperatura asociadas a un cambio en el nivel de agua, así como impactos asociados a la salinidad al variar el nivel de agua. Los dos modelos mencionados se eligieron de entre los posibles escenarios que pueden surgir al combinar las variables por ser los que tienen un sentido físico evidente y porque el objetivo de la tesis es estudiar el hidroperiodo, para lo cual, los escenarios a analizar son los relacionados con la variación en el nivel de agua, como variable explicativa y la temperatura y la salinidad como variables dependientes. Para la implementación del modelo, se empleó el software R (R Project for Statistical Computing), donde se utilizó la librería Ares.

Dada la potencial variabilidad en el nivel de agua y en las temperaturas debidas al cambio climático y ya reportadas por Instituciones que estudian este fenómeno (CONAGUA, INE, etc.), se decidió utilizar una variable como estrato: la *temporada*. Se ajustaron modelos para *temporada de secas*, para *temporada de lluvias* y para *temporada de nortes*. La división del año en tres temporadas, surgió de las temporadas establecidas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Aunado a la clasificación propuesta por esta institución, se decidió utilizar otra clasificación propuesta de manera empírica: los meses contemplados en cada temporada pueden notarse en la tabla siguiente.

Tabla 1. Meses contemplados en la clasificación de temporadas por CONAGUA y la propuesta empírica.

	SECAS	LLUVIAS	NORTES
PROPUESTA CONAGUA	Febrero Marzo Abril	Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre Noviembre	Diciembre Enero
PROPUESTA EMPÍRICA	Febrero Marzo Abril	Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre	Noviembre Diciembre Enero

Capacidad de adaptación.

La capacidad de adaptación de los manglares se analizó con base en información existente respecto de este tema y los resultados de los análisis. Para lo anterior, se realizó una consulta bibliográfica sobre las consecuencias de la elevación del nivel del mar, el incremento y disminución de las precipitaciones y la frecuencia e intensidad de las tormentas en el crecimiento y desarrollo de los manglares.

De igual manera, una vez analizadas las posibles consecuencias que se podrían presentar por los escenarios potenciales, dados los resultados de nuestro análisis para estimar el comportamiento del hidropereodo, se espera contar con información útil y novedosa que pueda ser utilizada como instrumento de planeación a considerar en futuros proyectos, sean de investigación o de desarrollo de la zona.

Conversión de conductividad a salinidad.

Ciertos valores dendrométricos de los manglares (por ejemplo, límites de tolerancia de crecimiento) están dados en unidades de salinidad, por tal motivo, se realizó una conversión de conductividad a salinidad, de esta manera los datos pueden ser comparados con lo reportado en la bibliografía.

La conversión de conductividad a salinidad se realizó mediante el algoritmo de *salinidad práctica* propuesto por la UNESCO en 1978 (UNESCO, 1984). Para lo anterior, se requirieron datos de temperatura y conductividad, valores que fueron proporcionados por el sensor instalado en los sitios de muestreo. Si bien el algoritmo propuesto por la UNESCO es para agua de mar, se utilizó debido a que existe un factor de corrección que

permite adecuar el algoritmo para salinidades más bajas. El factor de corrección es el siguiente (Millero, 1984):

$$a_0 = \frac{0.0080(r + r^2)}{[1 + (r + r^2)]}; r = \frac{R_{15}}{0.0032}$$

Donde a_0 es un valor constante igual a 0.0080 en la ecuación de salinidad práctica propuesta por la UNESCO en 1978 y R_{15} es la razón de la conductividad del agua de mar, a una temperatura de 15 °C, a la conductividad del agua de mar de salinidad práctica 35 a la misma temperatura (ambas a una presión de una atmósfera patrón), $R_{15} = 1.00$ (UNESCO, 1984).

Asimismo se consideró el siguiente criterio para la elección del algoritmo: si errores de ± 0.04 en salinidad pueden ser tolerados, la Escala de Salinidad Práctica puede ser utilizada para sistemas estuarinos sin un conocimiento detallado de la composición iónica (Millero, 1984).

RESULTADOS

Para realizar los análisis tanto descriptivos como de ajuste de los modelos, se requirió de un “representante” diario de los datos, pues se tenían 24 datos por día. Para generarlo, se obtuvieron las distribuciones por variable, y por sitio de muestreo, analizando el promedio diario, la mediana y los percentiles 40° y 60° de cada una. Dado que no se observó variación significativa entre estos estadísticos y para un ajuste práctico de los modelos, se determinó utilizar el *promedio diario*. Las variables registradas fueron temperatura (°C), nivel de agua (m) y, salinidad (ups).

Al conformar la serie de tiempo se consideraron *días efectivos* y *NO efectivos*. Para que un día sea considerado como *efectivo*, se especificó como criterio contar con al menos el 75% de los registros diarios. Por el contrario, para considerar un día como *NO efectivo*, se siguió un criterio de exclusión del 25%, es decir, que si una cuarta parte de los datos (6 de los 24 datos por día) o bien no se registraron, o bien, mantenían diferencias significativas con el resto, entonces este día era considerado como *NO efectivo*, y por tanto excluido del análisis.

En la tabla 2, se muestran las fechas por año y por sitio que cuentan con datos horarios. En esta tabla puede observarse que durante el 2012, para Mahahual 2 no se tienen datos registrados, lo anterior debido a una falla del registrador presente en este sitio de muestreo.

Tabla 2. Periodo anual con fechas de inicio y finalización que cuentan con registros por sitio de muestreo.

	2010	2011	2012
Mahahual 1	19/01 – 31/12	01/01 – 14/01 02/07 – 31/12	01/01 – 08/04
Mahahual 2	19/01 – 31/12	01/01 – 14/01 09/03 – 17/12	No hay datos
Mahahual 3	20/01 – 31/12	01/01 – 14/01 09/03 – 31/12	01/01 – 07/04

En la tabla 3 se muestra el número de días de muestreo en el periodo 2010-2012, así como el número de días *efectivos* y *NO efectivos* en la serie de datos.

Tabla 3. Días efectivos y no efectivos para el periodo 2010-2012.

	Días efectivos	Días no efectivos	Total
Mahahual 1	643	0	643
Mahahual 2	620	25	645
Mahahual 3	745	11	756

Derivado de la tabla 3 se puede notar que el sitio que más datos presenta es Mahahual 3, posteriormente le sigue Mahahual 2 y finalmente Mahahual 1, aunque Mahahual 1 fue el único sitio al cual no se hizo necesaria la aplicación del criterio de exclusión debido a que todos los datos mantenían cierta coherencia entre sí.

Tabla 4. Valores descriptivos de los tres sitios de muestreo para todo el periodo de análisis, 2010 - 2012.

	Promedio	DS [*]	Mínimo	P40 ^{&}	P60 ^{&}	Máximo
Temperatura(°C)						
MHH 1 [‡]	27.00	1.92	22.10	26.07	27.97	30.30
MHH 2 [‡]	26.99	2.01	22.59	26.17	27.59	31.20
MHH 3 [‡]	26.73	1.72	23.23	26.11	27.33	29.89
Nivel (m)						
MHH 1	1.66	0.23	-1.75	1.62	1.70	2.08
MHH 2	1.31	0.17	0.83	1.26	1.34	1.62
MHH 3	1.65	0.43	0.79	1.56	1.73	2.43
Salinidad (ups[#])						
MHH 1	0.03	0.002	0.02	0.03	0.03	0.03
MHH 2	3.13	0.56	2.01	2.93	3.16	4.42
MHH 3	8.41	0.49	6.91	8.16	8.25	9.35

*DS representa la desviación estándar.

& P40 y P60 representan los percentiles 40° y 60° de la distribución.

‡ MHH1, MHH2, MHH3 son abreviaturas de los sitios de muestreo Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3, respectivamente.

#UPS es la abreviatura de unidades prácticas de salinidad. El promedio de salinidad en el océano es de 34.7 ups (Pontificia Universidad Católica de Chile, 1999).

La tabla 4 contiene los promedios aritméticos, desviación estándar (DS), mínimo, máximo y percentiles 40° y 60° relativos al periodo 2010-2012, por variable. Se observa que la *temperatura* no varía de manera significativa entre el mínimo y el máximo valor registrado durante los tres años, aunque puede señalarse que el sitio más caluroso es Mahahual 2. Contrario a lo manifestado por la temperatura, el *nivel de agua* presenta valores contrastantes, especialmente para Mahahual 1, debido al valor negativo (-1.75 m) que se obtiene como mínimo para este sitio. Mahahual 3 es el sitio que presenta una mayor inundación (2.43 m) y Mahahual 2, presenta niveles relativamente constantes en el periodo en cuestión. Con respecto a la *salinidad*, puede observarse un incremento desde la costa hacia tierra adentro. Por lo tanto, el sitio con una mayor salinidad es Mahahual 3. Mahahual 1 presenta valores estables de salinidad, ya que entre su mínimo y máximo existe sólo una diferencia de 0.01 ups.

En la figura 5 se muestran los valores promedio por año (2010, 2011, 2012) y por sitio para la temperatura, así como la desviación estándar.

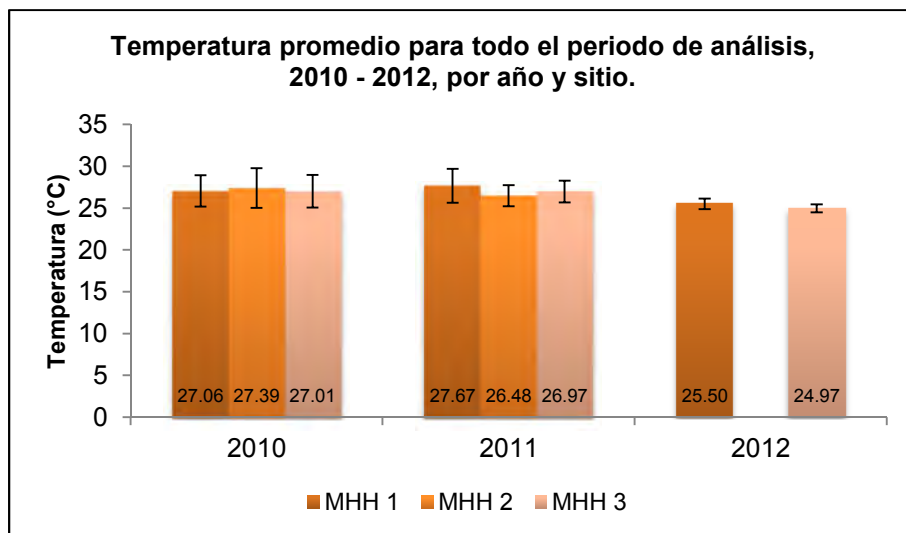


Figura 5. Temperatura promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

De la figura 5 se puede observar que el año más caluroso, para Mahahual 1 fue el 2011, mientras que para Mahahual 2 y Mahahual 3 esto ocurrió durante el 2010. Este mismo patrón se observa con respecto a la variación de los registros térmicos.

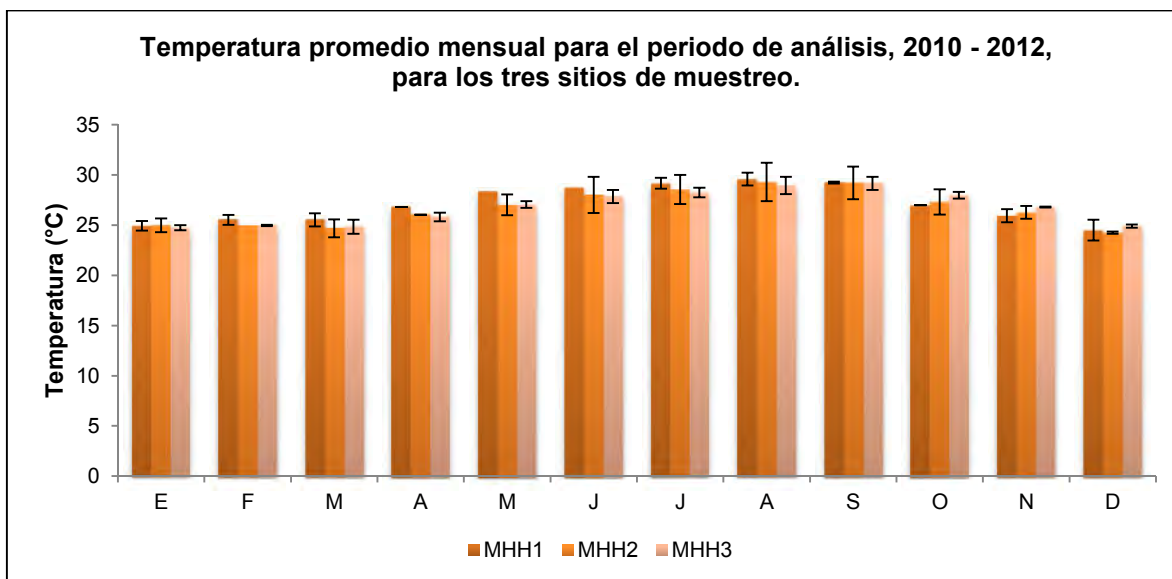


Figura 6. Temperatura promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 - 2012, para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

La figura 6 muestra la *temperatura promedio mensual* para el periodo de análisis, representando a los meses por su letra inicial, de la observación de esta figura se puede mencionar que agosto y septiembre son los meses más cálidos, aunque el incremento de temperatura puede observarse desde mayo. Diciembre es el mes con los valores térmicos más bajos, exceptuando al sitio Mahahual 3.

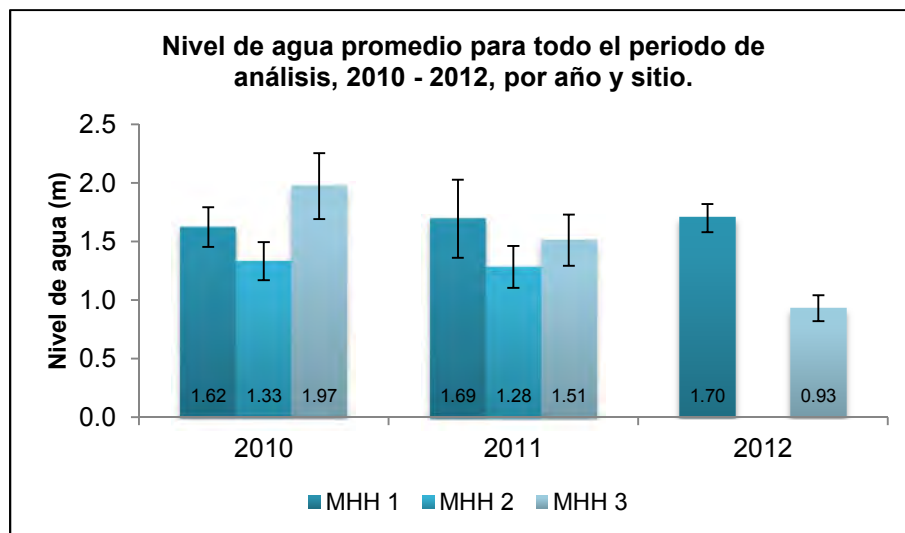


Figura 7. Nivel de agua promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En relación al *nivel promedio de agua* (figura 7), Mahahual 2 y Mahahual 3 presentaron una mayor inundación, durante el 2010, mientras que Mahahual 1 ha presentado una mayor superficie inundada durante el año 2012. El máximo registrado (2.08 m) para Mahahual 1 ocurrió en 2011, mientras que para Mahahual 2 (1.62 m) y Mahahual 3 (2.43 m) ocurrió en el 2010. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), durante octubre de 2011, Q. Roo fue el 3^{er} estado con una mayor cantidad de lluvias a nivel nacional, hecho que puede relacionarse con una mayor inundación en Mahahual 1, ya que fue en este mes en el cual ocurrió el mayor valor hídrico registrado para este sitio. La máxima variación de los valores de inundación sucede durante el 2011 para Mahahual 1 y Mahahual 2, y durante el 2010 para Mahahual 3. El 2011 fue un año contrastante para el país, debido a la presencia de “La Niña” y a una fase negativa del PDO (Oscilación Decadal del Pacífico), de acuerdo con el Reporte del Clima Anual 2011 presentado por el SMN, durante el primer trimestre del 2011 se registraron lluvias por frentes fríos y durante el tercero, se presentó la canícula¹, lo anterior puede estar ligado a los mayores datos de desviación estándar encontrados en ese año para Mahahual 1 y Mahahual 2. En relación a los mínimos valores alcanzados, los sitios Mahahual 1 y Mahahual 2 los registran en el 2011, mientras que Mahahual 3 en el 2012. Sin embargo, Mahahual 1 presenta un valor negativo (-1.75m), lo cual sugiere una temporada de sequía debida probablemente a que enero 2011 es considerado el doceavo enero más seco desde 1941 y a que se registraron anomalías negativas en las precipitaciones pluviales en todo el país, exceptuando a ciertos estados del Golfo de México.

¹ Canícula. Periodo del año en que se registran las más altas temperaturas (DEM).

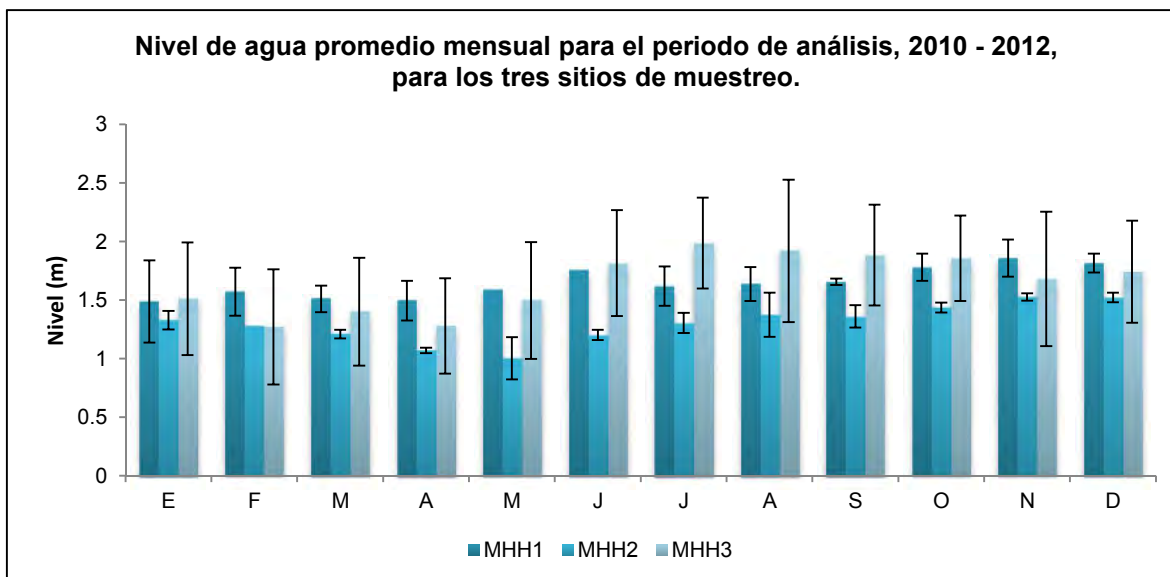


Figura 8. Nivel de agua promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 - 2012, para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

Con respecto a los valores promedios mensuales de *nivel de agua* (figura 8), puede notarse cómo existe variación entre los tres sitios de muestreo. Mahahual 2 es el sitio que presenta una menor inundación con respecto a los sitios Mahahual 1 y Mahahual 3. Durante el periodo 2010 – 2012, julio ha representado el mes con un mayor nivel de agua para Mahahual 3 y noviembre para Mahahual 1 y Mahahual 2.

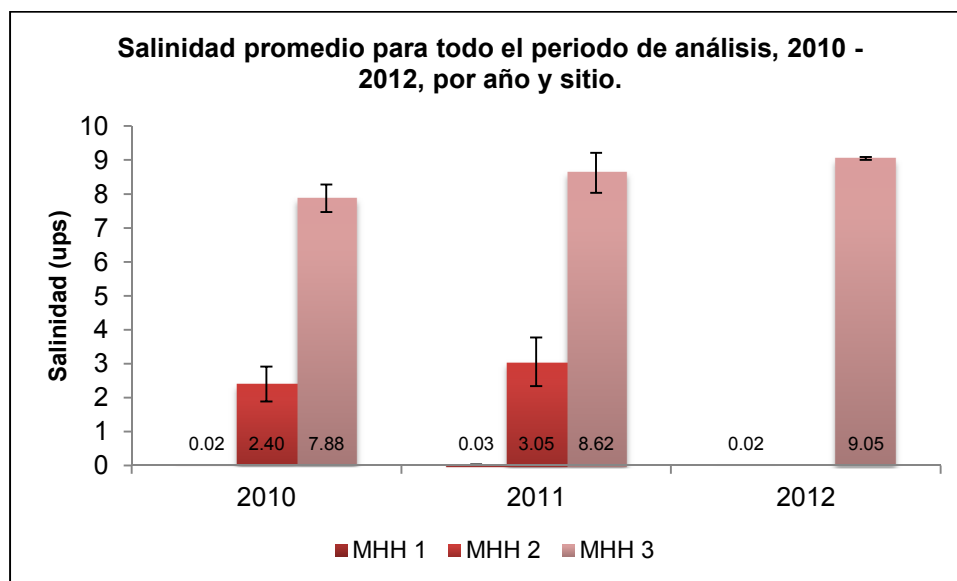


Figura 9. Salinidad promedio para todo el periodo de análisis, 2010 – 2012, por año y sitio.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En lo relativo a la *salinidad* (figura 9), puede observarse un incremento considerable de la costa hacia tierra adentro. Es importante mencionar que los valores obtenidos para Mahahual 1 son tan bajos (centésimos) que por la escala de la figura 9 no pueden observarse. De igual manera cabe recordar, que debido a una falla en el sensor ubicado en el sitio Mahahual 2, no existen datos de este sitio para el 2012. El 2011 fue el año que presentó los mayores valores en los sitios Mahahual 1 y Mahahual 2, sin embargo lo anterior no ocurre para Mahahual 3 que lo presenta en el 2012. La máxima dispersión de los datos ocurre para los tres sitios de muestreo en el 2011.

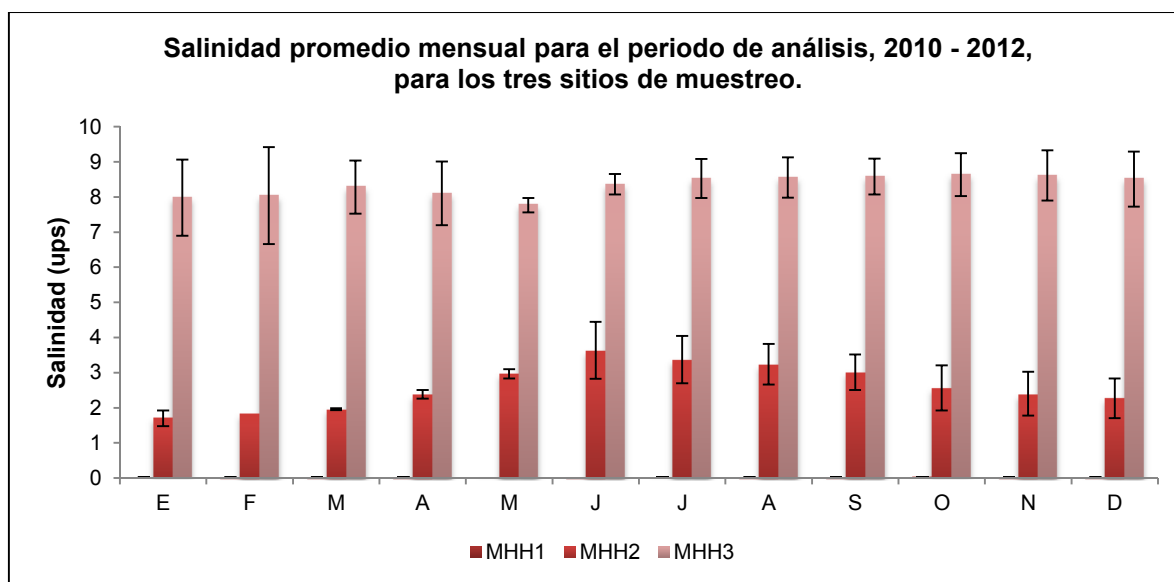


Figura 10. Salinidad promedio mensual para el periodo de análisis, 2010 - 2012, para los tres sitios de muestreo. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

La figura 10 presenta el valor promedio mensual de la *salinidad* para el periodo de estudio, en esta imagen se hace más evidente las diferencias de salinidad existentes entre el sitio ubicado en la costa de la localidad de Mahahual y los dos ubicados en la carretera conducente a Mahahual. El sitio Mahahual 1 no presenta diferencias significativas entre meses para el valor de salinidad, todos oscilan alrededor de 0.02 ups, para Mahahual 2 puede notarse cómo los valores van incrementando desde principios a mediados de año, teniendo un máximo valor para junio y una disminución progresiva para los meses siguientes, es decir, existe un incremento en la salinidad durante el primer semestre del año y un decremento de la misma para el segundo semestre del año. En lo concerniente a Mahahual 3, los valores fluctúan entre 7.5 y 8.6 ups, observándose los mayores registros para la segunda mitad del año.

Las gráficas con valores promedios mensuales por año y por sitio, para las tres variables de interés pueden observarse en la sección de Anexos.

Las figuras 11, 12 y 13 presentan el valor promedio y la desviación estándar de los datos para la *temporada de secas*, la *temporada de lluvias* y la *temporada de nortes* durante el periodo de análisis. Para el establecimiento de las temporadas, se siguió la clasificación

proporcionada por CONAGUA, la cual comprende para la *temporada de secas*, los meses de febrero a abril; para la *temporada de lluvias*, de mayo a noviembre; y, para la *temporada de nortes*, diciembre y enero. La *temporada de lluvias* se tiene para los años 2010 y 2011, mientras que la de *temporada de secas* y la *temporada de nortes* abarcan los tres años analizados en este trabajo.

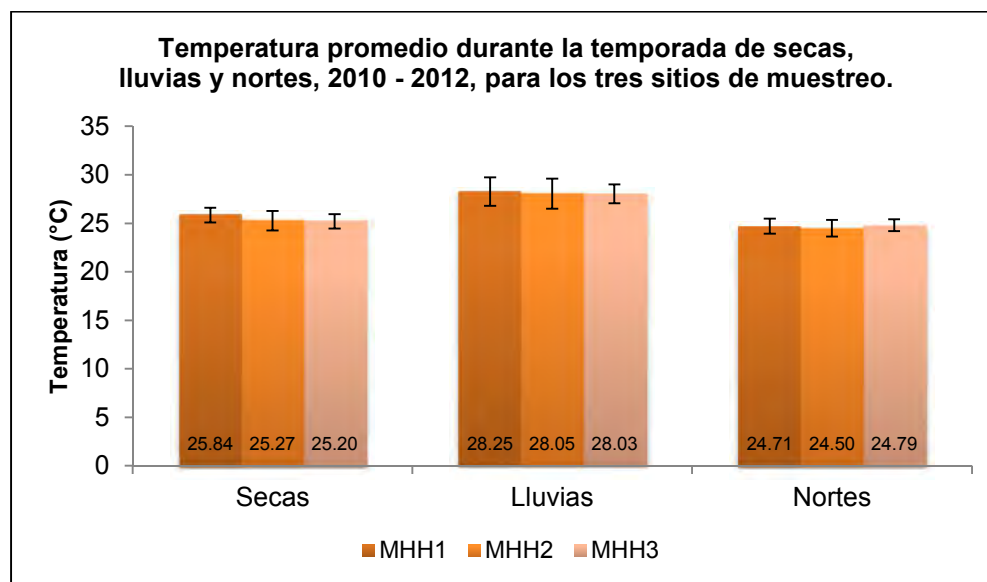


Figura 11. Temperatura promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

De la figura 11, puede notarse que los tres sitios tienen un comportamiento similar dentro de una misma temporada, por ejemplo, durante la *temporada de nortes* el comportamiento de la temperatura es parecido entre los tres sitios, al igual que durante la *temporada de lluvias*. De manera general, durante la *temporada de lluvias* se presentan los mayores registros térmicos y durante la *temporada de nortes*, los menores. Aunque la diferencia es mínima, en la *temporada de secas* y *lluvias*, existe un decremento térmico de la costa hacia tierra adentro, es decir, en promedio los mayores registros los presenta Mahahual 1, que para la *temporada de lluvias* fue de 28.25 °C. Las mayores variaciones térmicas suceden durante la *temporada de lluvias*.

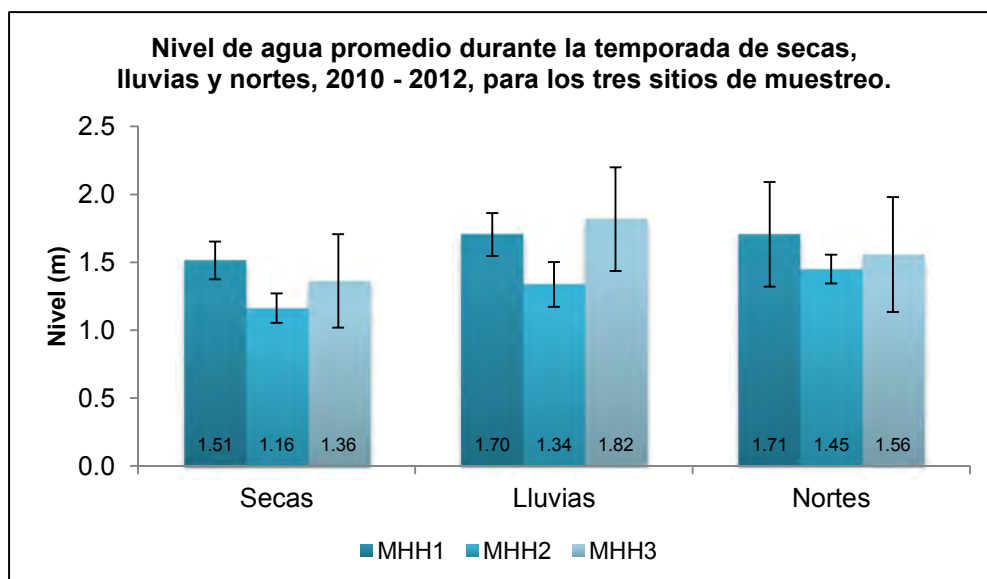


Figura 12. Nivel de agua promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En relación al *nivel de agua* (figura 12), puede observarse que el comportamiento es semejante durante la *temporada de secas* y la *temporada de nortes*, siendo Mahahual 1 el sitio con una mayor superficie inundada y Mahahual 2, el menor. Sin embargo, durante la *temporada de lluvias*, el mayor nivel ocurre para Mahahual 3 mientras que Mahahual 2 mantiene su lugar como el sitio con los registros menores de nivel de agua. Los máximos valores de nivel registrados ocurrieron durante la *temporada de lluvias*, para los tres sitios. En cuanto a los valores mínimos registrados, estos se dieron en diferentes temporadas, en Mahahual 1 (-1.75 m) ocurrió durante la temporada de nortes; para Mahahual 2 (0.83 m), en la *temporada de lluvias*; y, para Mahahual 3 (0.79 m), durante la *temporada de secas*. De manera general, existe una mayor variación en los datos, en el sitio Mahahual 3.

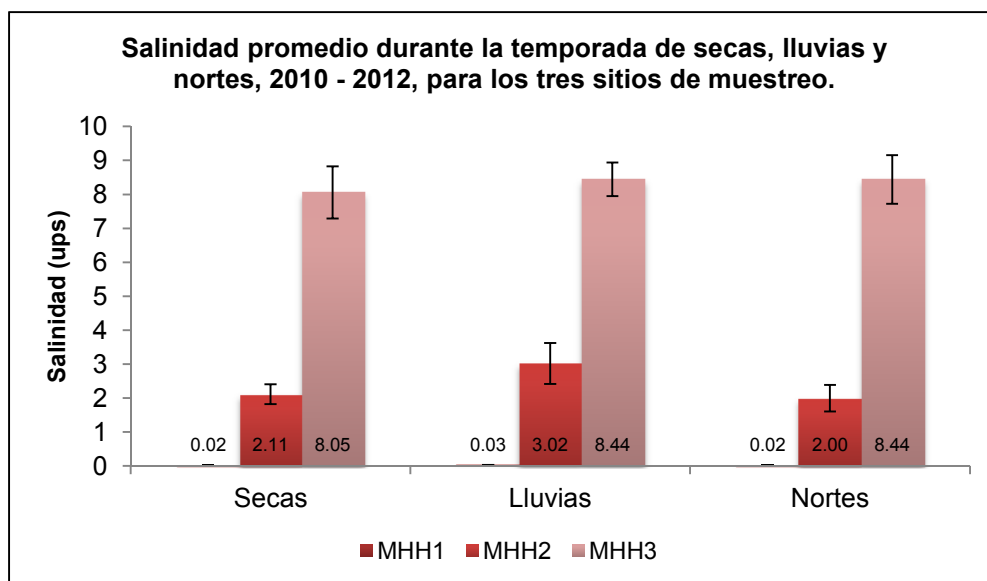


Figura 13. Salinidad promedio durante la temporada de secas, lluvias y nortes, 2010 – 2012, para los tres sitios de muestreo. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En relación a la *salinidad* (figura 13), se hace evidente el incremento de ésta al alejarse de la costa, independientemente de la temporada. Como ya se había mencionado, los valores de salinidad se mantienen relativamente constantes para Mahahual 1, sin embargo, para los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3, puede notarse cierto patrón entre los valores mínimos y máximos de esta variables. Para ambos sitios, los menores registros ocurren durante la *temporada de nortes* y los mayores en la *temporada de lluvias*.

A continuación se muestran las gráficas de series de tiempo para los tres parámetros, por sitio durante el periodo 2010-2012.

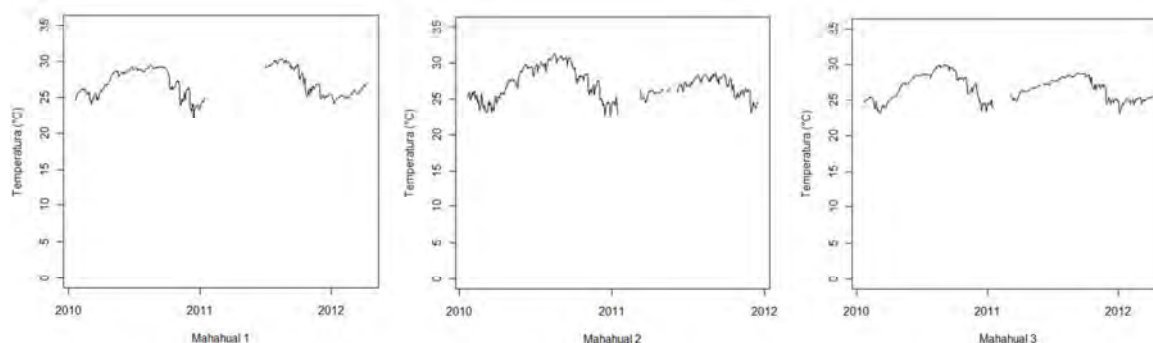


Figura 14. Serie de tiempo de temperatura para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.

De las series de tiempo para *temperatura* (figura 14) en los tres sitios se observa que los valores oscilan entre los 20 y 30 °C, como es de esperarse las temperaturas son más bajas empezando y terminando el año (invierno) y más altas para primavera y verano, asimismo las gráficas si bien no son idénticas, son similares, es decir, la temperatura tiene un comportamiento análogo en los tres sitios de muestreo.

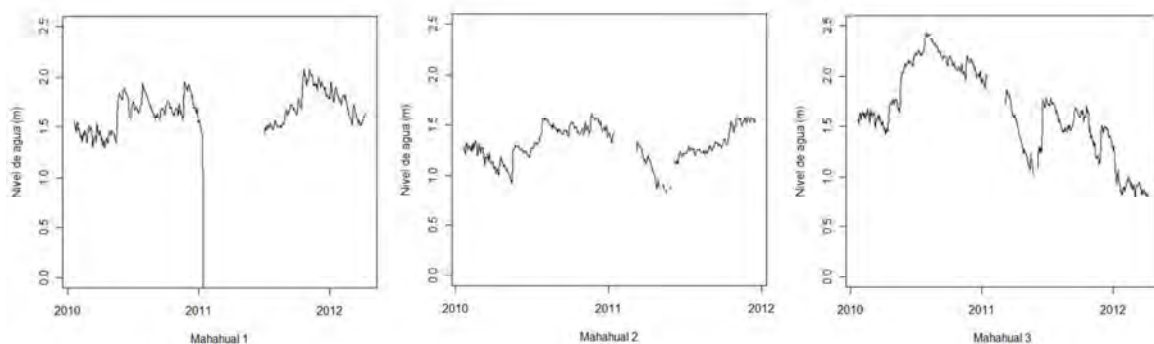


Figura 15. Serie de tiempo de nivel de agua para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.

Con respecto al *nivel de agua* (figura 15), los tres sitios presentan gráficas distintas. En Mahahual 1, el nivel mantiene cierta estabilidad (los datos no varían significativamente entre sí) exceptuando por un valor muy bajo a principios del 2011. Los tres sitios de muestreo presentan cierta tendencia a disminuir el *nivel de agua* en los primeros meses del año y un mayor nivel a mediados y fin de año. Mahahual 3 es el sitio donde ocurre una mayor contrastación de los datos, ya que los valores varían desde menores a 1 m hasta mayores a 2 m. Al igual que en Mahahual 2, se nota que la inundación es menor al iniciar el año (*temporadas de secas y nortes*) y mayor en el intermedio y fin de ese mismo año. Particularmente, la figura 15, para Mahahual 3, nos muestra la forma en que gradualmente el nivel de inundación ha ido disminuyendo con el paso del tiempo, pues no se presenta un nivel similar a principios del 2010 que a principios del 2012.

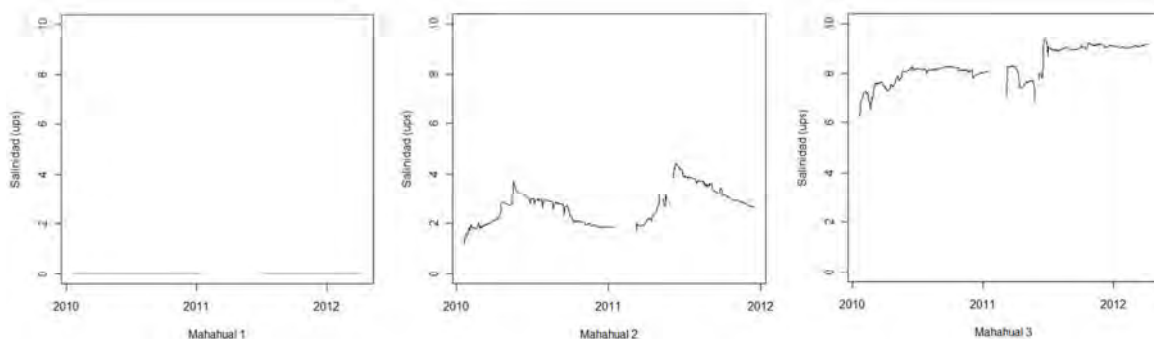
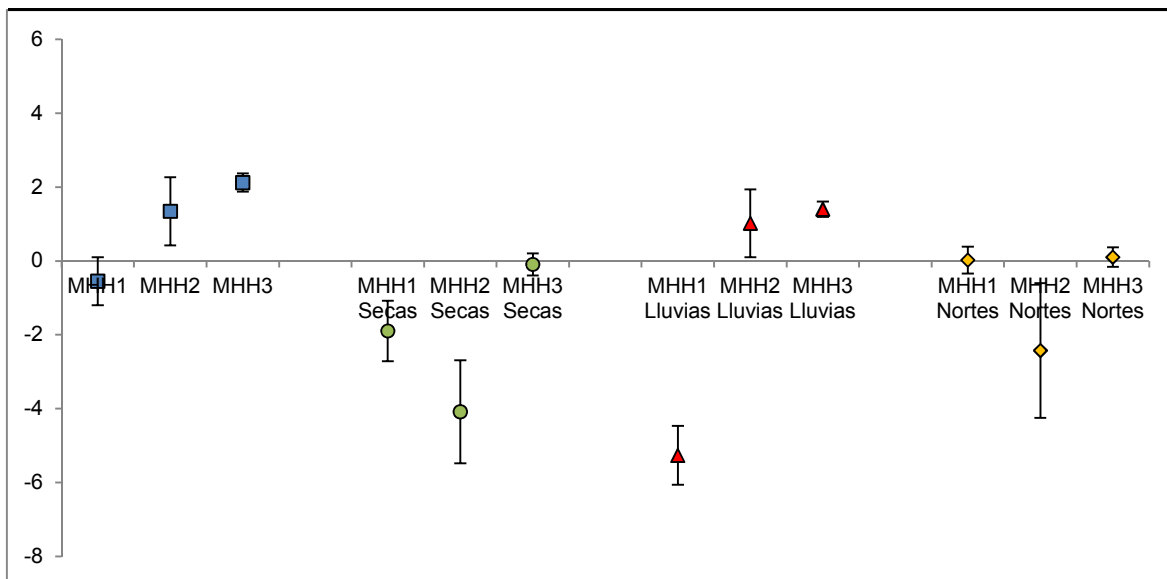


Figura 16. Serie de tiempo de salinidad para los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.

En relación a la *salinidad*, las gráficas muestran lo contrastante que son los valores de la costa y los distantes a ella. Se puede notar en Mahahual 1 que la conductividad se representa muy al margen del cero, en Mahahual 2, estos valores ya son más altos y en Mahahual 3 ya son superiores a los otros dos sitios. Al igual que con la *temperatura* y la *conductividad*, se sigue el mismo patrón de disminución de los valores al final e inicio del año.

A continuación se presentan las gráficas resultantes del ajuste de modelos aditivos generalizados a partir de los datos obtenidos en el periodo de análisis. Los puntos señalados en las gráficas representan las estimaciones generadas por los modelos y se añade el intervalo de confianza del 95%. Se realizaron dos gráficas por modelo, una para la clasificación propuesta por CONAGUA, y otra para la propuesta empírica mencionada en la metodología (ver tabla 1).

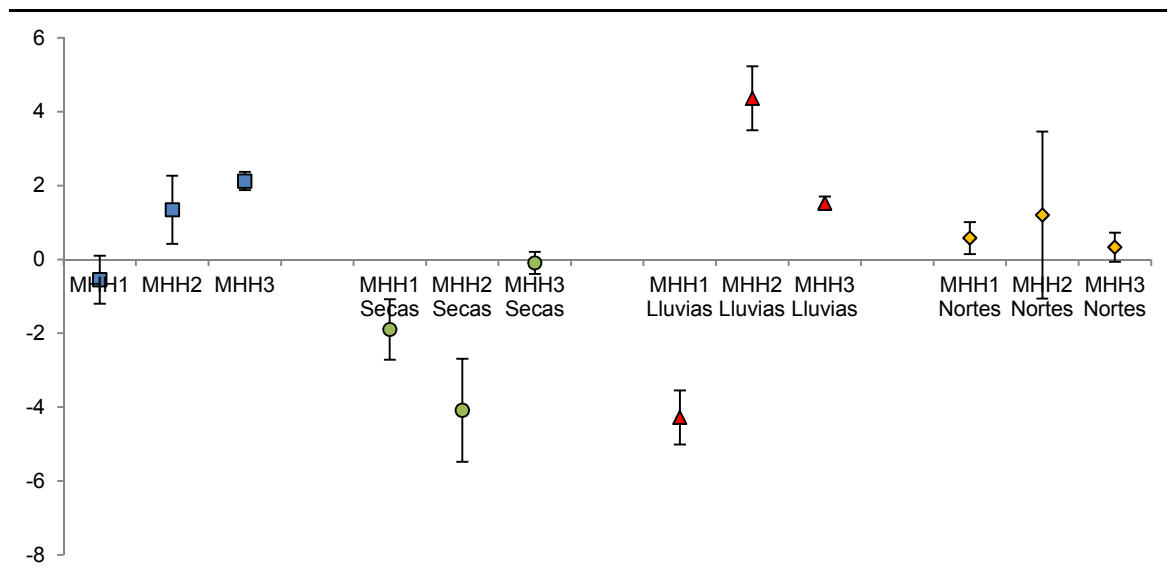
Figura 17. Estimación* de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 - 2012). CONAGUA.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En la figura 17, pueden observarse los impactos de la variación de temperatura esperados asociados a una variación en el nivel de agua, de acuerdo con la clasificación de temporadas propuesta por CONAGUA. Aunado a una variación en el nivel, puede esperarse una disminución térmica en Mahahual 1 y un incremento de temperatura en los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3, siendo Mahahual 3 el sitio donde puede esperarse un aumento de hasta 2 °C asociado a una elevación en el nivel de agua. Los impactos más severos pueden esperarse durante la *temporada de secas* para Mahahual 2, con un decremento de hasta 4 °C; y, durante la *temporada de lluvias*, para Mahahual 1, con una disminución de aproximadamente 5 °C. Puede notarse, que los impactos térmicos asociados a una variación en el nivel son de disminución en los valores de los mismos. El sitio Mahahual 3, es el que presentaría una menor alteración térmica, si se analiza por temporadas. La *temporada de nortes*, es en la que se pueden esperar impactos nulos para los sitios Mahahual 1 y Mahahual 3, si se mantienen las condiciones bajo las cuales fueron recabados los datos.

Figura 18. Estimación* de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 - 2012). Propuesta empírica.



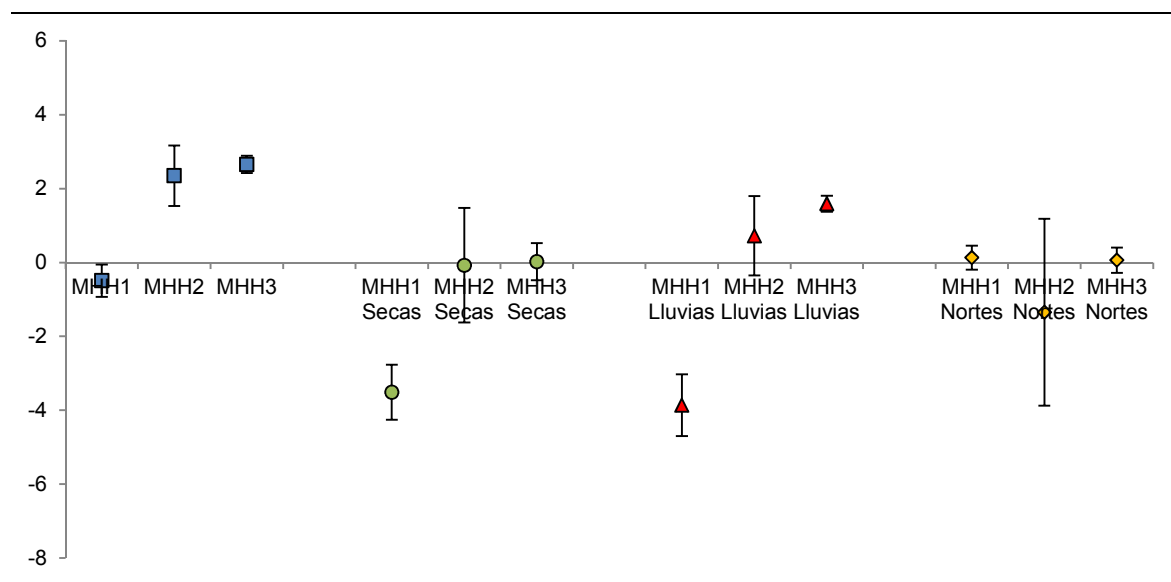
*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

En la figura 18 se pueden observar los impactos de la variación de temperatura esperados asociados a una variación en el nivel de agua, de acuerdo a la propuesta empírica de clasificación de temporadas. Los impactos esperados, de acuerdo al análisis para el periodo 2010 – 2012, son los mismos que los descritos para la figura 17. Los impactos en variación de la temperatura más intensos pueden esperarse para Mahahual 2 durante la *temporada de secas* y para Mahahual 1 y Mahahual 2, durante la *temporada de lluvias*. Puede notarse que en Mahahual 2, podrían suceder los mayores impactos térmicos, asociados a una variación en el nivel de agua, ya que durante la *temporada de secas*, puede esperarse un decremento de 4 °C, y durante la *temporada de lluvias* un incremento de 4 °C, es decir, hasta 8 °C de diferencia entre una temporada y otra. Durante la *temporada de nortes*, pueden preverse los menores impactos (de 1 °C o menos) para los tres sitios de muestreo, sin embargo, debido a que el intervalo del nivel de confianza intersecta al eje “x” se dice que estos impactos son no significativos, como se puede observar para Mahahual 2 y Mahahual 3 en esta temporada.

De la comparación de la figura 17 con la figura 18, puede notarse que de acuerdo a la clasificación de CONAGUA, los impactos durante la *temporada de lluvias* serían mayores para Mahahual 1 y menores para Mahahual 2 y Mahahual 3. Para la *temporada de nortes*, los impactos en la temperatura tienden a disminuir en la clasificación propuesta por CONAGUA y a incrementarse, si se sigue la propuesta empírica. Los impactos térmicos mencionados son los que pueden esperarse asociados a una variación en el nivel de agua.

A continuación se presentan las gráficas del mismo escenario planteado anteriormente pero ajustando el modelo a una segunda variable: salinidad, es decir, el modelo resultante será el de la estimación de la variación de la temperatura por unidad de variación en el nivel de agua ajustando por salinidad.

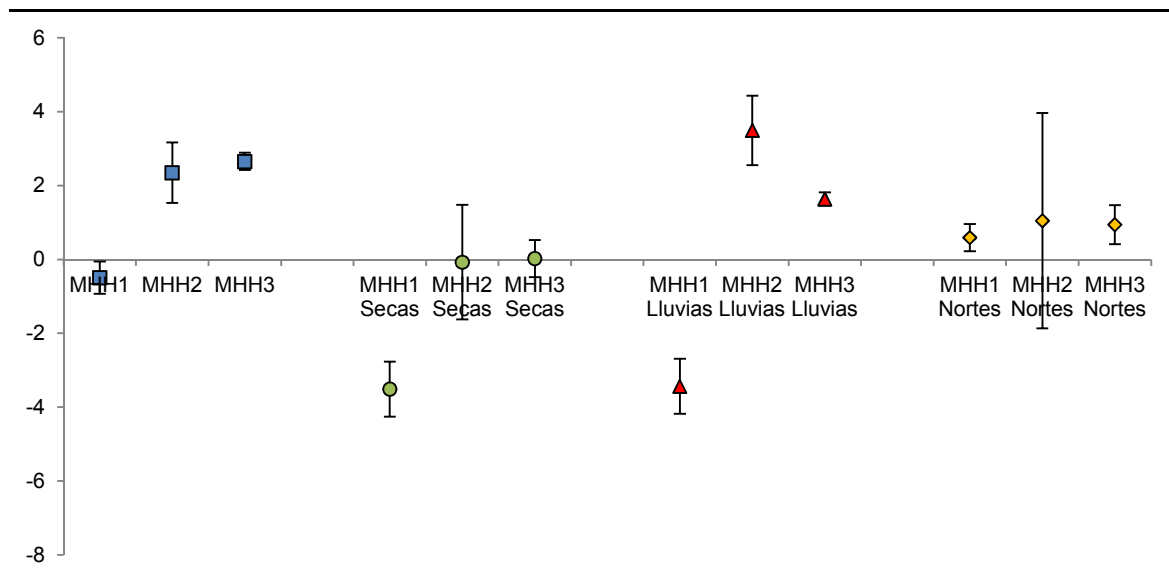
Figura 19. Estimación* de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por salinidad, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 - 2012). CONAGUA.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

Los impactos de temperatura asociados a una variación en el nivel de agua en presencia de la salinidad son menos significativos que los mencionados en la figura 17, en la *temporada de secas* y la *temporada de lluvias*, Mahahual 1 es el que presenta un impacto significativo con un decremento de 4 °C; en Mahahual 3 puede esperarse un ascenso de 2 °C durante la *temporada de lluvias*; en Mahahual 2, no se presenta algún impacto significativo en alguna de las tres temporadas. Durante la *temporada de nortes*, no se espera impacto térmico alguno asociado a una variación en el nivel de agua, ajustando por salinidad.

Figura 20. Estimación* de la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por salinidad, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 - 2012). Propuesta empírica.

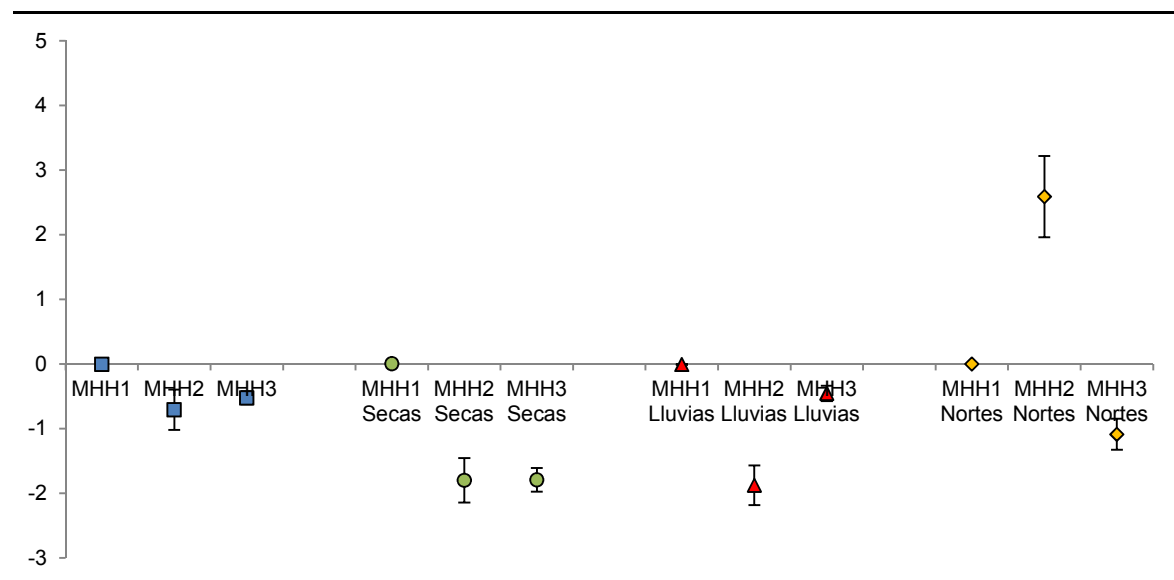


*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

De acuerdo con la propuesta empírica (clasificación de temporadas), la variación de temperatura por unidad de variación en el nivel, ajustando por salinidad, la *temporada de lluvias* es la que presenta impactos más significativos para los tres sitios, Mahahual 2 sería el sitio en el que pueden esperarse mayores variaciones térmicas. La *temporada de secas* es la que presenta impactos no significativos para los sitios, exceptuando a Mahahual 1. Mahahual 2 es el sitio que presenta menos impactos significativos durante las temporadas así como una mayor amplitud en los límites del nivel de confianza, como puede observarse durante la *temporada de nortes*.

De manera general, ajustando los modelos por una segunda variable, los impactos incrementan en magnitud si se analiza todo el periodo de análisis, ejemplo de ello son los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3 cuyos impactos en los registros térmicos esperados asociados a una elevación en el nivel de agua, incrementarían más de 2 °C, mientras que si se ajusta el modelo con una sola variable los impactos en la variación de la temperatura para estos sitios, para el mismo periodo, serían menores o iguales a 2 °C. Contrario a esto, en el análisis por temporada, los impactos disminuyen en magnitud, si son ajustados por salinidad. De acuerdo con la clasificación de temporadas realizada por CONAGUA, al ajustar por una segunda variable, el 50% de los impactos no son significativos, mientras que si se considera la propuesta empírica sólo el 25% no lo es. Para el caso del ajuste de los modelos con una variable, el 33.33% de los impactos son no significativos con ambas clasificaciones. Una observación pertinente, es que Mahahual 1 posee un impacto significativo si el modelo de variación de temperatura por unidad de variación de nivel se ajusta por salinidad.

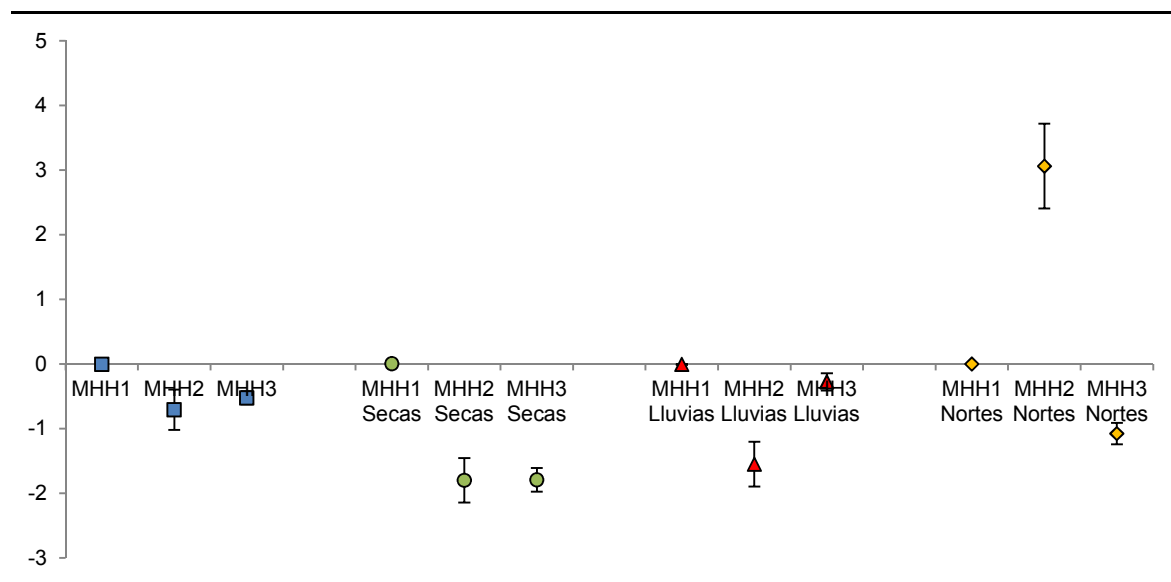
Figura 21. Estimación* de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

La variación de salinidad por unidad de variación en el nivel de agua tiene asociados impactos mayormente negativos para los sitios de muestreo. Como ha podido señalarse con anterioridad, Mahahual 1 presenta valores muy bajos de salinidad (ceranos a cero), debido a esto, no se prevén impactos significativos para este sitio, por lo que el análisis recaerá sobre Mahahual 2 y Mahahual 3. Nuevamente, Mahahual 2 es el sitio en el cual pueden esperarse los mayores impactos, durante las tres temporadas, con un decremento de alrededor de 2 ups durante la *temporada de secas* y la *temporada de lluvias* y un aumento de casi 3 ups en la temporada de nortes. Para Mahahual 3 existe una tendencia al descenso de la salinidad en las tres temporadas de análisis, siendo éste mayor durante la *temporada de secas*. También es conveniente recalcar que todos los impactos esperados para Mahahual 2 y Mahahual 3 son significativos.

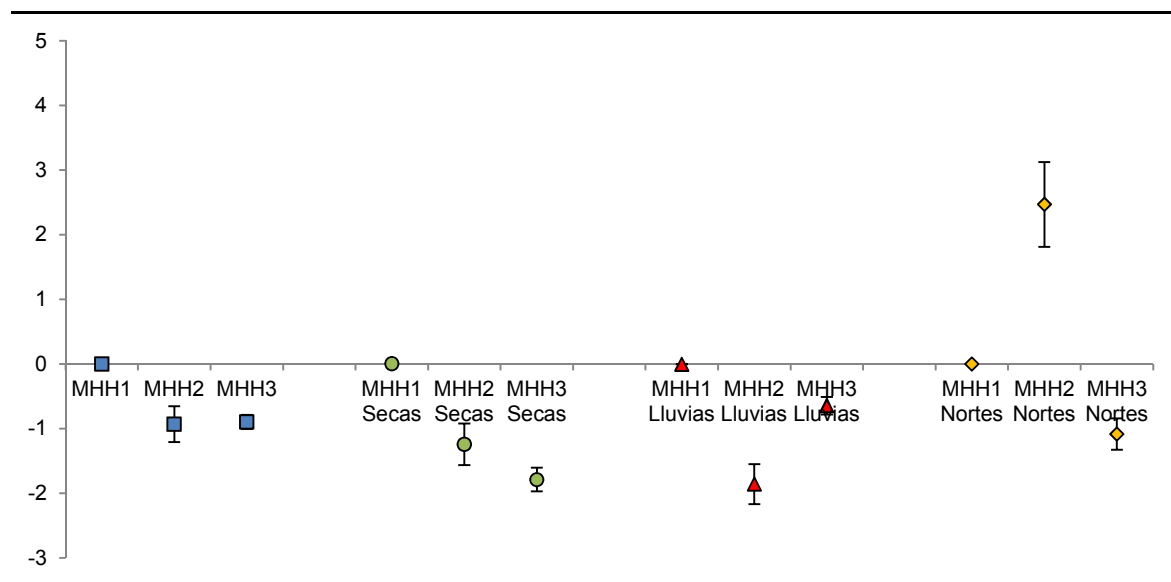
Figura 22. Estimación* de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

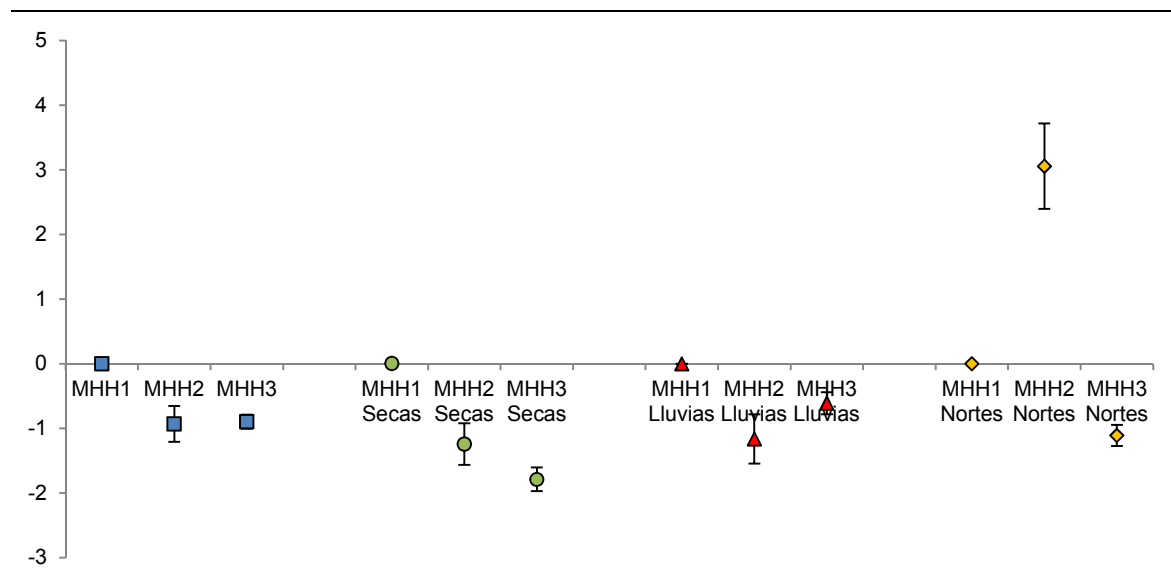
Los impactos esperados para la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua obtenidos de acuerdo con la propuesta empírica (figura 22), son análogos a los obtenidos por la propuesta de CONAGUA, por lo tanto lo descrito para la figura 21 es aplicable a la figura 22, la única diferencia radica en que la magnitud de los impactos es ligeramente mayor en la estimación realizada por la propuesta empírica.

Figura 23. Estimación* de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por temperatura, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). CONAGUA.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

Figura 24. Estimación* de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, ajustando por temperatura, en los tres sitios de muestreo, estratificado por temporada (secas, lluvias y nortes), para todo el periodo de análisis (2010 – 2012). Propuesta empírica.



*Estimaciones e intervalo de confianza del 95% por unidad de variación en el nivel de agua, utilizando modelos aditivos generalizados. MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

Las figuras 23 y 24, representan la estimación de la variación de la salinidad por unidad de variación en el nivel de agua en presencia de la temperatura, para la clasificación realizada por CONAGUA y la propuesta empírica, respectivamente. En ambas figuras

puede notarse que en Mahahual 3 se intensifica la magnitud del posible impacto (2 ups) durante la *temporada de secas*. Sin embargo, los impactos esperados son similares a los presentados en los modelos ajustados únicamente con la variación en el nivel de agua.

DISCUSIÓN

Es importante mencionar que el periodo contemplado para este trabajo inicialmente, de enero 2010 a agosto 2012, no pudo completarse para los tres sitios debido a fallas en los sensores en los sitios de muestreo, por tal motivo los datos se tienen para el periodo enero 2010 – abril 2012, para los sitios Mahahual 1 y Mahahual 3, y de enero 2010 – diciembre 2011 para Mahahual 2, debido al mismo problema ocurrido en los sitios anteriores. A pesar de ello, el periodo de dos años que se tiene de datos diarios es suficiente para obtener estimaciones confiables con los modelos, esto no quiere decir que los métodos de estimación sean robustos.

Como se observó en las secciones previas, se manejaron dos estratificaciones “por temporada”: La propuesta de CONAGUA y la propuesta EMPÍRICA. En esta sección, cuando se haga referencia a los resultados “por temporada” se entenderá que es de acuerdo a la clasificación propuesta por CONAGUA, ya que con base en ésta se realizaron gráficas de nivel de agua, temperatura y salinidad, presentadas previamente. Cuando se desee referir los resultados obtenidos con la propuesta empírica, se mencionará en el texto, lo cual sucederá cuando se analicen los resultados de los modelos.

Para caracterizar el hidroperiodo (patrón de nivel de agua) de los sitios de muestreo Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3, se recurre a las componentes que definen al hidroperiodo: duración (tiempo que permanece la inundación), frecuencia (número de veces que se inunda en un tiempo dado), profundidad alcanzada y época de inundación (Moreno & Infante, 2009, p.13).

Tabla 5. Caracterización del hidroperiodo de los sitios de muestreo Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3.

	Mahahual 1	Mahahual 2	Mahahual 3
Duración	13-19 meses	9-11 meses	12-17 meses
Frecuencia	32 veces cada 3 años	28 veces cada 3 años	30 veces cada 3 años
Profundidad* (m)	0.23 (0.08, 0.38)	0.21 (0.07, 0.35)	0.27 (0.14, 0.40)
Época	Lluvias/nortes	Lluvias/nortes	Lluvias/nortes

*Profundidad promedio expresada en metros y desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos a partir de la base de datos del proyecto.

Los datos presentados en la tabla 5, para caracterizar el hidroperiodo de los sitios de muestreo, únicamente corresponden al periodo 2010-2012, debido a lo anterior, estos resultados pueden variar conforme la cantidad de datos incrementa con el transcurso del tiempo.

Con base en la tabla 5 se observa que el hidroperiodo de los sitios de muestreo corresponde a suelos hidromorfos inundados continuamente con aguas someras. Mahahual 1 permanece inundado entre 13 y 19 meses, la capa de agua alcanza una profundidad promedio de 23 cm, y las mayores inundaciones ocurren durante la *temporada de lluvias* y *temporada de nortes*, particularmente durante la *temporada de lluvias*. Mahahual 2 se mantiene inundado en un periodo menor al año, y la inundación

alcanza un nivel promedio de 21 cm, la época de mayor nivel de agua corresponde a la *temporada de lluvias* y la *temporada de nortes*, aunque la frecuencia es mayor durante la *temporada de lluvias*. Mahahual 3 tiene un periodo de inundación entre 12 y 17 meses, cuyo nivel de agua alcanza una profundidad promedio de 27 cm, la mayor inundación ocurre durante la *temporada de lluvias* y la *temporada de nortes*. Si bien Mahahual 1, se ubica como el sitio en el que la inundación es más prolongada, Mahahual 3 es el sitio donde se alcanza la mayor inundación. Durante las *temporadas de secas y nortes*, el sitio que presenta una mayor inundación es Mahahual 1, mientras que durante la *temporada de lluvias* Mahahual 3 se presenta como el sitio con un mayor nivel de agua. De acuerdo con Torres & Ruíz (2011) lo anterior es debido al poco drenaje que posee el suelo de este sitio (Mahahual 3), lo que provoca que el agua que cae por precipitación pluvial se acumule y por lo tanto, el nivel de inundación sea mayor que en los otros dos sitios de muestreo. Mahahual 2 es el sitio que presentó una menor profundidad de inundación, independientemente de la temporada. De acuerdo con la figura 25, en la cual se muestran las secciones hidrogeológicas de la región Costa Maya y en donde se tienen ubicados los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3 (puntos rojos), puede observarse que en Mahahual 2 existe un flujo subterráneo constante hacia la costa, hecho que puede estar ligado a que en este sitio se presenten los menores registros en el nivel de agua.

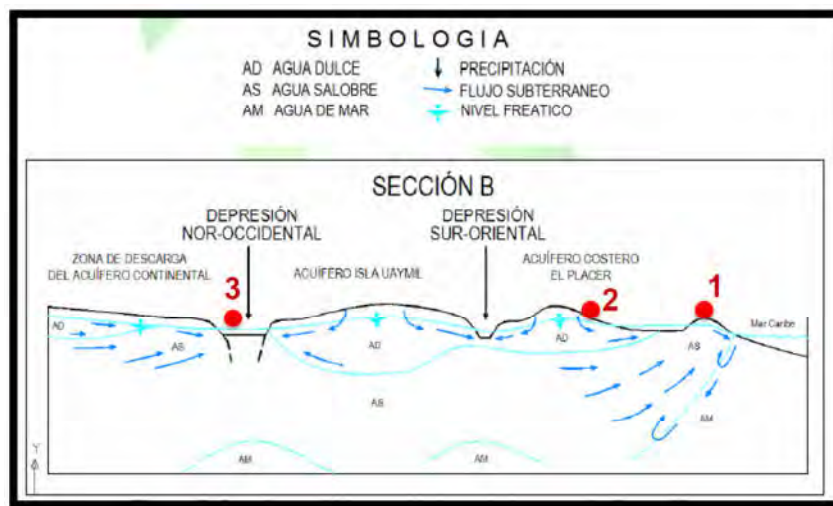


Figura 25. Secciones hidrogeológicas de la región Costa Maya (Torres Lara, Ruíz Ramírez, & Miranda Soberanis, 2011).

Respecto a los datos se observó en Mahahual 1 un registro mínimo de -1.75 m (el día 14 de enero de 2011), lo que significaría que ese día no hubo una columna de agua sobre el sensor, es decir, que el nivel de agua estuvo 1.75 m por debajo del mismo. Un posible motivo de este dato considerado como atípico es una falla en el sensor durante este día y el anterior, ya que los registros por hora en ese día y en el anterior mostraron una disminución progresiva de entre 10 cm y 20 cm por hora; y si bien pudo considerarse excluir este día del análisis, esto no sucedió debido a que entre los datos existe cierta coherencia dado al decremento mencionado. Una argumentación más sólida respecto a la posible falla del sensor es la siguiente: mensualmente se llevan a cabo visitas físicas a los sitios de muestreo, donde se miden algunos parámetros físicos como nivel de agua

superficial y salinidad. El día en el cual se presentó el mencionado registro mínimo se llevó a cabo la visita física y en ésta se registró un nivel de agua positivo, lo cual discrepa con lo reportado por el sensor (-1.75 m), lo que apoya aún más la hipótesis de la falla en el mismo.

Debido a que el nivel de agua es un factor clave para caracterizar el hidroperiodo de los sitios de muestreo, entonces las inundaciones ocasionadas por fenómenos hidrometeorológicos como las tormentas y huracanes, comunes en esta área de estudio, pueden modificar temporalmente estos registros de nivel de agua. Durante el periodo de captación de datos, específicamente en septiembre de 2010, la tormenta tropical Karl impactó el área de estudio. Karl tocó tierra el 15 de septiembre de 2010, al analizar las bases de datos se nota que efectivamente hubo un incremento en el nivel de agua del día 14 al 15 de septiembre de ese año, el cual continuó aumentando por un par de días, sin embargo los registros no fueron los de mayor magnitud durante el año, por lo tanto, la presencia de este fenómeno no provocó una alteración significativa en los registros de nivel de agua. En contraste, otro elemento que puede afectar considerablemente el nivel de agua, pero de forma negativa y por un periodo de tiempo prolongado, es la sequía. De acuerdo, con los datos obtenidos en las visitas físicas mensuales realizadas a los sitios de muestreo el segundo trimestre del año 2011 fue el más seco, dentro del periodo de estudio. Como ya se había mencionado, de acuerdo con el SMN el 2011 se caracterizó por ser el 13^{er} año con menos lluvias desde 1941. En el trimestre abril-mayo-junio casi la totalidad del estado de Quintana Roo transitó de la categoría “anormalmente seco” a “sequía severa”, este dato es importante porque dos de estos tres meses correspondientes al segundo trimestre corresponden a la temporada de lluvias.

Si se habla de que los sitios de muestreo se encuentran permanentemente inundados, cabe preguntarse cuáles son los afluentes y efluentes de los mismos, se puede hablar entonces del presupuesto hídrico de los sitios de muestreo. Moreno & Infante (2009, p.12) definen el presupuesto de un humedal como la cantidad de agua que éste tiene; el presupuesto del humedal habla de los tipos de entradas de agua y de dónde provienen, así como de las salidas de agua. Para que el humedal se conserve debe mantener un equilibrio o balance entre la cantidad de agua que entra y sale (figura 26).

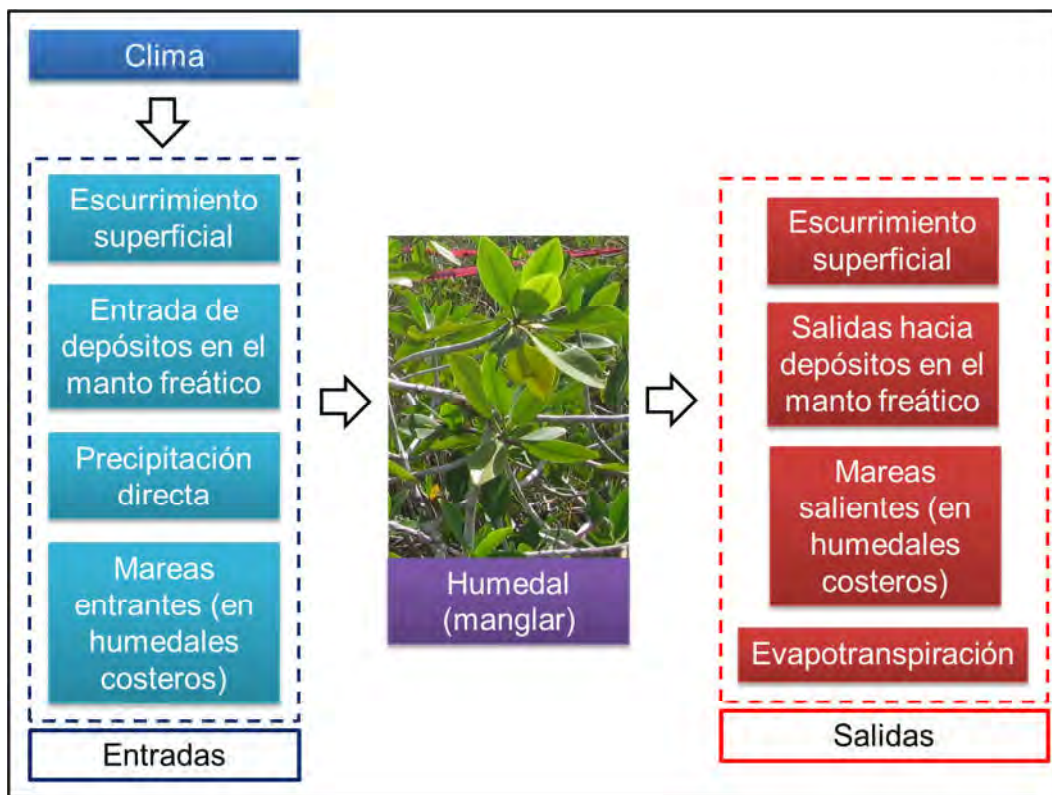


Figura 26. Presupuesto de un humedal. Modificado de (Moreno Casasola & Infante Mata, 2009)

En la figura 26 puede observarse un diagrama general del presupuesto de agua de un humedal. Para este trabajo que refiere a ecosistemas de manglar en los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3, el presupuesto de agua es específico para cada sitio y no necesariamente tiene que presentar todos los elementos incluidos en el diagrama superior. De acuerdo con la figura 25, la figura 26, así como la información con la que se cuenta, se presentará un presupuesto hídrico potencial para cada uno de los sitios de muestreo. Este presupuesto representa una propuesta inicial condicionada a los datos que se recopilaban y a la búsqueda de información respecto al historial de las variables que conforman el hidropetio.

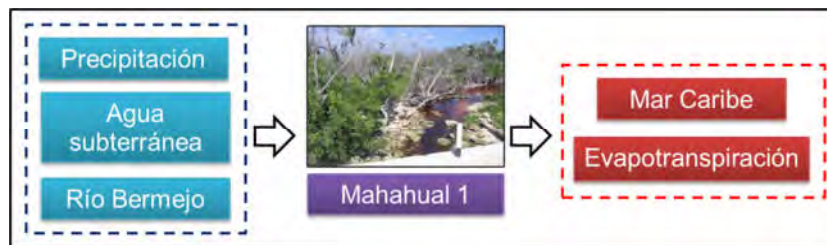


Figura 27. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 1.

En la figura 27 se muestra un presupuesto hídrico posible para Mahahual 1, sitio que se encuentra en la costa. Este sitio tiene tres principales entradas de agua: precipitación pluvial, agua subterránea y aporte por parte del río Bermejo (cuya aportación de agua es

considerable en la época de lluvias). El efluente de este sitio es el Mar Caribe pero también existe una pérdida de agua por evapotranspiración.

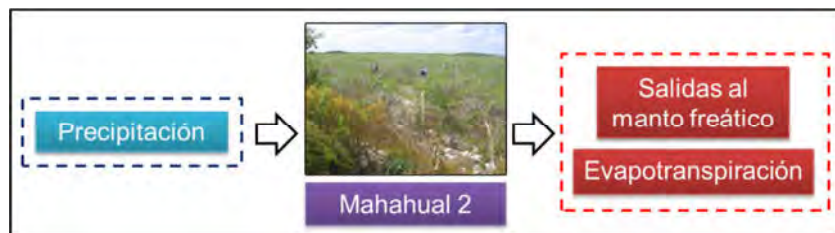


Figura 28. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 2.

La figura 28 representa un potencial presupuesto hídrico para el sitio Mahahual 2, ubicado a 8 km de la costa. En éste puede notarse, que la única entrada de agua es a través de la precipitación, por lo que el agua aportada por la lluvia juega un papel importante. La pérdida de agua ocurre por dos vías: la incorporación de agua al flujo subterráneo, como puede verse en la figura 25 y por evapotranspiración.



Figura 29. Presupuesto de agua para el sitio Mahahual 3.

La figura 29 muestra un panorama de lo que podría ser el presupuesto hídrico del sitio Mahahual 3, que se encuentra a 36 km de la costa. La precipitación y los flujos de agua subterránea constituyen las entradas de agua para este sitio. La evapotranspiración es la única vía de expulsión hídrica, por lo tanto puede decirse que Mahahual 3 es un sitio endorreico. De acuerdo con Torres Lara (2013) Mahahual 3, es en promedio, el sitio más inundado, lo cual se debe en gran parte a: 1) que cuenta con un suelo arcilloso que impide que el agua se infiltre por abajo, y 2) que el sitio es una cuenca (tiene forma de "cazuela"), mostrado en la figura 25, lo cual sugiere que el agua no sale ni por un lado ni por el otro, sino por abajo, difícilmente por la arcilla (comunicación personal).

De acuerdo con los posibles presupuestos hídricos presentados para cada uno de los sitios de muestreo es posible entender las fluctuaciones en el nivel de agua en estos, sin embargo, en el futuro podrían hacerse presupuestos con mayor precisión si se contara con datos volumétricos de los afluentes y efluentes así como con investigaciones de hidrología subterránea, presupuestos que concreten balances hídricos reales y precisos para la zona.

Ya se ha mencionado sobre el hidroperiodo y el presupuesto hídrico de los sitios de muestreo, pero puede surgir la interrogante natural de qué tan semejantes o diferentes

son con respecto a otros ecosistemas de manglar. Tomemos los manglares del estado de Yucatán para tener una idea de ello. Zaldívar et al. (2010) mencionan que en Yucatán pueden presentarse dos escenarios de manglar: húmedo o seco, en el escenario húmedo el régimen hidrológico está determinado por la acción de las mareas y la descarga del agua subterránea; mientras que en el escenario seco, la inundación y los aportes de agua dulce están fuertemente influenciados por la estacionalidad de la precipitación. Conforme a lo anterior, podemos notar, que la caracterización del régimen hídrico entre los manglares del estado de Yucatán y de los sitios de muestreo (Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3), existe cierta similitud, en cuanto a los aportes de agua, ya que la precipitación sobresale como la principal entrada de agua, sin embargo, también existen aportes de agua subterránea, que influyen en el nivel de inundación de los sitios.

Con respecto a los valores de salinidad, puede notarse que existe una mayor salinidad en los sitios que están tierra adentro comparados con los que se encuentran en la costa, lo anterior puede estar ocurriendo debido a que, en Mahahual 1 (situado en la costa), existe un afluente de agua dulce proporcionado por el río Bermejo, lo que ocasiona que la salinidad sea prácticamente nula. En los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3, se detectaron los mayores niveles de salinidad, de hecho, significativamente mayores respecto a Mahahual 1 (ver tabla 4). Esta discrepancia puede deberse a que son sistemas lénticos, es decir, que el agua superficial tiene poco movimiento, lo que ocasiona que las sales permanezcan en los sitios, especialmente si no existe un buen drenaje como sucede en Mahahual 3. En el análisis de la figura 13 se menciona que para los sitios Mahahual 2 y Mahahual 3 los menores registros de salinidad ocurren durante la temporada de nortes y los mayores durante la temporada de lluvias, lo anterior puede explicarse si se considera que durante la temporada de nortes, si bien existen lluvias, éstas a pesar de ser intensas no son frecuentes ni persistentes y las temperaturas son bajas comparadas con las de la mayor parte del año, de modo que el fenómeno de evaporación no es tan severo como podría serlo para la temporada de secas y lluvias. En lo relativo a los mayores registros de salinidad durante la temporada de lluvias, estos pueden deberse a la movilidad del sedimento por la acción de las lluvias, ocasionado que las partículas de sal sean liberadas del mismo, es decir, que se suspendan nuevamente.

Tabla 6. Clasificación de los cuerpos de agua según su salinidad.

Salinidad (‰*)	Tipo de agua
0.0 – 0.5	Agua dulce
0.5 – 3.0	Agua salobre oligohalina
3.0 – 10	Agua salobre mesohalina
10 – 17	Agua salobre polihalina
17 – 30	Agua de mar oligohalina
30 – 34	Agua de mar mesohalina
34 – 38	Agua de mar polihalina
38 – 150	Salmuera
> 150	Hipersalina

* (‰), partes por mil.

De acuerdo con los valores de salinidad encontrados y tomando como referencia la clasificación de cuerpos de agua en función del contenido de sales, presentado en la tabla 6 puede considerarse a Mahahual 1 como un cuerpo de agua dulce, Mahahual 2, de agua salobre oscilante entre oligohalina y mesohalina, y Mahahual 3, de agua salobre mesohalina.

El objetivo de este trabajo de tesis es analizar tanto el hidroperiodo como los posibles impactos del incremento de temperatura en el ecosistema de manglar de Mahahual representado por tres sitios de muestreo, para ello se ajustaron modelos aditivos generalizados (GAM). Los posibles impactos obtenidos a partir de la aplicación del modelo a los datos se analizaron de la siguiente manera: 1) para todo el periodo de análisis, 2) para la temporada de secas, 3) para la temporada de lluvias y, 4) para la temporada de nortes, de modo que puede notarse qué tanto puede variar una variable (temperatura o salinidad) con respecto a otra (nivel de agua) como resultado del análisis conjunto de todo los datos así como del análisis de los datos por temporada. Cabe recordar que los modelos fueron ajustados para todo el periodo (2010-2012) y por temporada, con base en dos propuestas: la de CONAGUA y la propuesta empírica, cuya diferencia radica en la contemplación del mes de noviembre como parte de la temporada de lluvias (CONAGUA) o como parte de la temporada de nortes (propuesta empírica).

Antes de iniciar con el análisis de los modelos es pertinente recordar, que el modelo con el cual se ajustaron los datos, es un modelo lineal de la forma:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it1} + \beta_2 x_{it2} + \dots + \beta_k x_{itk} + \epsilon_{it} \quad i = 1, \dots, n$$

Donde y_{it} es la variable dependiente (en este caso, temperatura o salinidad), β_k representa los parámetros desconocidos y es necesario estimarlos (impactos), k representa a las variables independientes, t es el subíndice para indicar el día (variable temporal), y ϵ_{it} , denota los errores o residuos del modelo (Carmona, 2003).

Para el análisis de los datos, se ajustaron modelos cuya variable dependiente se presentó en función de una o dos variables independientes. Para el primer caso, el modelo adopta la siguiente forma:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \epsilon_{it}$$

Para el segundo caso (dos variables independientes) el modelo es el siguiente:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \epsilon_{it}$$

Una vez señalado lo anterior, se puede entender que los impactos mostrados en las figuras 17 a 24 representan a β_1 o β_2 , dependiendo del número de variables independientes contempladas para el ajuste de los modelos GAM. El hecho de utilizar modelos aditivos generalizados (GAM), refiere al método de estimación de los impactos (β_1 o β_2), dado que se tiene una serie de datos, donde el tiempo es una variable de ajuste.

A continuación se presenta una tabla donde se resumen los resultados de los modelos.

Tabla 7. Estimación de las variaciones de temperatura y salinidad por unidad de variación en el nivel de agua, e intervalo de confianza del 95% para las estimaciones.

	Total (IC 95%)	Secas (IC 95%)	Lluvias (IC 95%)	Nortes (IC 95%)
CONAGUA				
<u>M. UNIVARIADO</u>				
Temperatura				
MHH 1	-0.55 (-1.20, 0.10)	-1.90 (-2.72, -1.08)	-5.26 (-6.06, -4.47)	0.02 (-0.34, 0.39)
MHH 2	1.34 (0.42, 2.26)	-4.09 (-5.48, -2.69)	1.02 (0.10, 1.94)	-2.43 (-4.25, -0.60)
MHH 3	2.12 (1.88, 2.37)	-0.10 (-0.39, 0.20)	1.4 (1.19, 1.61)	0.10 (-0.16, 0.37)
Salinidad				
MHH 1	-1.13E-04 (-1.0E-03, 8.1E-04)	4.57E-03 (3.2E-03, 6.0E-03)	-6.67E-03 (-8.0E-03, -5.3E-03)	-5.90E-04 (-1.5E-03, 3.5E-04)
MHH 2	-0.71 (-1.02, -0.39)	-1.80 (-2.14, -1.45)	-1.87 (-2.18, -1.57)	2.59 (1.96, 3.21)
MHH 3	-0.52 (-0.62, -0.42)	-1.79 (-1.97, -1.61)	-0.45 (-0.57, -0.34)	-1.09 (-1.33, -0.85)
<u>M. BIVARIADO</u>				
Temperatura				
MHH 1	-0.49 (-0.93, -0.06)	-3.51 (-4.25, -2.77)	-3.86 (-4.70, -3.03)	0.13 (-0.19, 0.46)
MHH 2	2.35 (1.53, 3.17)	-0.08 (-1.63, 1.47)	0.72 (-0.35, 1.79)	-1.34 (-3.87, 1.18)
MHH 3	2.65 (2.42, 2.89)	0.02 (-0.48, 0.52)	1.59 (1.38, 1.80)	0.06 (-0.28, 0.41)
Salinidad				
MHH 1	4.66E-04 (1.6E-04, 1.1E-03)	6.50E-03 (5.3E-03, 7.7E-03)	-3.47E-03 (-5.0E-03, -1.9E-03)	-6.18E-04 (-1.4E-03, 2.1E-04)
MHH 2	-0.93 (-1.20, -0.65)	-1.24 (-1.56, -0.92)	-1.86 (-2.16, -1.55)	2.47 (1.81, 3.12)
MHH 3	-0.89 (-1.00, -0.79)	-1.79 (-1.97, -1.60)	-0.65 (-0.78, -0.51)	-1.08 (-1.33, -0.84)
EMPÍRICA				
<u>M. UNIVARIADO</u>				
Temperatura				
MHH 1	-0.55 (-1.20, 0.10)	-1.90 (-2.72, -1.08)	-4.28 (-5.01, -3.55)	0.58 (0.15, 1.01)
MHH 2	1.34 (0.42, 2.26)	-4.09 (-5.48, -2.69)	4.36 (3.49, 5.23)	1.20 (-1.06, 3.46)
MHH 3	2.12 (1.88, 2.37)	-0.10 (-0.39, 0.20)	1.52 (1.34, 1.71)	0.33 (-0.06, 0.72)
Salinidad				
MHH 1	-1.13E-04 (-1.0E-03, 8.1E-04)	4.57E-03 (3.2E-03, 6.0E-03)	-6.16E-03 (-7.9E-03, -4.4E-03)	-3.57E-05 (-9.0E-04, 8.3E-04)
MHH 2	-0.71 (-1.02, -0.39)	-1.80 (-2.14, -1.45)	-1.55 (-1.90, -1.20)	3.06 (2.41, 3.71)
MHH 3	-0.52 (-0.62, -0.42)	-1.79 (-1.97, -1.61)	-0.28 (-0.41, -0.14)	-1.08 (-1.24, -0.91)
<u>M. BIVARIADO</u>				
Temperatura				
MHH 1	-0.49 (-0.93, -0.06)	-3.51 (-4.25, -2.77)	-3.43 (-4.18, -2.69)	0.59 (0.22, 0.96)
MHH 2	2.35 (1.53, 3.17)	-0.08 (-1.63, 1.47)	3.49 (2.55, 4.43)	1.05 (-1.87, 3.96)
MHH 3	2.65 (2.42, 2.89)	0.02 (-0.48, 0.52)	1.64 (1.46, 1.81)	0.94 (0.41, 1.47)
Salinidad				
MHH 1	4.66E-04 (1.6E-04, 1.1E-03)	6.50E-03 (5.3E-03, 7.7E-03)	-2.73E-03 (-4.7E-03, -7.3E-04)	-6.46E-04 (-1.4E-03, 1.1E-04)
MHH 2	-0.93 (-1.20, -0.65)	-1.24 (-1.56, -0.92)	-1.16 (-1.54, -0.78)	3.05 (2.40, 3.71)
MHH 3	-0.89 (-1.00, -0.79)	-1.79 (-1.97, -1.60)	-0.61 (-0.78, -0.44)	-1.11 (-1.27, -0.95)

De acuerdo con la tabla 7 se observa que en lo relativo a la temperatura, en Mahahual 1 el modelo bivariado ofrece un rango en el nivel de confianza al 95% menor al modelo univariado tanto para la clasificación de temporadas de CONAGUA como la EMPÍRICA, por lo tanto se referirá al modelo bivariado (variación de la temperatura por unidad de variación en el nivel de agua superficial ajustando por salinidad) para hacer el análisis de este sitio. En Mahahual 1 la mayoría de los impactos esperados son de carácter negativo (ver impactos por “secas”, “lluvias” y “total”), es decir, que un incremento en el nivel de agua está asociado con una disminución de su temperatura y viceversa, es decir, una relación inversa entre las variables independiente y respuesta. Para entender esta relación inversa es necesario recordar que el agua debido a su poder calorífico funge como regulador térmico, se puede decir que asociado a un aumento en el volumen de agua se requerirá más calor para elevar su temperatura, y por lo tanto más tardará para cederlo, es decir, para que el agua se enfríe. Poniendo lo anterior en perspectiva, se puede hacer la comparación entre el volumen de una taza de café y el de la bahía de Chetumal, se requeriría menos energía para calentar el agua del café que para calentar el agua de toda la bahía, debido al volumen. En ese sentido, respecto a los sitios de muestreo, a mayor volumen de agua, es decir, a mayor nivel, se tendrá una mayor “absorción” de calor del exterior, y por tanto, se esperaría una disminución en la temperatura exterior. Y viceversa, a menor nivel de agua (volumen) la sensación térmica en el exterior será de altas temperaturas. Con la propuesta de CONAGUA, el impacto mayor ocurriría durante la temporada de lluvias (-3.86) mientras que si se analiza la propuesta EMPÍRICA, este ocurriría durante la temporada de secas (-3.51), aunque la diferencia entre ambos impactos no es significativa, menos de medio grado Celsius.

En Mahahual 2, referente a la estimación de la variación de la temperatura por unidad de variación en el nivel de agua superficial, sorprende notar la variación de los resultados entre el ajuste de los modelos univariado y bivariado así como entre clasificaciones, los impactos estimados distan considerablemente unos con respecto de los otros dentro en una misma temporada. El impacto más significativo ocurre durante la temporada de secas con la clasificación de CONAGUA (-4.09) mientras que para la propuesta EMPÍRICA ocurre durante la temporada de lluvias (4.36). Se ha visto la interpretación del signo negativo en las estimaciones térmicas esperadas asociadas a una variación en el nivel de agua, ahora bien cabe la interrogante del por qué se esperaría un incremento de temperatura en el sitio Mahahual 2 durante la temporada de lluvias si es en esta temporada donde hay una mayor inundación, y por la explicación mencionada para Mahahual 1 se entendería que la temperatura debería disminuir. Si se observa el diagrama del presupuesto de agua de Mahahual 2 (figura 28) se puede notar que el único aporte de agua es la precipitación pluvial y que sus pérdidas de agua son a través de corrientes subterráneas y por evapotranspiración, de modo que a pesar del ingreso relativamente constante de agua en este sitio durante la temporada de lluvias, sus salidas no permiten un nivel de agua considerable para disminuir su temperatura y aunado a ello se tiene que los meses que abarca esta temporada corresponden a los más calurosos (mayo a septiembre) como puede verse en la figura 6 donde se señala la temperatura promedio mensual. Es interesante también señalar lo contrastantes que son los impactos térmicos esperados entre una clasificación y otra. Entre la clasificación de CONAGUA y la

EMPÍRICA hay una diferencia de más de tres unidades tanto en los impactos esperados para la temporada de lluvias como la de nortes. Lo anterior da lugar a pensar que noviembre es un mes clave en este sitio. Durante 2010 y 2011, noviembre fue el segundo mes que presentó una mayor inundación en Mahahual 2, en promedio este mes (junto con diciembre) es en el que ocurrió una mayor inundación, por lo tanto, su presencia en una u otra temporada es significativa, es por esto que al considerarlo como parte de la temporada de lluvias el impacto es menor mientras que si excluye del análisis el impacto es notablemente mayor debido a que todo el volumen de agua que pudiera ser almacenado y que pueda “servir” para regular la temperatura ya no es considerado, por lo tanto, el impacto es mayor.

En Mahahual 3, con respecto a las variaciones esperadas en la temperatura, se empleará el modelo univariado para su análisis. Para las temporadas de nortes y secas el impacto es prácticamente nulo. La temporada de lluvias es donde se espera una variación significativa de temperatura, alrededor de 1.4 °C asociado a un incremento por metro en el nivel de agua, recordando que es en la temporada de lluvias donde los registros térmicos son mayores.

En resumen, analizando los impactos para todo el periodo de análisis en los tres sitios de muestreo, las estimaciones térmicas asociadas a una variación en el nivel de agua aumentarán de la costa hacia tierra adentro.

En relación a las estimaciones de la variación de salinidad por unidad de variación en el nivel de agua puede observarse que los resultados entre el modelo univariado y bivariado son similares. A pesar de que todos los impactos son significativos (Mahahual 2 y Mahahual 3), la mayoría son negativos. Lo anterior tiene sentido, ya que si el impacto es negativo y el nivel de agua decrece, los valores de salinidad se elevan; por el contrario, si el nivel de agua aumenta, los valores de salinidad disminuyen. Es decir, el aumento en el nivel de agua trae consigo una disminución en la salinidad, ya que al existir un mayor volumen de agua la concentración de sales baja debido a que existe más agua para que éstas sean disueltas, y en contraste, si el nivel de agua disminuye, la concentración de sales es mayor debido a que existe un menor volumen de agua para disolverse.

A continuación se analizarán los impactos del incremento de temperatura en los ecosistemas de manglar. Sin embargo, antes de analizarlos cabe recordar que la atmósfera terrestre actúa de manera parecida a la de un cristal de invernadero: atrapa cierta cantidad de calor irradiado por la superficie terrestre. La Tierra es calentada por la luz y la radiación ultravioleta solares, la mayor parte de las cuales penetra en la atmósfera y alcanza la superficie terrestre. Esta energía es irradiada por la superficie terrestre y tiene una longitud de onda más amplia (situada en la parte infrarroja del espectro), es decir, es energía calorífica. Una parte de esta energía regresa al espacio exterior, pero otra es absorbida por dióxido de carbono, vapor de agua, metano y otros gases de la atmósfera, que se calientan por este proceso. Esta masa de aire transmite de nuevo calor hacia la Tierra, calentando de manera importante su superficie (Enciclopedia Estudiantil Esencial, 2000, p.551).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), define el *cambio climático* como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

Se conoce que el cambio climático global puede ser causado por los gases del efecto invernadero. Estos son gases que pueden absorber la radiación infrarroja. La absorción de radiación térmica de onda larga en la atmósfera evita el escape de la energía térmica provocando el incremento marcado de la temperatura en la atmósfera (Yáñez, Twilley & Lara, 1998, p.12).

Los componentes del cambio climático que afectan los ecosistemas de manglar incluyen cambios en el nivel del mar, incremento en la frecuencia de tormentas, precipitación, variación en la temperatura global, concentración mayor de CO₂ atmosférico, patrones de circulación oceánica, la salud de los ecosistemas vecinos unidos funcionalmente así como la respuesta de los seres humanos al cambio climático (Field, 1995; Lovelock & Ellison, 2007, citados por Gilman et al., 2008, p.2).

En la tabla 8 se mencionan las posibles respuestas que manifestarán los ecosistemas de manglar frente a las predicciones del cambio climático.

Tabla 8. Principales respuestas esperadas de los ecosistemas costeros tropicales frente a las predicciones sobre el cambio climático.

Impacto	Respuesta
Incremento en la temperatura atmosférica	Algunas poblaciones de manglares extenderán su distribución hacia latitudes mayores. En muchas especies de mangle habrá cambios en los patrones fenológicos, reproductivos y de crecimiento. Se incrementará la productividad neta global del ecosistema de manglar. La biodiversidad de plantas y animales en los manglares se incrementará (beneficios de microclima) y cambiará la composición florística y faunística. Se acelerarán los procesos microbianos en los manglares, en la interfase agua-sedimento.
Incremento del nivel medio del mar	La comunidad de manglar propagará tierra adentro si hay suficiente ambiente sedimentario y sin obstáculos topográficos. La erosión sobre el margen litoral se incrementará. El rango del nivel medio del mar determinará el nivel de restablecimiento de los manglares. La productividad secundaria (y primaria acuática) se incrementará por la mayor disponibilidad de nutrientes debido a la erosión y resuspensión.

Incremento en la concentración de CO ₂ atmosférico.	La fotosíntesis del follaje de los manglares no se incrementará significativamente. La eficiencia de los manglares en el uso del agua se mejorará. Esto puede verse o no reflejado en el crecimiento. No todas las especies de mangle responderán de igual manera.
Cambios en el patrón de lluvias	Los cambios en el contenido de agua del suelo y salinidad del sustrato, tendrán significativo impacto sobre el crecimiento de los manglares. Un incremento de la precipitación sobre la tasa de evapotranspiración incrementará la tasa de producción primaria de los manglares. Un incremento en la salinidad del suelo reducirá la productividad primaria y crecimiento de los manglares. La fauna eurihalina no se verá afectada por el incremento en salinidad pero la distribución de especies estenohalinas se alterará significativamente.
Tormentas	El incremento de la intensidad y frecuencia de las tormentas tiene el potencial de incrementar el daño a los manglares mediante la defoliación y mortalidad de los árboles. Alteración de la elevación del sedimento por medio de la erosión, deposición y compresión del suelo.
Impacto esperado de los cambios climáticos sobre el uso del suelo, utilización y explotación de los manglares	Se incrementará el riesgo de inundación de tierras bajas. Se incrementará la erosión de los litorales blandos vulnerables. Se incrementará el riesgo de intrusión salina. Se incrementará la frecuencia del daño causado por las tormentas.

Fuente: (Yáñez, Twilley, & Lara, 1998, p.14) (Gilman et al., 2008, p.5)

En la tabla anterior pueden notarse los posibles efectos que las consecuencias del cambio climático podrían ocasionar en los ecosistemas de manglar. Sin embargo, para este trabajo se examinaron aquellas relacionadas con el incremento de temperatura y con los cambios en los patrones de precipitación y tormentas, ya que están relacionados directamente con el nivel de inundación, es decir, con el hidroperiodo de estos ecosistemas. Sin embargo, para poder tener un mejor análisis de ello, es necesario conocer cuáles son las proyecciones de variación de temperatura y precipitaciones para el estado.

De acuerdo con las proyecciones del clima para Quintana Roo, consultadas en la página electrónica del Cambio Climático en México del Instituto Nacional de Ecología, donde se muestran ciertos escenarios para años distintos y considerando la proyección más

cercana, se tiene que, para el 2020, la precipitación total anual disminuirá entre 5% y 10% y la temperatura media anual se incrementará entre 0.8 y 1.2 °C.

Como puede verse en la figura 30 y de acuerdo al párrafo anterior, las proyecciones de variación de temperatura para el estado son de un aumento de la misma. Sin embargo, no se espera que los incrementos proyectados en la temperatura atmosférica y del mar impacten negativamente a los manglares debido a que la tasa de cambio proyectada es considerablemente menor que las oscilaciones diurnas de temperatura en los límites de tolerancia de los manglares (Field, 1995, citado por McLeod & Salm, 2006, p.50).

La temperatura influye en la fotosíntesis, en la pérdida de agua, en la transpiración y pérdida de sal de los manglares (Pernetta, 1993, citado por McLeod & Salm, 2006, p.50). La mayoría de los manglares producen la máxima densidad de brotes cuando la temperatura media del aire se eleva a 25 °C y deja de producir hojas cuando la temperatura media del aire descende hasta por debajo de los 15 °C (Hutchings & Saenger, 1987). Si la temperatura promedio mensual de Mahahual es de 28.1 °C y se espera un incremento entre 0.8 y 1.2 °C, la temperatura promedio anual variará entre 28.9 y 29.3 °C, que de acuerdo a lo mencionado anteriormente, no son valores críticos para su crecimiento y desarrollo. No obstante, Saenger & Moverly (1985) sostienen que a temperaturas superiores a 25 °C algunas especies muestran una tasa de decaimiento en la formación de hojas.

El incremento de temperatura puede impactar a los manglares cambiando los patrones estacionales de la reproducción y el periodo de tiempo entre la floración y la caída de los propágulos maduros (UNEP, 1994; Ellison, 2000).

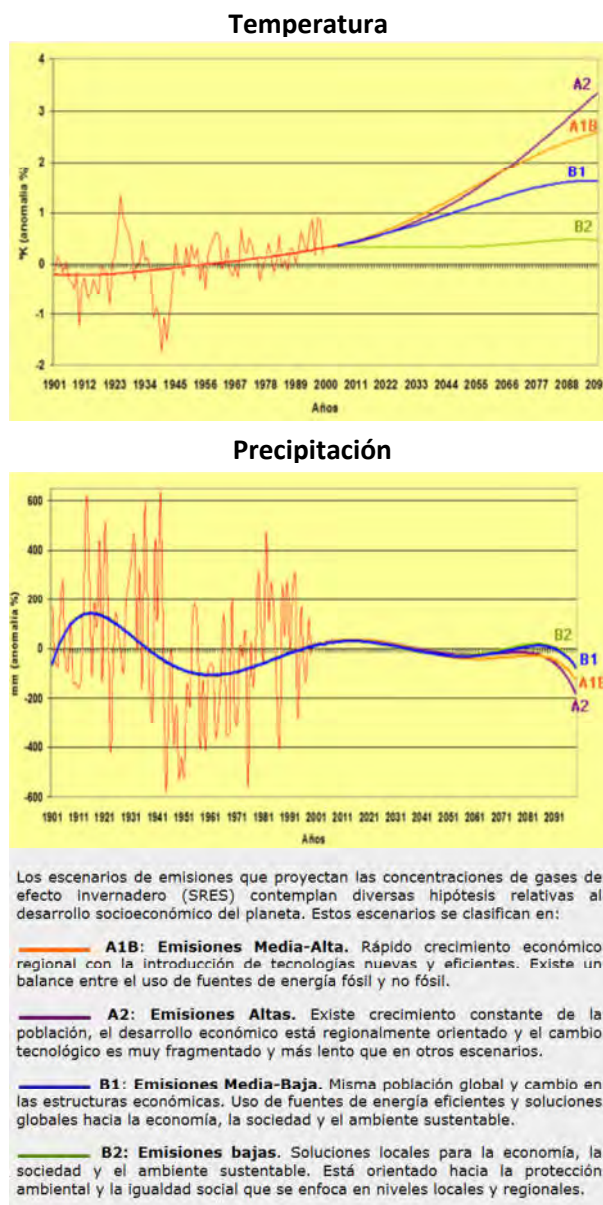


Figura 30. Escenarios de variación de la precipitación y temperatura para el estado de Quintana Roo (INE).

El suelo en el cual crecen los manglares está compuesto de una capa gruesa de materia orgánica combinada con sedimento, y es anaeróbico a excepción de la superficie del sedimento (Holguin et al., 2001, p.1).

Se espera que el cambio en la temperatura del suelo sea de la misma magnitud y tasa de incremento que la de la temperatura de la superficie del mar, aunque las variaciones en la temperatura del suelo son generalmente mucho menores que las de la temperatura del aire debido a la gran capacidad de los suelos saturados para retener calor (UNEP, 1994). Incrementos en la temperatura del sedimento pueden causar incrementos en la tasa de crecimiento de las bacterias resultando en mayores tasas de reciclaje y regeneración de nutrientes (McLeod & Salm, 2006, p.51).

Las comunidades bacterianas que habitan el ecosistema de manglar sostienen al manglar a través de tres mecanismos principales: 1) la mineralización de materia orgánica bajo condiciones principalmente anaerobias y microaerófilas; 2) altas tasas de fijación biológica de nitrógeno que llevan a contribuir con un 40-60% de los requerimientos de nitrógeno del sistema, y 3) la presencia de bacterias asociadas a nutrientes y sustancias tales como fuentes de nitrógeno, fósforo, hierro y fitohormonas (Holguín et al., 2001). Existe un beneficio mutuo que resulta de la asociación planta-bacteria. Las bacterias se alimentan de las sustancias liberadas por las raíces de la planta, y ésta a su vez se beneficia de los nutrientes que las bacterias le proporcionan mediante la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, entre otras (Díaz, Castro & Manjarrez, 2010, p.64).

De acuerdo con Newell et al. (1984) & Steinke et al. (1990) la degradación de la vegetación caída de los árboles de mangle empieza inmediatamente después de su colonización por hongos y bacterias que viven en el sedimento y puede durar de dos a seis meses o más para la degradación de la madera. Entonces, el incremento de la temperatura del suelo de los ecosistemas de manglar conlleva un impacto positivo para la productividad del mismo, ya que aumenta la eficiencia en la degradación de la materia orgánica debido al incremento de la tasa de crecimiento bacteriana, cuya función es de vital importancia para su desarrollo como lo manifiestan Holguín et al. (2001).

El incremento de temperatura en el estado reflejará un impacto positivo sobre los manglares, considerando lo mencionado previamente. Por lo tanto, se puede esperar que en los sitios de muestreo se refleje la productividad de los mismos. En este trabajo no se refleja un análisis de la productividad de los sitios Mahahual 1, Mahahual 2 y Mahahual 3, sin embargo, a partir de enero de 2010 se empezaron los trabajos de recolecta de hojarasca en los sitios de muestreo, la recolección de la misma se realiza mensualmente pero todavía no se cuenta con los datos de productividad, no obstante se podrá determinar si se presenta un incremento de la misma cuando estos datos sean publicados.

Con respecto a la variación en el ámbito de la pluviosidad, los cambios en los patrones de precipitación causados por el cambio climático pueden tener un profundo efecto tanto en el crecimiento de los manglares como en su extensión (Field, 1995; Snedaker, 1995, citado por McLeod & Salm, 2006, p.52). El escenario previsto para Q. Roo en el ámbito de

precipitación es un decremento de la misma entre un 5% y 10% de acuerdo con la proyección para el año 2020, y si bien con los datos que se tienen de los sitios de muestreo no se puede determinar el volumen de agua que es aportada por la precipitación, sí se reconoce que ésta es uno de los principales contribuyentes hídricos de los sitios (particularmente en Mahahual 2).

Una disminución en las precipitaciones resultaría en menores aportes de agua dulce superficial a los manglares y menos entrada de agua a las corrientes de agua subterránea lo cual podría incrementar la salinidad. Mayores valores de salinidad en el suelo dan como resultado un aumento de sal en los tejidos de los mangles. Con un incremento en la salinidad y escasez de agua dulce es probable que resulte en una disminución de la productividad del manglar, del crecimiento y supervivencia de plántulas así como un cambio en la composición de especies favoreciendo a las especies tolerantes a la sal (Ellison 2000, 2004, citado por McLeod and Salm, 2006, p.52).

Las especies de mangle varían en cuanto a su tolerancia a la salinidad (Flores et al., 2005). En la tabla 9 se mencionan los rangos de salinidad en los que pueden vivir las especies de manglar que se encuentran en territorio mexicano.

Tabla 9. Límites de tolerancia a la salinidad para cuatro especies de mangle.

Especie	Rango (ups)	Valor máximo (ups)
Mangle rojo	0 – 37	65
Mangle blanco	0 – 42	80
Mangle negro	0 – 65	100
Mangle botoncillo	0 – 90	120

Fuente: (CONAFOR)

Las especies de mangle que se encuentran en los sitios de muestreo, se señalan en la tabla 10.

Tabla 10. Especies de mangle presentes en los sitios de muestreo.

Sitio	Especies
Mahahual 1	Mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>), mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>) y mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>).
Mahahual 2	Mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>)
Mahahual 3	Mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>)

Como puede observarse, existe una dominancia de mangle rojo en los sitios de muestreo, y de acuerdo con el rango de salinidad en el que pueden desarrollarse estas especies los resultados sugieren que no se alcanzará algún nivel crítico que amenace con su composición. De acuerdo con los impactos esperados en la variación de la salinidad, y si las condiciones bajo las cuales se recopilaron los datos se mantienen, no se prevé un

impacto lo suficientemente grande que implique una amenaza para alguna especie al rebasarse los límites de tolerancia de salinidad.

En el último siglo, el nivel eustático del mar ha aumentado de 10 a 20 cm debido principalmente a la expansión térmica de los océanos y el derretimiento del hielo glacial causados por el calentamiento global (Church et al., 2001).

El ascenso en el nivel del mar tiene una importancia significativa para el sitio Mahahual 1, ya que es el sitio que se ubica en la costa, y la única “barrera” que separa este sitio del contacto directo con el mar es la carretera, sin embargo existe una obra de drenaje que posibilita la salida de agua de este sitio hacia el mar. Las inundaciones causadas por un incremento en las precipitaciones, tormentas o aumento relativo del nivel de mar pueden mermar la productividad, fotosíntesis y supervivencia (Ellison, 2000). La inundación de las lenticelas de las raíces aéreas puede ocasionar que disminuya la concentración de oxígeno, dando como resultado la muerte del manglar (Ellison, 2004). Con la inundación de los ecosistemas de manglar se prevé un detrimento de la habilidad de las hojas de los mangles para conducir agua y realizar la fotosíntesis (Naidoo, 1983).

Las lenticelas son pequeños poros que aparecen en el tallo o en las raíces y apoyan la captación y difusión pasiva del oxígeno. Pueden terminar en una raíz larga, esponjosa, llena de aire, sumergida. En estas estructuras, la concentración de oxígeno permanece alta continuamente (Moreno & Infante, 2009, p.32).

Si las lenticelas son estructuras donde se concentra oxígeno y si se prevé una elevación en el nivel de agua como consecuencia de un incremento en el nivel del mar, entonces puede entenderse que bajo esas condiciones, el agua impediría que éstas obtengan oxígeno de la atmósfera, reduciendo la concentración del mismo en los mangles, ocasionando su muerte.

Existe mucha controversia sobre la tolerancia de los manglares al incremento del nivel del mar. Algunos científicos sostienen que incrementos entre 12 y 27 cm por cada 100 años harán colapsar estos ecosistemas; además que descensos en el nivel del mar producirían una mayor expansión de estos bosques. Sin embargo, hay evidencias que los manglares no se verían afectados significativamente con ascensos del nivel del mar entre 50 y 80 cm por cada 100 años (por ejemplo Belice, Jamaica, Florida). Incluso durante los últimos 56 años, los manglares de Key West Florida se han expandido hacia el mar y hacia el continente, a pesar de los huracanes y aún con un incremento en el nivel del mar equivalente a 23 cm por cada 100 años (Yáñez et al., 1998, p.13).

Si el nivel del mar llegara a incrementarse un metro para finales de este siglo, se tiene previsto una pérdida de 4 011 km² de los humedales costeros para el estado, cifra que representa una disminución del 73% de la superficie de este ecosistema (Vázquez, 2008), como puede observarse en la tabla 11.

Tabla 11. Pérdida neta en extensión de humedales (km²) por algunos estados costeros de México asumiendo un ascenso en el nivel del mar de un metro para fines del siglo XXI.

Región	Pérdida de humedales (sumergencia)	Ganancia de hábitats espacios nuevos disponibles (2 m)	Ganancia neta (+) o pérdida neta (-)	% pérdida
Sinaloa	3 775.4	1 331.2	- 2 444.2	64.7
Quintana Roo	4 011.0	1 047.0	- 2 954.0	73.9
Campeche	4 321.0	1 182.0	- 3 139.0	72.6
Veracruz	3 591.0	215.0	- 3 376.0	94.0
Tabasco	2 024.0	1 439.0	- 585.0	28.9
Tamaulipas	1 604.0	1 282.0	- 322.0	20.1
Yucatán	1 862.0	622.0	- 1 243.0	66.8
Nayarit	890.0	426.0	464.0	52.1
TOTALES	22 078.0	7 545.0	-14 533.0	65.8

Fuente: (Vázquez, 2008)

CONCLUSIÓN

Este trabajo ha denotado las características de mayor relevancia de los manglares en la zona de estudio, se ha caracterizado el hidropериodo de los sitios de muestreo, así como se ha considerado escenarios de variación de temperatura y salinidad por variación en el nivel de agua (para analizar el impacto de la modificación del hidropериodo), asimismo se ha analizado el impacto del incremento de la temperatura (atmosférica, del agua y del suelo) involucrado en el desarrollo de los ecosistemas de manglar, el incremento térmico se ha contemplado dentro de un contexto de cambio climático, considerando los escenarios previstos para el estado de Quintana Roo.

Considerando lo anterior, se concluye que la modificación del patrón de inundación de nivel de agua derivado de la alteración en las temporadas de lluvias, secas y nortes, como consecuencia de una disminución en las precipitaciones, podría afectar negativamente a los manglares presentes en la zona de estudio, estos efectos podrían reflejarse principalmente en detrimento de la productividad. En contraste, también pueden esperarse impactos positivos, estos como resultado del incremento de la temperatura beneficiando a la comunidad microbiana presente en estos ecosistemas, cuya actividad es de vital importancia en el desarrollo de los mismos. Los impactos son contrastantes, pero es necesario recordar que estos no se presentan aisladamente, el escenario real al que tendrán que enfrentarse estos ecosistemas está determinando por diversos factores interactuando entre sí.

A pesar de las posibles respuestas del ecosistema de manglar ante los impactos del cambio climático, las acciones antrópicas acrecientan los riesgos sobre los ecosistemas y esto ha sido más catastrófico que el propio cambio climático global. Este último induce nuevas incertidumbres en la estabilidad ambiental y aumenta la vulnerabilidad de los hábitats (Yáñez et al., 1998, p.3).

REFERENCIAS

- Agraz, C. M. (1999). *Reforestación experimental de manglares en ecosistemas lagunares estuarinos de la costa noroccidental de México*. Tesis doctoral. Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas.
- Agraz, C. M. (2006). *Diagnóstico ambiental del ecosistema de manglar en el sistema lagunar Nichupté Bojórquez, Cancún, Quintana Roo. México* (Informe final SNIB-CONABIO proyecto No.BQ006). Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. México D. F.
- Arbio. (2013). Resiliencia en la amazonía: conceptos. Consultado el 01 de mayo de 2013, de <http://arbioperu.org/index.php/home/resiliencia-en-la-amazonia-conceptos>
- Benítez, D. (2007). *Forestación artificial con mangles en isletas de dragados en una región semiárida de México*. Tesis doctoral. La Paz: Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.
- Blasco, F. (1991). Los manglares. *Mundo Científico*, 144 (11), 616-625.
- Botero, L. (1990). Massive mangrove mortality on the caribbean coast of Colombia. *Vida Silvestre Neotropical*, 22, 77-78.
- Carmona, F. (2003). Modelos lineales. Consultado el 01 de marzo de 2013, de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r72120.PDF>
- Cervantes, M. (Comp.) (1994). *Guía regional para el conocimiento, manejo y utilización de los humedales del noreste de México*. México: ITESM-Campus Guaymas/CECARENA/Wetlands for the Americas.
- Cervantes, M. (2007). Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. En O. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, & L. Zambrano (Eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (pp. 37-67). México: SEMARNAT, INE, United States Fish & Wildlife Service, Unidos por la Conservación A. C., Escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Church, J., Gregory, J., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M., Qin, D., & Woodworth, P. (2001). Changes in Sea Level. En J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C. Johnson (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- CONABIO. (2008). *Manglares de México*. México: CONABIO.
- CONABIO. (2009). *Manglares de México: Extensión y distribución* (2ª ed.). México: CONABIO.

CONABIO. (2010). Manglares de México. Consultado el 01 de febrero de 2012, página web Biodiversidad Mexicana de la CONABIO:
<http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares/manglares.html>

CONAFOR (s.f.). Los manglares. Consultado el 01 de marzo de 2013, de
<http://www.conafor.gob.mx/micrositios/Humedales/>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Nueva York (Estados Unidos de América), 9 de mayo de 1992.

Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Ramsar (Irán), 2 de febrero de 1971. Compilación de Tratados de las Naciones Unidas N° 14583. Modificada según el Protocolo de París, 3 de diciembre de 1982, y las Enmiendas de Regina, 28 de mayo de 1987.

Datlabbit, M., Cisneros, H. B., & Valenzuela, E. (2007). *Globalización y sustentabilidad. El turismo en el sur de Quintana Roo*. Cuernavaca: Universidad Nacional Autónoma de México. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias.

Díaz, C., Castro, I., & Manjarrez, G. (2010). *Mangles de Cartagena de Indias: "Patrimonio biológico y fuentes de biodiversidad"*. Cartagena: Edición electrónica gratuita.

El Cambio Climático en México. Información por Estado y por Sector. (s.f.) Consultado el 01 de marzo de 2013, página web del Instituto Nacional de Ecología:
http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/qroo.html

Ellison, J. C. (2000). How South Pacific mangroves may respond to predicted climate change and sea-level rise. En A. Gillespie, & W. Burns (Eds.), *Climate Change in the South Pacific: Impacts and Responses in Australia, New Zealand, and Small Islands States* (pp.289-301). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Ellison, J.C. (2004). *Vulnerability of Fiji's mangroves and associated coral reefs to climate change. Review for the World Wildlife Fund*. Launceston: University of Tasmania.

Enciclopedia Estudiantil Esencial. (2000). Santafé de Bogotá: Larousse.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2005). *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua. Informe de Síntesis*. Washington, DC: World Resources Institute.

Field, C. (1995). Impacts of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia*, 295, 75-81.

Flores, F., González, F., & Zaragoza, U. (1998). Ecological parameters of the mangroves of semi-arid regions of Mexico: Importance for ecosystem management. En H. Leith & A. Al-Masoom (Eds.), *Towards the rational use of high salinity tolerant plants* (pp. 123-132). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Flores, F., Agraz, C., & Benítez, D. (2005). Creación y restauración de ecosistemas de manglar: principios básicos. En P. Moreno, E. Peresbarbosa & A. C. Travieso (Eds.), *Manejo Costero Integral: Enfoque Municipal*. México: Instituto de Ecología A. C.

Flores, F., Moreno, P., Agraz, C., López, H., Benítez, D., & Travieso, A. (2007). La Topografía y el hidroperiodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros [versión electrónica]. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, Sup. 80, 33-47.

Gilman, E., Ellison, J., Duke, N., & Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaption options. *Aquatic botany* (en prensa).

Gilman, E., Van Lavieren, H., Ellison, J., Jungblut, V., Wilson, L., Areki, F., Brighthouse, G., Bungitak, J., Dus, E., Henry, M., Sauni Jr. I., Kilman, M., Matthews, E., Teariki-Ruatu, N., Tukia, S., & Yuknavage, K. (2006). *Pacific Island Mangroves in a Changing Climate and Rising Sea* (UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 179). Nairobi: United Nations Environment Programme, Regional Seas Programme.

Hirales, M., Espinoza, J., Schmook, B., Ruiz, A., Ramos, R. (2010). Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México [versión electrónica]. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147-159.

Holguin, G., Vásquez, P., & Bashan, Y. (2001). The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and rehabilitation of mangrove ecosystem: an overview. *Biol Fertil Soils*, 33, 265-278.

Hutchings, P., & Saenger, P. (1987). *Ecology of mangroves*. Queensland: University of Queensland Press.

Icochea, L. A., & Olivera, H. E. (2006). El Niño Oscilación del Sur. Consultado el 01 de mayo de 2013, de <http://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/enos/index.html>

INBio. (2009). Géneros de líquenes tropicales, con énfasis en taxones neotropicales. Consultado el 01 de marzo de 2012, de <http://www.inbio.ac.cr/papers/liquenes/glosario.html>

Lara, J. R. et al. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En *Capital Natural de México*, Vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 109-134). México: CONABIO.

López, J., & Ezcurra, E. (2002). Los manglares de México: una revisión [versión electrónica]. *Maderas y bosques*, número especial, 27-51.

Lovelock, C. E., & Ellison, J. C. (2007). Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change. En J. E. Johnson & P. A. Marshall (Eds.), *Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment*. Australia: Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office.

Manglares y dunas de Veracruz. (s.f.). Consultado el 01 de febrero de 2012, de <http://www3.inecol.edu.mx/maduver/>

McLeod, E., & Salm, R. (2006). *Managing Mangroves for Resilience to Climate Change*. Gland: The World Conservation Union (IUCN).

Menéndez, L., Guzmán, J. M., Capote, R. T., Rodríguez, L. F., & González, A. V. (2003). Situación ambiental de los Manglares del Archipiélago Cubano. Casos de estudios: Sabana-Camagüey, franja sur de la Habana y Costa Norte de Ciudad Habana. En *Memorias IV Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo*, 2 al 6 de junio, La Habana.

Millero, F. J. (1984). The conductivity-density-salinity-chlorinity relationships for estuarine waters. *Limnol. Oceanogr.*, 29(6), 1317-1321.

Mitsch, W., & Gosselink, J. (1993). *Wetlands* (2ª ed.). Nueva York: Van Norstrand Reinthold.

Moreno, P. & Infante, D. M. (2009). *Manglares y selvas inundables*. Xalapa: Instituto de Ecología A. C., CONAFOR & OIMT.

Naidoo, G. (1983). Effects of flooding on leaf water potential and stomatal resistance in *Bruguiera gymnorhiza* (L.) Lam. *New Phytol*, 93, 369-376.

Newell, S. Y., Fell, J. W., Tallman, A. S., Miller, C., & Cefalu, R. (1984). Carbon and nitrogen dynamics in decomposing leaves of three coastal marine vascular plants of subtropics. *Aquat. Bot.*, 19, 183-192.

Perdomo, L., Restrepo, J., Rivera, V., Casas, O., Daza, F., Reyes, P., Villamil, M., & Campos, E. (2001). *Monitoreo de la vegetación de la Ciénega Grande de Santa Marta (CGSM)*. San Andrés Isla: IX Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar.

Pernetta, J. C. (1993). *Mangrove forests, climate change and sea-level rise: hydrological influences on community structure and survival, with examples from the Indo-West Pacific*. Gland: A Marine Conservation and Development Report. IUCN.

Pontificia Universidad Católica de Chile. (1999). Curso Geografía del mar. Consultado el 01 de marzo de 2013, de http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h321.html

Real Academia Española (s.f.). Diccionario de la lengua española. Consultado el 01 de febrero de 2012, de <http://www.rae.es/rae.html>

Rodríguez, L., Menéndez, L., Guzmán, J. L., González, A. V., & Gómez, R. (2006). Manglares del Archipiélago Cubano: estado de conservación actual. En L. Menéndez & J. Guzmán (Eds.), *Ecosistema de manglar en el Archipiélago Cubano. Estudios y experiencias enfocados a su gestión* (pp. 35-43). La Habana: Editorial Academia.

Ruiz, A., Acosta, J., & Berlanga, C. A. (2008). On the reliability of the data of the extent of mangroves: A case study in Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 51, 342-351.

Saenger, P., & Moverly, J. (1985). Vegetative phenology of mangroves along the Queensland coastline. *Proc. Ecol. Soc. Aust.*, 13: 257-265.

Sarmiento, F. (2001). Diccionario de ecología: paisajes, conservación y desarrollo sustentable para Latinoamérica. Consultado el 01 de mayo de 2013, de <http://www.ensayistas.org/critica/ecologia/diccionario/>

Servicio Meteorológico Nacional. (2011). *Reporte del Clima en México* (octubre 2011). México: CONAGUA. Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo.

Servicio Meteorológico Nacional. (2011). *Reporte del Clima en México* (Reporte Anual 2011). México: CONAGUA. Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo.

Snedaker, S. C. (1995). Mangroves and climate change in Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia*, 295, 43-49.

Torres, R. & Ruíz, J. (2011). *Vulnerabilidad de los ecosistemas, la sociedad y la infraestructura costera ante el cambio climático global* (Reporte técnico presentado a PROMEP-SEP). Chetumal: PROMEP-SEP.

Torres, R., Ruíz, J., & Miranda, V. (2011). Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán. Consultado el 01 de marzo de 2013, de Foro de Investigación Científica, de Desarrollo Tecnológico y Exposición Cultural del "Sistema Hidrológico de la Cuenca Península de Yucatán": <http://www.coqcyt.gob.mx/portal/cuenca/Contenido/Presentaciones%20foro/ok%20Panel%205/5-03%20Foro%20Cuenca%20Yucatan-UQROO.pdf>

Trejo, J. C., Durán, R., & Olmsted, I. (1993). Manglares de la Península de Yucatán. En S. I. Salazar & N. E. González (Eds.), *Biodiversidad marina y costera de México*. Comisión Nacional de Biodiversidad y Centro de Investigaciones Costeras de Quintana Roo, México.

UNESCO. (1984). *La escala de salinidades prácticas de 1978 y la ecuación internacional de estado del agua del mar de 1980* (10° informe del Grupo Mixto de Expertos sobre Tablas y Patrones Oceanográficos). París: UNESCO. Documentos Técnicos de la UNESCO sobre Ciencias del Mar.

United Nations Environment Programme [UNEP]. (1994). *Assessment and monitoring of climatic change impacts on mangrove ecosystems* (Reporte No. 154). UNEP Regional Seas Reports and Studies.

Valverde, T., Meave, J. A., Carabias, J., & Cano-Santana, Z. (2005). *Ecología y medio ambiente*. México: Pearson Educación.

Vázquez, A. (2008). *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento en el nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos*. México: INE, UNAM, SEMARNAT.

Yáñez, A., Twilley, R., Lara, A. L. (1998). Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global [versión electrónica]. *Maderas y Bosques*, 4(2), 3-19.

Zaldívar, A., Herrera, J., Teutli, C., Hernández, R., & Caamal, J. (2010). Manglares. En R. Durán & M. Méndez (Eds.), *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (pp. 138-139). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.

ANEXOS

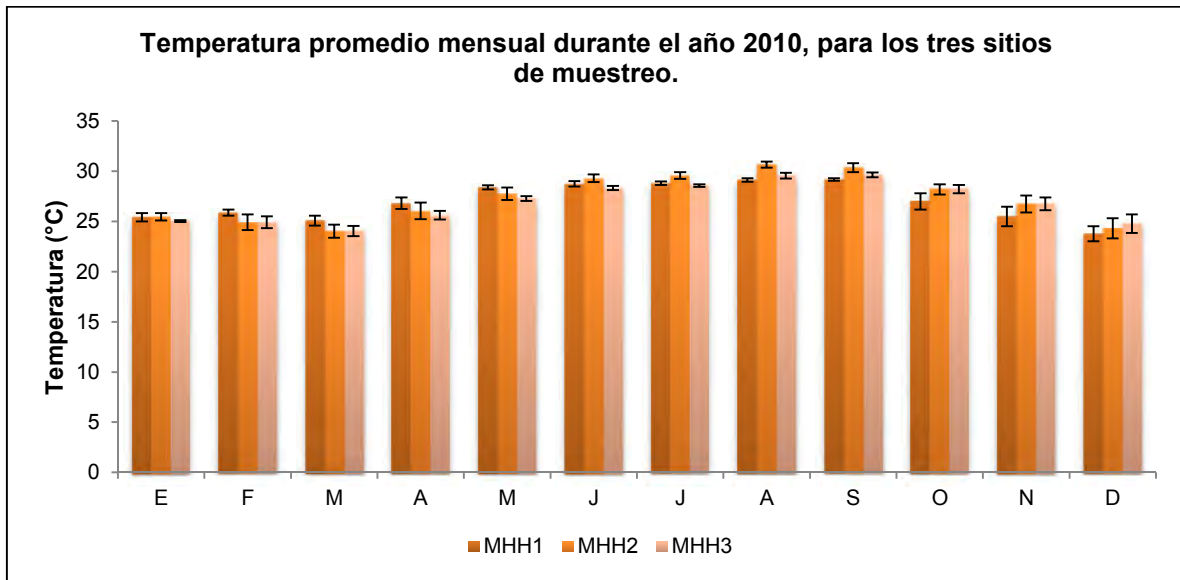


Figura 31. Temperatura promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

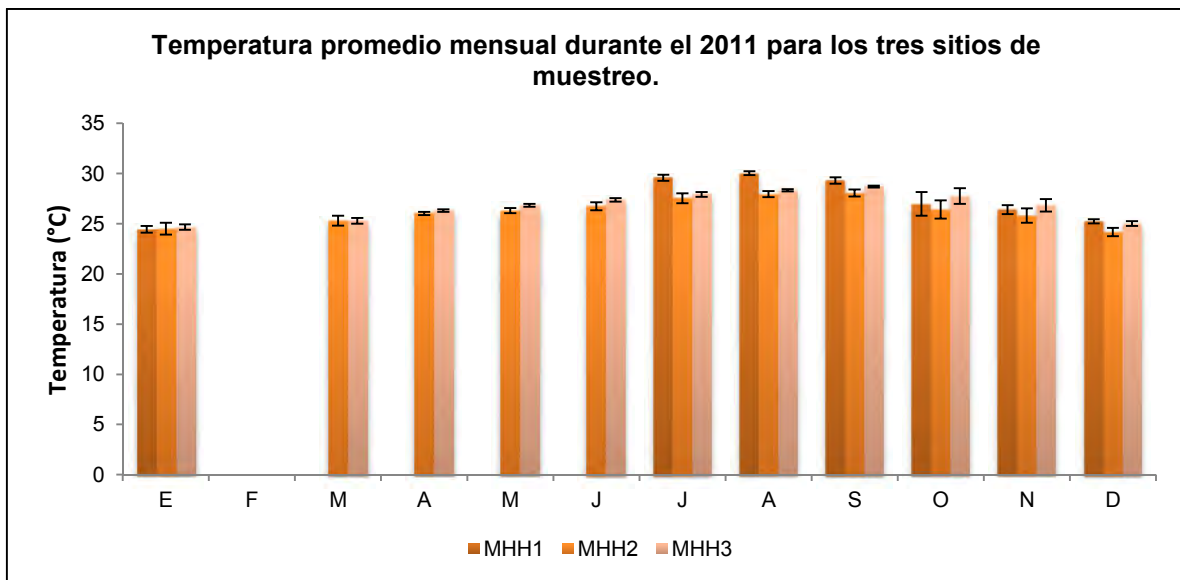


Figura 32. Temperatura promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

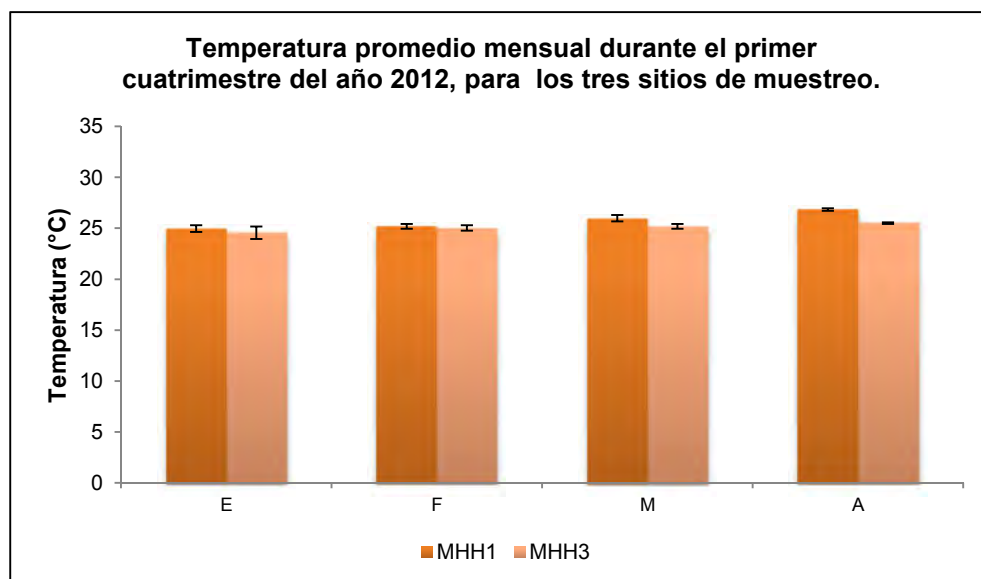


Figura 33. Temperatura promedio mensual durante el año 2012 para los dos sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH3: Mahahual 3.

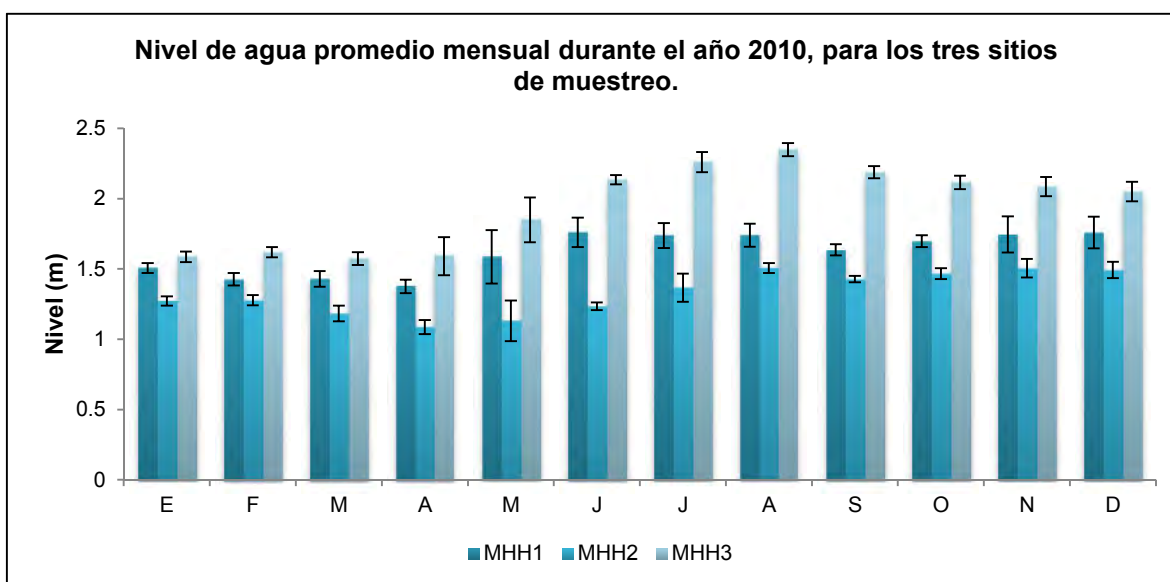


Figura 34. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

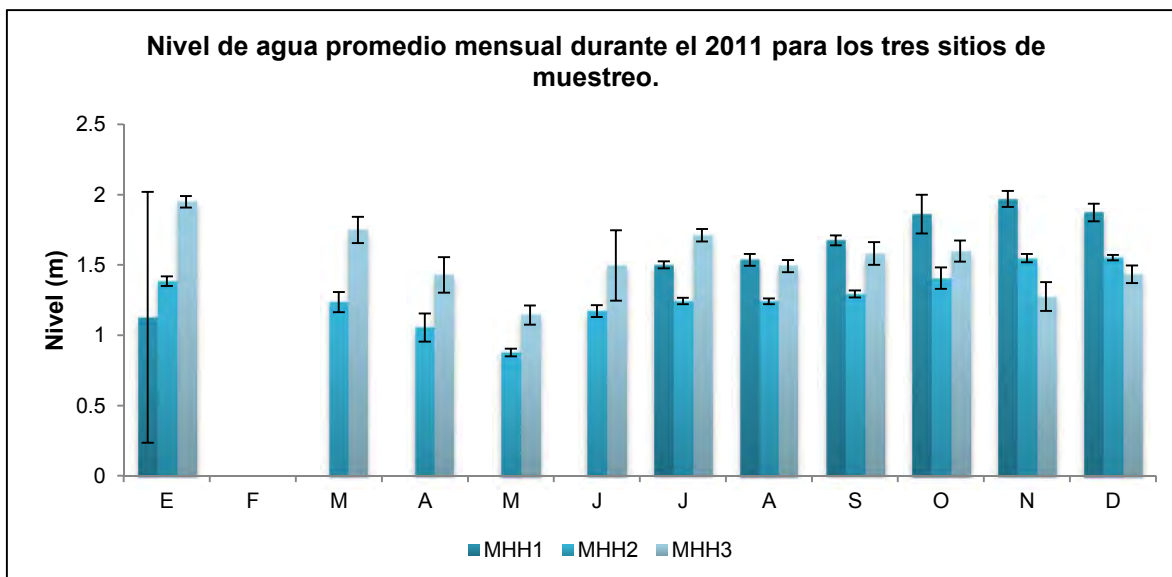


Figura 35. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

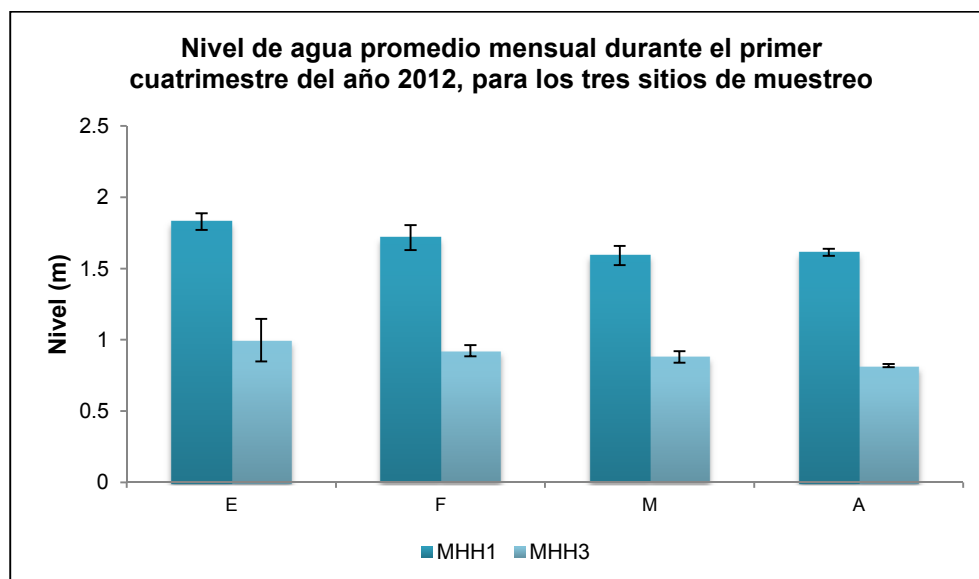


Figura 36. Nivel de agua promedio mensual durante el año 2012 para dos sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH3: Mahahual 3.

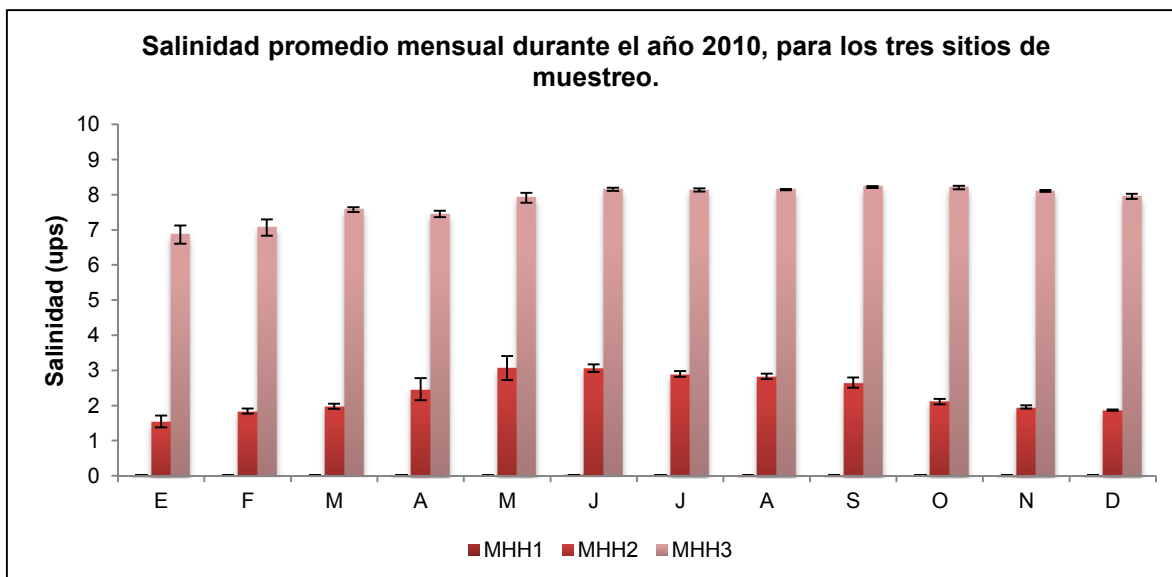


Figura 37. Salinidad promedio mensual durante el año 2010 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.

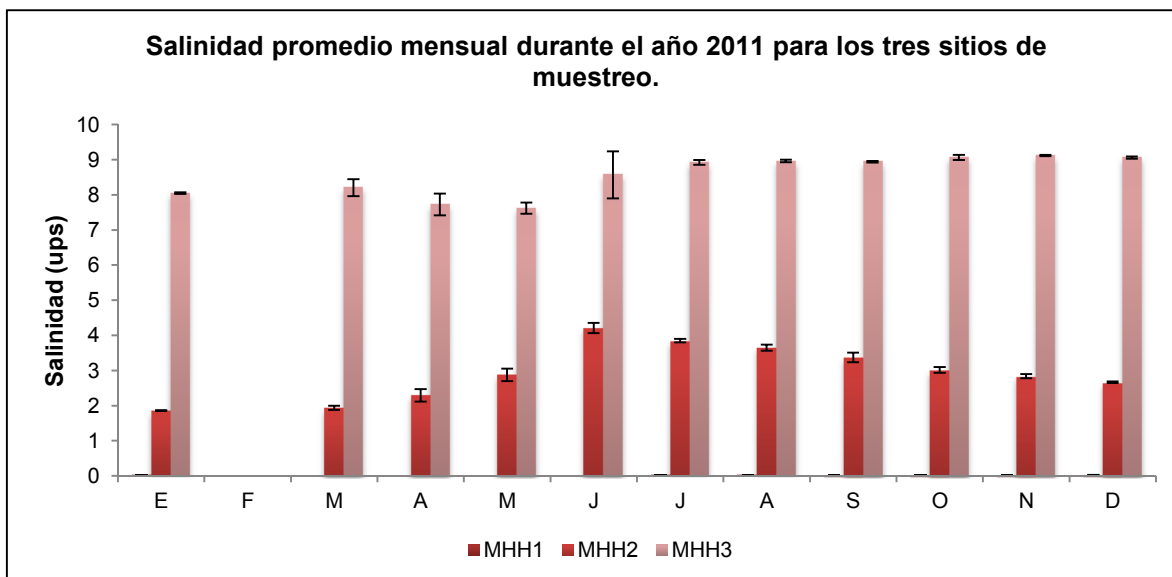
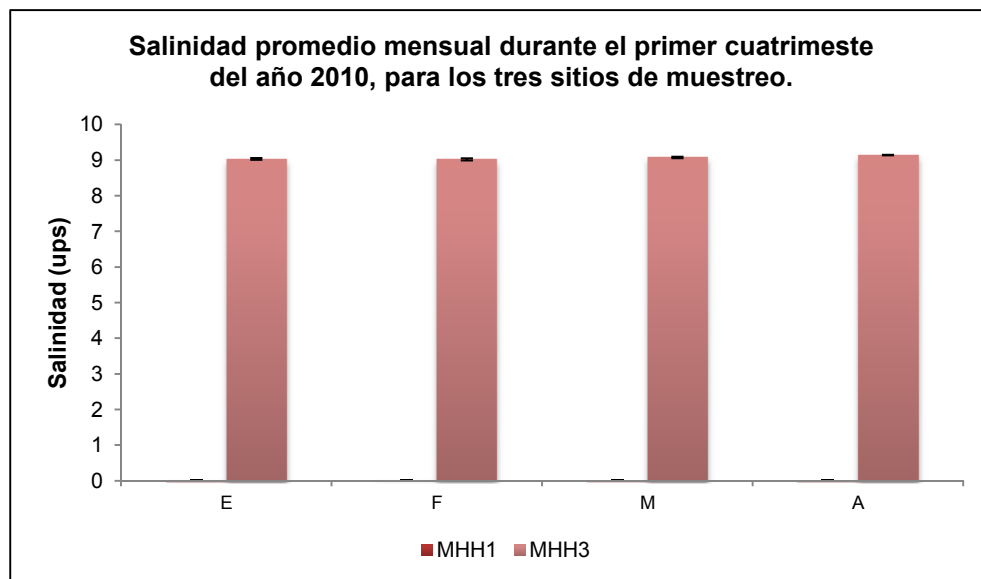


Figura 38. Salinidad promedio mensual durante el año 2011 para los tres sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH2: Mahahual 2, MHH3: Mahahual 3.



**Figura 39. Salinidad promedio mensual durante el año 2012, para dos sitios de muestreo.
MHH1: Mahahual 1, MHH3: Mahahual 3.**

GLOSARIO

Abrasiva. Dicho de un producto: Que sirve para desgastar o pulir, por fricción, sustancias duras como metales, vidrios (DRAE).

Áridos. Materiales rocosos naturales, como las arenas o las gravas, empleados en las argamasas (DRAE).

Estenohalino. Organismo que posee condiciones de resistencia específica a concentraciones de salinidad (Sarmiento, 2010).

Eurihalino. Organismo que presenta una amplia gama de tolerancia frente a diferentes concentraciones de salinidad (Sarmiento, 2010).

Eustático. Cambio mundial en el nivel del mar como el causado por los movimientos tectónicos o por el crecimiento o derretimiento de los glaciares (McLeod & Salm, 2006).

Fenología. Ciencia que estudia los procesos biológicos cíclicos o periódicos (floración, reproducción, hibernación, migración, etc.) en relación con las estaciones climáticas y otros factores ecológicos (Sarmiento, 2010).

Herbivoría. Consiste en el consumo de una planta por parte de un animal (Valverde et al., 2005).

Marisma. Es un terreno bajo y anegado, localizado a orillas del mar o de los esteros. Se encuentra inundado por las aguas del mar, ya sea por las mareas y sus sobrantes o por el encuentro de las aguas marinas con la desembocadura de los ríos. Presenta vegetación de juncos, hierbas y cañas además de pequeñas lagunas y canales intercalados (Cervantes, 1994).

Mineralización. Proceso por el cual los compuestos contenidos en el humus se desintegran en unidades, hasta liberar los minerales, debido a una actividad descomponedora microbial intensa; comprende varios procesos como humificación, amonificación, quimiosíntesis, nitrificación, etc (Sarmiento, 2010).

Oscilación Decadal del Pacífico. Fluctuación (variabilidad climática) de largo periodo en el océano Pacífico, la cual afecta principalmente la cuenca del Pacífico y el clima de América del Norte (Icochea & Olivera, 2006).

Resiliencia. Capacidad de un ecosistema de absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad (Arbio, 2013).

Servicio ambiental. Son los bienes y servicios que las personas obtenemos a partir de nuestro entorno natural (Manglares y dunas de Veracruz).

Turbera. Terrenos pantanosos y ácidos donde se acumula material vegetal en diverso grado de descomposición (INBio, 2009).

Zonación. Extensión o franja paralela a la línea de costa donde se ubican cada una de las especies de manglar. Esta puede ser regular o irregular dependiendo del hidroperiodo y esta a su vez es influenciada por la microtopografía local (Benitez Pardo, 2007).