



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

Título de tesis

Prevalencia de enfermedades de *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero.

Tesis que para obtener el título de

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

Eduardo Navarro Espinoza

DIRECTOR DE TESIS:

Lorenzo Álvarez Filip



DICIEMBRE 2015

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no podría haber sido realizado sin los valiosos aportes de una gran cantidad de personas en breve serán nombradas.

A mi padre que con sus consejos, apoyo y guía me han hecho ser el hombre que soy ahora. Gracias papá por despertar esa curiosidad y amor por la naturaleza, por enseñarme el valor del trabajo e inculcarme que el hecho de no saber hacer las cosas no implica que no pueda realizarlas. A mi madre por todo ese amor con el que me has criado, por esa paciencia que me tienes y por todas esas canas que te saqué cada vez que salía de campo. Gracias por siempre apoyar mis decisiones y proyectos. A mi abuelo por sus sabios consejo y siempre apoyar este proyecto de vida. A mi hermano por aguantar las ocasiones que me iba de campo y dejaba sin dinero la casa, por escucharme cuando lo necesitaba.

Este trabajo no sería posible sin la valiosa guía y dirección del Dr. Lorenzo Álvarez Filip, cuyo trabajo se ve reflejado en la culminación de esta tesis. Gracias por incentivar me para generar un proyecto y enseñarme a ser creativo, a resolver problemas de diferentes maneras, también te agradezco por esas llamadas de atención, en pro de mejorar este trabajo y por el apoyo que me brindaste.

Agradezco a la Dra. Alba González Posada por sus valiosas contribuciones para este trabajo, además de su invaluable ayuda en la elaboración del Índice de desarrollo costero, muchas gracias por esa disposición y amabilidad con la siempre me ayudaste. Al M. en C. Adam Suchley por todas las críticas y contribuciones a este trabajo, gracias también por la ayuda en el manejo de la estadística que llevo a la culminación de esta tesis. A la Biol. Aracely Acevedo por las críticas y contribuciones a esta tesis, gracias por hacerme compañía en esas noches de desvelo y desesperación en el laboratorio, gracias por tu amistad y por todo el apoyo que me diste. A Erendira de la Rosa Pimentel por tus comentarios hacia el trabajo, gracias por tu compañerismo y amistad (también por el bullying). Gracias al equipo del BARCOLAB por ser mi familia por todo este tiempo siempre serán una parte importante de mí. También agradezco a los integrantes del laboratorio No. 11 los cuales me brindaron su

amistad y apoyo: Nancy B. Perez, gracias por tu amistad y compañía, por aguantar mis bromas, por ayudar en la elaboración de mi tesis y por ayudarme a bailar muchas gracias Nan, eres una gran amiga. También al M. en C. Israel Ortega y al Biol. Alexis Medina por sus consejos y ayuda, gracias por su amistad. Al resto del equipo del laboratorio Biol. Gabriela Gutiérrez (Pecas). Javier González, Sacnite Chávez y al Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet. Muchas gracias por el compañerismo y el apoyo.

Agradezco al M. en C. José Estrada Contreras, a la M. en C. Isis Gabriela Martínez López y a los demás integrantes del equipo que desarrollaron el proyecto “Diagnostico y estado de conservación de las poblaciones de *Acropora* en el parque nacional arrecife de Puerto Morelos”, cuyos datos son la base de este proyecto.

A la M. en C. Rosa Rodríguez Martínez por ese apoyo y asesoría en la realización de este proyecto además, te agradezco por brindarme la información necesaria para realizar este trabajo. También agradezco la aportación del M. en C Edgar Escalante, por brindarme la ubicación de los ojos de agua registrada en el Servicio Hidrología y Meteorología de la UASA. Al personal que labora en la Dirección del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, por brindarme las facilidades para realizar el trabajo, así como por brindarme la ubicación de los ojos de agua registrados en sus bases de datos y darme la oportunidad de realizar el muestreo en una de sus embarcaciones. Agradezco al capitán n Luis Alberto Ramos por su invaluable conocimiento del parque, con el cual me fue posible la ubicación de los ojos de agua, así mismo al Biol. Rodolfo Franco Gordillo por su colaboración en dicha tarea.

Agradezco al Instituto de Ciencias Marinas y Limnología de la UNAM por brindarme los recursos y facilidades para realizar este proyecto. También agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme

esa formación como biólogo, junto con la valiosa enseñanza de todos mis maestros.

DEDICATORIA

Para mi abuelo:

Ese viejo que vigila por la ventana,
como resguardando un tesoro,
tiene el tiempo en sus ojos,
ojos tristes pero amorosos,
siempre a la espera de su hijo,
su frente arrugada por el peso,
el peso todos esos años.

La fortaleza de tu bondad,
fue conocida en toda la ciudad,
por jóvenes y viejos,
siempre les diste
una nueva oportunidad.

Viejo, tus consejos siempre serán;
el mayor tesoro que me pudiste heredar:
“disfruta la vida” y “comparte la felicidad”.



Gracias abuelo

Rafael Espinoza Aguilar (1927-2013)

ÍNDICE

Agradecimientos	2
Dedicatoria.....	5
ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS	9
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
<i>Los Arrecifes de coral</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Acropora palmata y su importancia en los arrecifes del Caribe</i>	13
<i>Historia de Acropora palmata en el Caribe</i>	14
<i>Agentes de estrés y condición de los arrecifes</i>	15
<i>Efectos del desarrollo costero en el ecosistema coralino</i>	16
<i>Enfermedades de Coral</i>	17
<i>Las enfermedades de Acropora palmata</i>	18
JUSTIFICACIÓN	22
HIPÓTESIS	23
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	24
OBJETIVO GENERAL	24
OBJETIVOS PARTICULARES	24
ÁREA DE ESTUDIO	25
<i>Condiciones ambientales</i>	25
<i>Actividades antropogénicas</i>	27
MATERIAL Y MÉTODOS	30
<i>Prevalencia de enfermedades en A. palmata en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos</i>	30
<i>Localización de posibles fuentes puntuales y no puntuales de aporte de nutrientes</i>	33
Ojos de agua	33
Descargas de agua de los humedales y canales al PNAPM.	34
<i>Desarrollo costero</i>	34
<i>Integración de la información en un sistema de Información Geográfica (SIG)</i>	35
Bases de datos de <i>Acropora palmata</i>	35
Bases de datos de fuentes de aportes de nutrientes	36
Desarrollo Costero.....	37
<i>Análisis estadístico</i>	41
RESULTADOS	43
Prevalencia de enfermedades según las tallas	44

<i>Densidad de colonias y enfermedades</i>	45
<i>Efecto de la profundidad en la prevalencia de enfermedades</i>	47
<i>Localización de las fuentes de aporte de nutrientes y caracterización del desarrollo costero</i>	48
<i>Análisis espaciales</i>	49
Distancia al canal de Nichutpé	52
<i>Análisis de componentes principales</i>	57
DISCUSIÓN	60
CONCLUSIÓN	69
REFERENCIAS	71
ANEXO 1 Determinación de la dimensión de los buffer	76
ANEXO 2. Ubicación geográfica de las fuentes de aporte de nutrientes	78
ANEXO 3. Ubicación y capacidad de los principales hoteles de Puerto Morelos	80

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Figura 1 Flujo de nutrientes y contaminantes en el subsuelo kárstico a la laguna arrecifal.....	17
Figura 2. Mapa del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos.	26
Figura 3. Metodo de arrastre Manta Tow.	31
Figura 4. Categorías de parches según su densidad de colonias de <i>A. palmata</i>	32
Figura 5. Representación gráfica de las variables espaciales	39
Figura 6. Porcentaje de colonias enfermas por clase de talla.	45
Figura 7. Porcentaje de prevalencia de enfermedades de <i>A. palmata</i> por categoría de densidad (ind/m ²).	46
Figura 8 Prevalencia de enfermedades por metro de profundidad.	48
Figura 9. Prevalencia de enfermedades en celdas.	50
Figura 10. Mapa de celdas categorizadas con los valores del índice de desarrollo costero.	55
Figura 11. Mapa de parches categorizados con los valores del índice de desarrollo costero.	56
Figura 12. Porcentaje promedio de enfermedades (\pm E.E) en las regiones generadas a partir del índice de desarrollo costero Norte/Sur	57
Figura 13. Componentes principales.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Mapa de visualización del impacto de las corrientes marítimas de Puerto Morelos y el área urbana de Cancún sobre la prevalencia de las enfermedades	57
Cuadro 1. Crecimiento poblacional de las principales comunidades de Quintana Roo.	25
Cuadro 2. Características de cada Arrecife del PNAPM.	40
Cuadro 3. Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la viruela blanca y todas las enfermedades realizados a nivel de Parche.	48
Cuadro 4. Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la viruela blanca y todas las enfermedades realizados a nivel de Celda.	48
Cuadro 5. Componentes principales de las variables de aporte de nutrientes a la laguna costera y desarrollo costero.	51

Cuadro 6. Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la banda blanca, viruela blanca y todas las enfermedades con el primer componente principal CP1.....	51
--	----

RESUMEN

El coral cuerno de alce *Acropora palmata* es uno de los principales formadores de arrecifes en el mar Caribe, en décadas recientes se han presentado grandes disminuciones en sus poblaciones, ocasionadas por eventos epizooticos de gran magnitud, protagonizadas por la enfermedad de la banda blanca en la década de 1980 y la viruela blanca en 1990. El presente estudio evaluó la prevalencia de enfermedades del coral *A. palmata* en Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) y el efecto de las fuentes de aporte de nutrientes a la laguna arrecifal junto con impacto del desarrollo costero, para el cual se elaboró un índice para medir dicho impacto además se estudió el efecto de factores que pudieran intervenir en la prevalencia de enfermedades como la talla, densidad de colonias y profundidad. Nuestros resultados indican que la prevalencia de enfermedades de *A. palmata* en el PNAPM fue del 9.61%, siendo la enfermedad de la viruela blanca la que tuvo una mayor presencia con el 5.86% de colonias enfermas, mientras que la enfermedad de la banda blanca se registró en el 3.82% de las colonias, valores más altos que los registrados en el resto del Caribe Mexicano. Además, al estudiar el efecto la talla, así como la profundidad las cuales mostraron tener un efecto sobre la prevalencia de las enfermedades, caso contrario con la densidad de colonias que no mostró patrón alguno. Asimismo, se evaluó el efecto de los ojos de agua, desembocaduras de manglar y el canal de la laguna de Nichupté los cuales mostraron tener un efecto discreto sobre las enfermedades de coral, principalmente en la enfermedad de la viruela blanca. El índice propuesto para medir el impacto de desarrollo costero sobre el arrecife, mostró que existe un patrón espacial el cual divide el PNAPM en dos zona norte y sur, siendo la zona norte la más afectada por las enfermedades, ocasionado pobremente por la urbe de Cancún y el sistema de corrientes predominante en el parque; debido a esto se propone que se limiten las actividades pesqueras y turísticas en esta zona, así como replantear la construcción del desarrollo turístico “La milla dorada”, frente a este sector del arrecife.

INTRODUCCIÓN

Los Arrecifes de coral son uno de los ecosistemas marinos de mayor importancia por su gran diversidad de especies, producción de biomasa, así como por la cantidad de servicios ambientales que prestan (Muñiz-Irigoyen 2004). Estos complejos ecosistemas marinos están embebidos en las cristalinas aguas tropicales, cuyas estructuras son el hogar de una gran cantidad y variedad de organismos muchos de los cuales aún no han sido descritos por la ciencia (Hoegh-Guldberg 1999). Aunado a esto los arrecifes de coral brindan una gran cantidad de servicios ambientales dentro de los que destacan el turismo, la protección de las costas, formación de playas, fuente de recursos pesqueros entre otras (Burke y Maidens 2005). De ahí que al estimar los beneficios económicos generados por los arrecifes de coral a nivel mundial, estos se encuentran valuados alrededor los 11.5 billones de dólares anuales (Burke et al. 2011).

Los corales están constituidos por organismos holobiontes, es decir sistemas biológicos complejos en los que intervienen varios actores para el funcionamiento del sistema (Valdespino et al. 2014). De manera que en los corales formadores de arrecifes están conformados por colonias de pólipos de coral: animales diblásticos pertenecientes al orden *Scleractinia* (Cnidaria) (Brusca y Brusca 2005); cada uno de estos aloja dentro de sus células de la gastrodermis al dinoflagelado *Symbiodinium spp.*, esta alga cede la mayor parte de los productos fotosintéticos a su hospedero, proporcionando gran parte de sus requerimientos nutrimentales (Papina et al. 2003), además de generar un ambiente hiperoxigenado el cual le proporciona protección contra las infecciones (Rosenberg et al. 2007). Asimismo, existe una gran variedad de comunidades bacterianas altamente específicas asociadas a los corales; estas se les puede ubicar en tres sitios preferentes dentro del hospedero: inmersos sobre la capa de mucosa que rodea al pólipo, dentro del tejido del pólipo y en el esqueleto de carbonato de calcio, proporcionando una gama de beneficios al sistema como proporcionar Nitrógeno, producción de antibióticos que previenen las infecciones, entre otras. Este complejo sistema en su conjunto fija carbonato de

calcio en forma de un exoesqueleto de aragonito (Brusca y Brusca 2005) dando lugar a las grandes estructuras llamadas arrecifes.

Acropora palmata y su importancia en los arrecifes del Caribe.

El género *Acropora* es el más abundante y diverso de corales formadores de arrecifes con 190 especies, distribuidas a lo largo de las aguas tropicales del Pacífico, Índico y Atlántico (Wallace 1999). El coral cuerno de alce (*A. palmata*) es una de las tres especies del género que habita en las aguas del Atlántico y el Caribe junto *A. cervicornis* y *A. prolifera*, siendo este último un híbrido entre *A. palmata* y *A. cervicornis* (Wallace 1999; NMFS 2015).

La morfología de *A. palmata* es ramificada formado ramas aplanadas con bordes redondeados. Las ramas de este coral pueden llegar a medir hasta 50 cm de largo y 4 o 5 cm de ancho, mientras que la colonia puede llegar a medir 2 m de altura y hasta 4 m de diámetro. Sus tasas de crecimiento y calcificación son relativamente altas llegando a ser de 3 a 11.5 cm/año (NMFS 2015). Asimismo, la reproducción en su mayoría está dada por fragmentación, con un evento reproductivo al año entre los meses de julio y agosto, donde las colonias liberan gametos femeninos y masculinos a la columna de agua (Aronson y Precht 2001).

A. palmata es el coral formador de arrecifes con mayor extensión en el mar Caribe, suele hallarse en profundidades no mayores a los 10m asociado principalmente al arrecife frontal y a la cresta arrecifal donde la dinámica de las corrientes y el oleaje es elevada. De igual manera, es común encontrarlos en grupos densos monoclonales (Goreau 1959; Aronson y Precht 2001). Este coral es particularmente importante en la generación de la estructura arrecifal así como en acreción de carbonato de calcio (Porto-Hannes et al. 2014; NMFS 2015). Por otro lado su compleja estructura tridimensional le brinda complejidad al sistema debido a esto estructura tridimensional ofrece un hábitat para una gran cantidad de peces e invertebrados (Sutherland et al. 2010).

Historia de *Acropora palmata* en el Caribe.

Las poblaciones del coral cuerno de alce han sufrido grandes disminuciones en la historia reciente, en la década de 1970 y 1980, se perdió cerca del 80% de la población debido a una gran epidemia de banda blanca (Gladfelter 1982), esta representó uno de los mayores eventos de epizootias marinas registradas junto con la del erizo de púas largas (*Diadema antillarum*) las cuales generaron enormes pérdidas poblacionales para estas especies (Aronson y Precht 2001;).

En la década de 1990 apareció una nueva amenaza para *A. palmata*; una nueva enfermedad nombrada viruela blanca (o “Serratosis”) que súbitamente se convirtió en una epizootia a lo largo del Caribe, extendiéndose velozmente desde los Cayos de Florida hacia resto del Caribe, diezmando nuevamente sus poblaciones (Patterson et al. 2002)

Actualmente, el declive poblacional continua para esta especie, junto con el desarrollo continuo de otras amenazas, como el aumento en la temperatura y la acidificación de los mares, la acción de huracanes (Bruckner, 2002; Gardner et al. 2001; Patterson et al. 2002) y el crecimiento de la población humana en las costas del Caribe (Burke et al. 2011). Todo esto pese a los esfuerzos de conservación que se han implementado, generando en algunos casos cambios en la composición de corales o inclusive cambios de fase entre corales y algas (Aronson y Precht 2001; Gardner et al. 2001; Patterson et al. 2002; Rodríguez-Martínez et al. 2014;);o un cambio en la composición de corales, tal como sucedió en Saint Croix (Islas Vírgenes) donde la disminución del coral cuerno de alce generó un cambio en la dominancia de este coral por *Diploria clivosa* (Kaczmarzsky et al. 2005).

A causa de lo anterior *A. palmata* se encuentra protegido por diversos organismos nacionales e internacionales como la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN) que la cataloga en su Red List como especie críticamente amenazada, la Convención Internacional para el Comercio de Especies en Peligro (CITES) la cataloga en su apéndice II, el cual incluye especies que no necesariamente se encuentran con amenaza de extinción, pero su comercialización debe regularse para evitar que

así sea (CONABIO 2015). Mientras tanto en México se encuentra “en Protección especial” por la NOM 059. Asimismo se han generado programas de restauración a través de trasplante de fragmentos de coral generados por la acción de huracanes y encallamiento de buques (Young et al, 2012; NOAA 2014) En la última década se han establecido zonas de hábitat críticos en algunas zonas dentro del caribe como Puerto Rico, Islas Vírgenes y la Florida, mientras tanto en México el arrecife Limones ubicado dentro del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAMP), fue declarado en el 2013 hábitat crítico para esta especie, por lo que las actividades turísticas y pesqueras fueron restringidas (Rodríguez-Martínez et al. 2014; NOA 2015).

Agentes de estrés y condición de los arrecifes.

Los ecosistemas marinos se encuentran sometidos a múltiples presiones ambientales, los recientes aumentos en la temperatura del agua, así como la acidificación de los mares, la acción de huracanes, aunados a las contaminantes derivadas de las actividades humanas han generado por consecuencia; que los arrecifes de coral sean considerados como uno de los ecosistemas más amenazados (Glowka et al. 1996; Hernández-Terrones et al. 2011). El desarrollo costero y la agricultura intensiva, afectan al ecosistema coralino aportando sedimentos y desechos (principalmente desechos nitrogenados) al ambiente marino, esto sumado a la pérdida de los ecosistemas adyacentes a las costas (Gladfelter 1982; Patterson et al. 2002). Por otro lado, la sobre explotación pesquera genera un desbalance entre las comunidades de peces disminución en muchos casos las poblaciones de herbívoros, esto consecuentemente desencadena un aumento de la cobertura de macroalgas y disminución de las poblaciones de coral (Burke et al, 2005). Asimismo, el aumento en la temperatura del agua y la radiación solar, han generado eventos de blanqueamiento en los corales, donde debido a las altas temperaturas la simbiosis entre el coral y el dinoflagelado *Symbiodinium sp.* se ve afectada; resultando en la expulsión del alga simbiote con lo que el coral pierde el color de sus tejidos (de ahí el nombre blanqueamiento), condición que puede causar la muerte del coral si se prolongase el evento (Davy et al, 2012).

Efectos del desarrollo costero en el ecosistema coralino

La contaminación de las aguas subterráneas es una consecuencia de las actividades humanas que puede ser la amenaza más discreta para los ecosistemas costeros (Lapointe et al. 1990). En regiones kársticas como Florida y la Península de Yucatán, el agua puede infiltrarse rápidamente hacia los mantos acuíferos y a las complejas redes de ríos subterráneos cuyos destinos son poco claros. Éstos generalmente desembocan en el manglar cerca de la costa o dentro de la laguna costera en forma de “Ojos de agua” (Fig. 1), por ende el riesgo que conlleva la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos es alto y el peligro que representa la liberación de estas aguas a la costa es aún mayor (Lapointe et al. 1990).

El aumento de las poblaciones humanas en las costas del Caribe se ve acelerado en la costa este de la Península de Yucatán, donde las tasas de incremento poblacional llegan a ser hasta del 14% al año en algunas áreas (Hernández-Terrones et al. 2011). Esto conlleva a un aumento en el consumo de agua, donde en sitios como Puerto Morelos, una comunidad costera al norte del Estado de Quintana Roo, que tiene un acelerado crecimiento turístico y carente de un sistema colector de aguas residual además de un número de plantas para el tratamiento de aguas residuales insuficientes para la creciente población, el impacto en la costa puede ser aún mayor. En esta población el agua residual es colectada en su mayoría por fosas sépticas domésticas las cuales eventualmente filtran sus contenidos al subsuelo y posteriormente estos son liberados a la costa (Hernández-Terrones et al. 2011)(Fig.1).

El impacto de la eutrofización, es decir, el incremento en el suministro de nutrientes y/o contaminantes en un ecosistema debido a la acción del hombre sobre los sistemas costeros, en algunos casos, ha llegado a causar un cambio en las dinámicas poblacionales de los organismos generando así, un desequilibrio entre las comunidades arrecifales como cambios de fase o de dominancia (Haynes et al. 2007; Kaczmarek et al. 2005). En organismos frágiles como los corales que dependen de la claridad del agua para realizar la fotosíntesis, el estrés producido por la eutrofización del agua se ve exacerbado por las amenazas globales como el incremento en la temperatura del agua de

los océanos y la acidificación de los mares (Ward et al. 2006; Lesser et al. 2007), afectando las complejas relaciones simbióticas dentro de los corales haciéndolos más vulnerables a la aparición de afecciones. Varios estudios proponen una relación entre el incremento de nutrientes proveniente de la costa debido a la contaminación por aguas negras y la alteración de las comunidades de bacterias marinas que tienen como resultado la degradación del sistema coralino y la aparición de enfermedades de coral (Burke et al, 2005; Kaczmarzky et al, 2005). Por consiguiente, las descargas de aguas residuales al mar podrían funcionar como una fuente de patógenos al sistema (Patterson et al. 2002; Kaczmarzky et al. 2005; Redding et al. 2010), aunque esta relación sigue siendo poco clara, haciendo esta relación uno de los aspectos menos comprendidos de las enfermedades de coral (Kaczmarzky et al.2005).

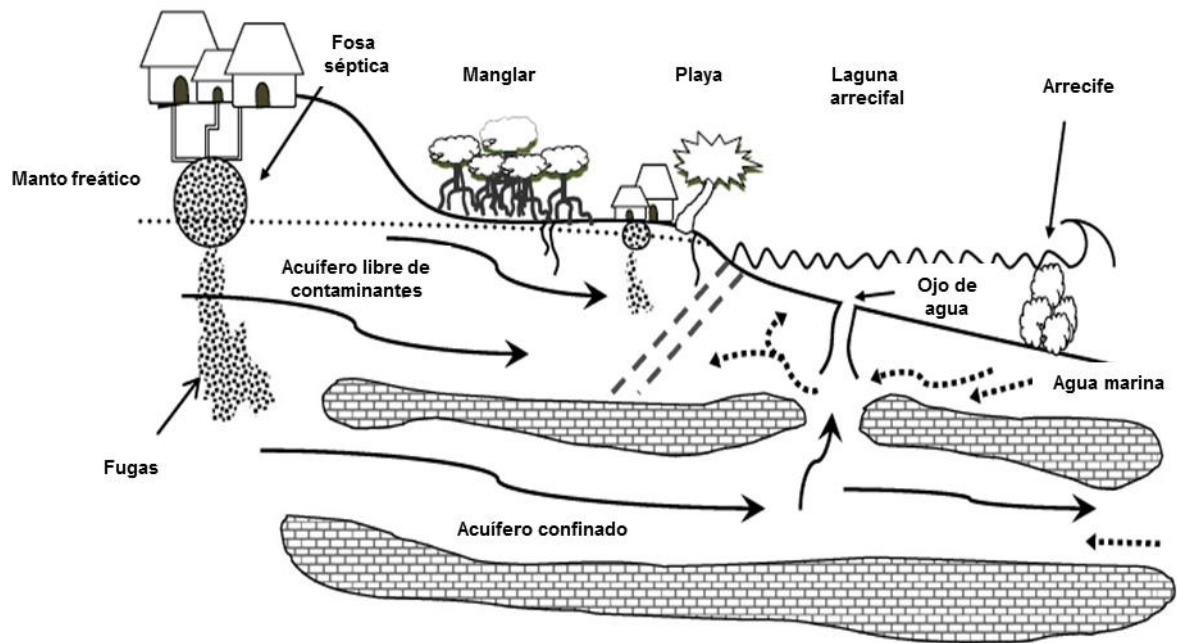


Figura 1. Flujo de nutrientes y contaminantes en el subsuelo kárstico a la laguna arrecifal a través del intrincado sistema de acuíferos de la península de Yucatán. Tomado de Hernández-Torres et al, 2010.

Enfermedades de Coral.

En los últimos 30 años se han registrado los mayores cambios en los arrecifes de coral muchos de los cuales tiene relación con las enfermedades en los corales, el escaso conocimiento acerca de los factores que desencadenan las

epizootias por lo que las enfermedades de coral representan un gran reto para la ciencia (Burke et al. 2005). Una enfermedad de coral puede definirse como una condición anormal de un organismo que resulta en una disfunción fisiológica, asociado con síntomas y signos específicos, donde participan tres actores principales: un huésped, un agente y el medio ambiente (Raymundo et al. 2008; ICRI/UNEP-Wcmc 2010). Estas pueden ser potencialmente destructivas causando grandes mortalidades, reducción de la fecundidad y/o tamaño, siendo particularmente nocivas en áreas fragmentadas o altamente amenazadas (Hess 1996; Ward et al. 2006).

En el caso de las enfermedades de coral se pueden dividir en dos grandes grupos, por su agente causal: las bióticas donde el agente causal es de origen microbiano, como hongos, bacterias, virus y/o consorcios microbianos; y las abióticas en las cuales no se encuentra un agente microbiano asociado, pero generan un impacto perjudicial al organismo donde las presiones ambientales juegan un rol fundamental para su desarrollo (Rosenberg y Kushmaro 2010; Raymundo et al. 2008). En el 2015 la Global Coral Disease Database reconoce 27 enfermedades de coral en el mundo, siendo la región de Caribe la que presenta la mayor cantidad de reportes (Global coral disease data base s.f.). En el 2005, Burke y Maidens reportan que en el Caribe las 3 enfermedades con mayor cantidad de registros son: la enfermedad de la banda blanca, la enfermedad de la banda negra y la plaga blanca.

Las enfermedades de Acropora palmata

Para *A. palmata* se han identificado dos principales enfermedades bióticas: la enfermedad de la banda blanca y la enfermedad de la viruela blanca ambas enfermedades son endémicas del Caribe y en su conjunto han protagonizado grandes epizootias en las últimas décadas, llevando a sus poblaciones a un nivel crítico.

La enfermedad de la banda blanca únicamente afecta a las tres especies de *Acropora* del Caribe (*A. palmata*, *A. cervicornis* y *A. prolifera*). Ésta se caracteriza por una lesión de color blanco en forma de anillo que se mueve de la base al ápice, dejando el esqueleto expuesto a la colonización de otros organismos. Este

padecimiento es bastante complicado debido a que se puede subdividir en dos formas tipo I y tipo II, las cuales difieren entre sí por una banda de tejido blanqueado debido a la pérdida del *Symbiodinium*, adyacentes a la banda de tejido muerto, en el caso del tipo II. En ambos casos la identificación del patógeno no ha sido concluyente debido a que no se han podido aislar efectivamente un agente causal que cumpla con los postulados de Koch¹ (Kline y Vollmer 2011; Rosenberg y Kushmaro 2011; Sweet et al 2014). Debido a esto en el presente estudio se abordará como una sola enfermedad.

En cuanto a la enfermedad de la viruela blanca, se sabe que solo afecta a *A. palmata* y *A. prolifera* (Rodríguez-Martínez et al. 2001). Ésta se caracteriza por generar manchas blancas irregulares sin tejido en la colonia. El patógeno causante de esta enfermedad es la enterobacteria *Serratia marcescens*, comúnmente asociada a heces fecales humanas y aguas residuales (Sutherland et al. 2010; Patterson et al. 2002; Weil y Hooten 2008). Esta enfermedad fue identificada por primera vez en los cayos de Florida en 1992 con una alta prevalencia y una tasa de mortalidad alta (88%). Sutherland et al, 2010 mostraron que la cepa bacteriana causante de la viruela blanca, era común en aguas residuales, playas con altas tasas de contaminación por residuos orgánicos, canales desagüe. Además, se encontró dentro de depredadores de coral, el caracol *Coraphillia abbreviata* y el gusano de fuego *Hermodice carunculata*, los cuales podrían funcionar como vectores de esta y otras enfermedades de coral. La dispersión de la viruela blanca fue ampliamente devastadora generando altas mortalidades en todo el caribe, los reportes para Florida, Islas vírgenes, Bahamas y Jamaica muestran que para estos sitios la epizootia de la viruela blanca se había dispersado con gran rapidez en las poblaciones locales (Muller et al. 2008; Rogers y Muller 2012).

Estudios demuestran que tanto la enfermedad de la banda blanca como la viruela blanca se encuentran ampliamente distribuidas en el Caribe. Sin embargo, estudios recientes muestran que la enfermedad de la viruela blanca tiene una mayor prevalencia que la enfermedad de la banda blanca (Mayor et al. 2006;

¹ Postulados de Kock: 1) El patógeno bacteriano debe ser aislado únicamente a partir de individuos sanos, 2) La bacteria debe de poder ser aislada en un cultivo puro, 3) Si la bacteria se inocula en otro individuo debe de producirse la enfermedad, 4) La bacteria debe poder aislarse nuevamente en un cultivo (*Sensu* Koch, 1882)

Muller et al. 2008; CONANP 2011). Desde la aparición de la enfermedad de la banda blanca en los años 70s su prevalencia e incidencia ha disminuido pues se considera que llegó a afectar entre el 80% y 70% de las poblaciones de *A. palmata* en el Caribe (Rodríguez-Martínez et al. 2001). En México, el primer registro de la enfermedad de la viruela blanca se generó en 1998 en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos. Esta enfermedad se presentó en 7 de las 81 colonias censadas en los 4 cuatro transectos de 100m², estas presentaron una pérdida de tejido de hasta el 90% en el año 2000 así como la estrecha relación entre el aumento de la temperatura y la gravedad de la enfermedad (Rodríguez-Martínez et al. 2001). Ward et al (2012) muestran que en México la incidencia de enfermedades de *A. palmata* es alrededor del 5%, mientras tanto en la reserva de Sian'kan en el monitoreo realizado en el 2011 se encontró un solo registro de banda blanca en la reserva y 50 registros de viruela blanca de las 663 colonias estudiadas (CONANP 2011). Rodríguez-Martínez y colaboradores en el 2014 encontraron que en el arrecife de Limones; un arrecife ubicado en el extremo norte del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, la prevalencia de enfermedades era del 1% en la enfermedad de la banda blanca, mientras que en la viruela blanca era del 14.7 %; además encontró que las enfermedades estaban relacionadas con la talla de las colonias siendo las colonias más grandes las más afectadas por las enfermedades.

Kaczmarzsky et al (2005) realizaron un estudio en Saint Croix (Islas Vírgenes, E.U.) donde compararon la prevalencia de enfermedades de coral plaga blanca tipo II y banda negra en dos sitios similares en su ecología y geología sin embargo, uno de ellos se encuentra expuesto a la contaminación por aguas residuales (1460/100 mL coliformes fecales) mientras que el otro se encuentra libre de contaminantes (0/100 mL coliformes fecales). Ellos reportan una mayor prevalencia en el sitio expuesto a las aguas residuales, donde 7 de las 10 especies estudiadas resultaron con una prevalencia de enfermedades significativamente mayor, en términos generales el sitio expuesto a las aguas residuales tuvo una prevalencia del 13.6% mientras que el otro presentó un 3.7%. Asimismo, estudiaron la relación entre el tamaño de la colonia y la prevalencia de enfermedades encontrando que en la mayoría de las especies presentan una relación positiva significativa entre estas variables. Además, en

este mismo estudio buscaron indicios de contagio de las enfermedades por medio de relacionar la densidad de colonias con la prevalencia, no encontrando relación significativa entre estas variables, aunque encontraron evidencia visual que sugiere un posible contagio.

Por otra parte, Redding et al (2010) realizaron un estudio en la isla de Guam donde estudiaron el impacto de los nutrientes derivados de las aguas residuales en la severidad de enfermedad de la banda amarilla en *Porites spp.* Ellos utilizaron como parámetro el $\delta^{15} \text{N}$ disuelto en los tejidos del gorgonáceo *Sinularia polydactyla* y las macroalgas: *Caulerpa serrulata* y *Halimeda micronesica*, encontrando una relación significativa entre la severidad de la banda amarilla y los niveles de $\delta^{15} \text{N}$.

En este contexto el presente estudio busca evaluar la prevalencia de enfermedades de *A. palamata* dentro del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, así como explorar su asociación con factores de disturbio que posiblemente estén favoreciendo la incidencia de enfermedades. Para esto se presenta una descripción de la distribución espacial de la incidencia de enfermedades; se evalúa la relación que tiene la incidencia de enfermedades con la densidad de colonias, la profundidad y el tamaño de la colonia; asimismo se explora el efecto de indicadores de estrés de origen antropogénico representado como la cercanía a los ojos de agua, áreas de descarga de agua provenientes del manglar y de la laguna de Nichupté y el desarrollo costero.

JUSTIFICACIÓN

El coral cuerno de Alce (*A. palmata*) es uno de los componentes principales de los arrecifes caribeños, su estructura tridimensional ramificada provee microhábitats para una gran cantidad de organismos. Este a su vez sirve como barrera natural contra el oleaje debido a su preferencia por las zonas expuestas a la dinámica oceánica, protegiendo así, otros ecosistemas como los pastos marinos y manglares. Actualmente las poblaciones de *A. palmata* se encuentra gravemente amenazadas debido a varios factores como el calentamiento global, la acidificación de los océanos, la eutrofización, el desarrollo costero y las enfermedades. Siendo ésta última la causante de las grandes mortalidades en las últimas décadas por lo tanto este trabajo busca contribuir al conocimiento actual de prevalencia de las enfermedades de la “viruela blanca” y “banda blanca” en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, así como los posibles factores que inciden en su prevalencia. Se propone una metodología para analizar espacialmente el efecto de las fuentes de aporte de nutrientes a la laguna arrecifal y el desarrollo costero en la incidencia de enfermedades coralinas; y así establecer estrategias de manejo y conservación integrales en las que no solo se centren en el organismo a proteger si no en los factores causales de las enfermedades.

HIPÓTESIS

Debido a que se sabe que las enfermedades de viruela blanca y banda blanca de *Acropora palamata* se encuentran ampliamente distribuidas en el Caribe, se espera encontrar prevalencias similares o incluso ligeramente más altas a las obtenidas en estudios anteriores en el Caribe mexicano (Ward et al. 2006; CONANP 2011; Rodríguez-Martínez et al. 2014). Esto debido a la creciente cantidad de estresores que existen en la zona como el desarrollo costero, la sobrepesca o el turismo desmedido.

Las enfermedades banda blanca y viruela blanca son enfermedades que presentan características particulares principalmente debido a su agente causal, esto puede verse reflejado en los factores que las regulan, por lo que se espera que mientras la enfermedad de la banda blanca está altamente relacionada con el estrés térmico, pueda estar subrogada a factores que puedan favorecer esta condición. Por otro lado, la enfermedad de la viruela blanca, al ser su agente causal una bacteria asociada a heces fecales y aguas residuales humanas; se espera que su prevalencia sea mayor en zonas con un alto desarrollo costero o se vean afectadas por fuentes de aporte de nutrientes.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la prevalencia de las enfermedades de la banda blanca y viruela blanca en *A. palmata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos?

¿La cercanía con el Desarrollo Costero o a los aportes de agua y nutrientes a la costa tienen algún efecto en la prevalencia la banda blanca y viruela blanca?

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la prevalencia de enfermedades banda blanca y viruela blanca en las poblaciones de *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM); así como su relación con las fuentes de aporte de nutrientes y contaminantes a la laguna arrecifal.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Describir la condición general de las enfermedades banda blanca y viruela blanca de *A. palmata* en el PNAMP
2. Analizar el efecto de variables talla de las colonias, densidad de colonias y profundidad que pudieran intervenir en la prevalencia de enfermedades.
3. Obtener la información de la ubicación geográfica de los ojos de agua, desembocaduras del manglar y canales
4. Generar un índice para evaluar el impacto del desarrollo del desarrollo costero sobre los arrecifes del PNAPM.
5. Analizar el efecto de la cercanía a las fuentes de aporte de agua dulce y nutrientes a la laguna arrecifal así como al desarrollo costero sobre la prevalencia de enfermedades de *A. palmata*.
6. Analizar el efecto conjunto de las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero sobre la prevalencia de enfermedades, así como determinar cuál de estas variables son las que presenta mayor efecto sobre la prevalencia de enfermedades de *A. palmata*

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica dentro del área del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM), localizado al noroeste de la Península de Yucatán, dentro del municipio de Benito Juárez en el poblado de Puerto Morelos, colindando al Norte con la ciudad de Cancún y al sur con Playa del Carmen (Fig. 2). Este parque marino se encuentra bañado por las cálidas aguas del Caribe. El arrecife Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos es tipo barrera y pertenece al sistema arrecifal mesoamericano (SAM), este corre paralelo a la costa de Puerto Morelos, este se puede dividir en 3 zonas estructurales (Jordan-Dahlgren 1978). i) La laguna arrecifal: se localiza entre el arrecife y la costa, su ancho varía entre 350 y 1600 m y su profundidad fluctúa entre 2 y 6 m. El fondo está cubierto principalmente por pastos marinos principalmente *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme* y macroalgas. ii) La cresta arrecifal se localiza entre la zona lagunar y el arrecife, su extensión oscila entre 50 y 200 m aproximadamente mientras que la profundidad fluctúa entre 1 y 3m. Esta zona la mayor cobertura y diversidad específica de escleractinios siendo las especies dominantes *A. palmata*, *Orbicella anularis*, *Porites asteroides*, *Agaricia agaricites* y *Pseudodiploria strigosa*, aunque pueden existir zonas dominen los pastos y algas marinas. iii) El arrecife frontal, es la zona más somera del arrecife. Su extensión oscila entre 30 y 100 m y su profundidad entre un 0.5 y 1.5 m aproximadamente. La cobertura coralina tiende a ser intermedia entre las zonas posterior y frontal. El coral dominante es *A. palmata*.

Condiciones ambientales

El clima de Puerto Morelos es cálido-subhúmedo con lluvias marcadas en verano y otoño. La temperatura promedio anual es de 26.3°C. La temporada de huracanes comprende de junio a noviembre mientras que la de nortes de octubre a mayo, asimismo los vientos alisios soplan durante los meses de febrero a junio, mientras que entre los meses de julio a septiembre se produce una época de “calmas” donde el oleaje disminuye (Coronado et al. 2007).

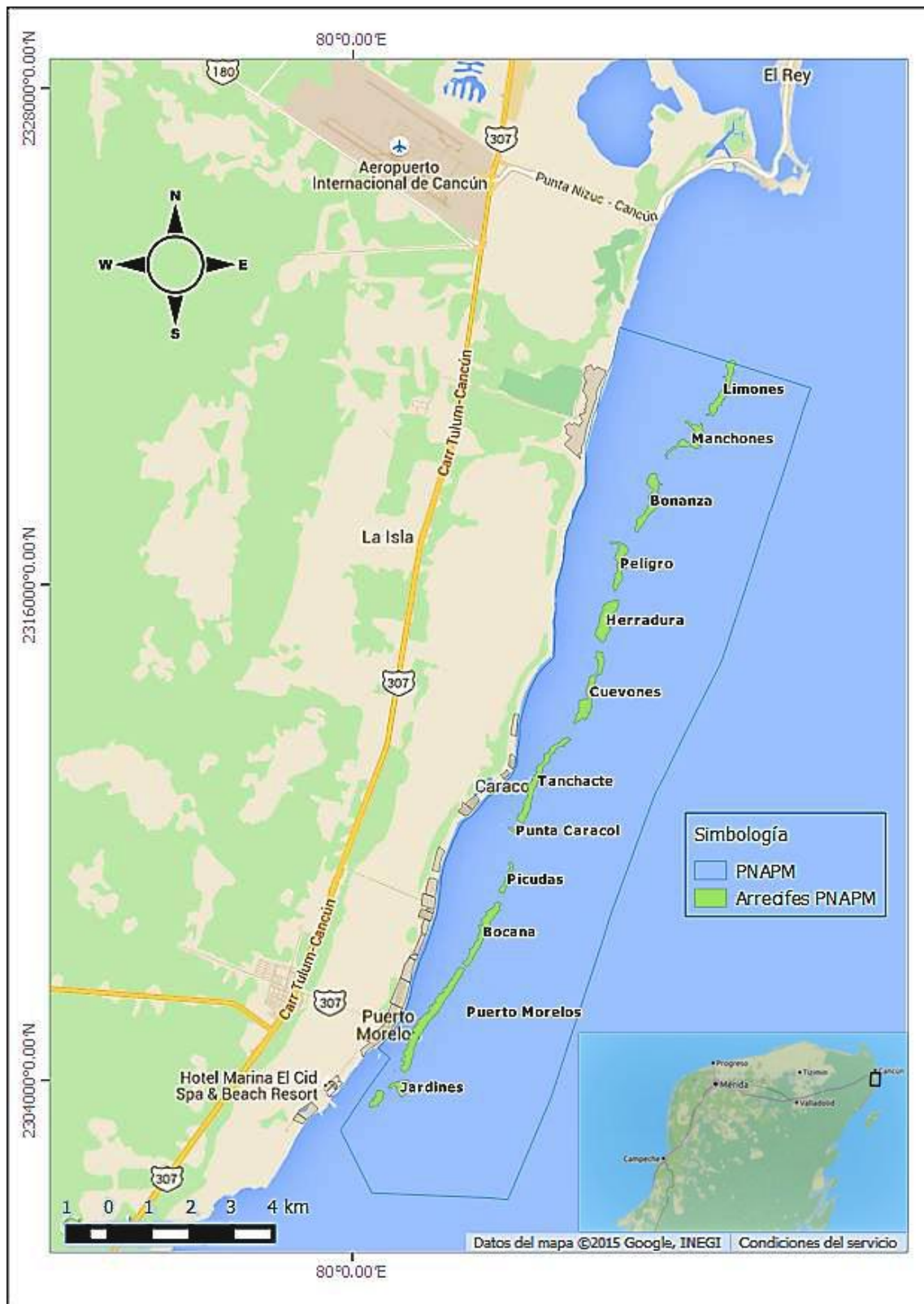


Figura 2. Mapa del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, Q. Roo, México. La Línea azul representa el polígono del Parque. El recuadro en la parte inferior derecha representa la ubicación del parque en la península de Yucatán. Mapa obtenido a partir de los servidores de Open Layer Map, Google 2015.

El régimen de mareas es semiduro mixto, con un intervalo de oscilación de un día de 20 a 30 cm con una marea máxima anual de aproximadamente 50 cm (Rodríguez-Martínez 1998). La principal corriente oceánica es la corriente de Yucatán, la cual corre paralela a la costa con dirección sur-norte con una velocidad de 25-100 m/s (Coronado et al. 2007; Rodríguez-Martínez 1998).

Actividades antropogénicas

La población de Puerto Morelos es de 9188 habitantes (INEGI, 2010), históricamente su población ha aumentado drásticamente en los últimos 35 años pasando de 222 habitantes en 1980 mientras que diez años después llegó a ser de 649 habitantes, para que finalmente en el 2005 fuera de 9502 habitantes es decir en 35 años la población ha aumentado en casi un 430 % (Cuadro 1.). Asimismo, la ocupación del territorio se comportó de la misma manera pasando de 592,000 m² en 1980 hasta 1,822,500 m² en 2005 (Maldonado y Robles 1970).

La zona urbana de Puerto Morelos se subdivide en dos zonas, la costera (Javier Rojo Gómez) y la urbana (Joaquín Zetina Gasca), estas se encuentran divididas por una zona de manglar. La zona Javier Rojo Gómez es donde se encuentran ubicados los hoteles y la mayor parte de los negocios asociados al turismo. Asimismo, gran parte de las viviendas ubicadas en esta zona son destinadas para alquiler (principalmente para extranjeros) o funcionan como vivienda temporal para periodos vacacionales. Por ende, la población flotante en esta zona es muy grande a comparación de la población local que habita en esta zona. Por otro lado, la zona urbana Joaquín Zetina Gasca, es donde se encuentra la mayor parte de la población local.

Cuadro 1. Crecimiento poblacional de las principales comunidades de Quintana Roo entre 1980 y 2005. Se conjuntaron las colonias de Joaquín Zetina y Javier Rojo Gómez que conforman actualmente la comunidad de Puerto Morelos. La última columna muestra el porcentaje incremento poblacional en 20 años. Modificado de Maldonado y Robles 2010

<i>Localidad</i>	Población			% de incremento
	<i>1980</i>	<i>1990</i>	<i>2005</i>	<i>1980-2005</i>
Alfredo V. Bonfil	848	2,696	13,822	1529.95
Bacalar	4,590	6,923	9,833	114.23
Calderitas	1,451	3,610	4,446	206.41
Cancún	33,273	167,730	526,701	1482.97
Chetumal	56,709	94,158	136825	141.28
Chunhuhub	2,396	3,453	3,928	63.94
Cozumel	19,044	33,884	71,401	274.93
Dziuche	1,627	2,249	2,728	67.67
Felipe Carrillo Puerto	6,980	12,704	21,530	208.45
Isla Mujeres	3,164	6,708	11147	252.31
José María Morelos	3,518	6,476	10,424	196.30
Kantunilkin	3,378	4,534	6,383	88.96
Leona Vicario	1,377	2,432	5358	289.11
Nicolás Bravo	1,979	2,916	3,653	84.59
Playa del Carmen	737	3,098	100,383	13520.49
Puerto Morelos	222	698	9502	4180.18
Tihosuco	2,855	3,354	4,607	61.37
Tulum	540	2,111	14,790	2638.89

El 60% de la población de Puerto Morelos depende económicamente directa o indirectamente del arrecife. Entre los principales usuarios están los prestadores de servicios turísticos náuticos y los pescadores. Dentro de esta comunidad existen 13 establecimientos que dan servicio de buceo, snorkel y pesca deportiva. La sociedad cooperativa de pescadores de Puerto Morelos cuenta con 17 socios y 11 embarcaciones; sin embargo el número total de pescadores es variable pues cada socio puede trabajar con más personas (Rodríguez-Martínez 1998).

La capacidad Hotelera de Puerto Morelos es de 3638 cuartos de Hotel de los cuales 7 tienen la categoría de “Gran Turismo”, 7 con la categoría “cinco estrellas” mientras que 4 son de la categoría de tres estrellas y 2 con “dos estrellas”.

En Puerto Morelos el acceso a drenaje es limitado por ende la mayor parte de la población cuenta con fosa séptica, mientras que los residuos restantes son llevados a una de las tres plantas de tratamiento primario que existen en la comunidad donde el agua que es tratada es reinyectada al subsuelo a unos 60m de profundidad. Lo mismo sucede con los principales hoteles del puerto los cuales cuentan con planta de tratamiento primario y sus aguas tratadas son reinyectadas al acuífero a unos 70m-100m de profundidad.

Por otro lado la ciudad de Cancún ciudad vecina de Puerto Morelos tienen una población de 628 306 habitantes (INEGI 2010) donde para el 2001 tan solo el 60% de la población contaba con acceso a drenaje donde gran parte de los desechos producido por la ciudad y su complejo turístico son tirados al sistema lagunar de Nichupté (Prospero Villan 2001).

MATERIAL Y MÉTODOS

Prevalencia de enfermedades en A. palmata en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos

Los datos de la prevalencia de enfermedades de *A. palmata* se obtuvieron a partir del “Diagnostico y estado de Conservación de la Poblaciones de *A. palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos” como parte del proyecto de Conservación de Especies en Riesgo (PROCER-CONANP) el cual tiene como objetivo: Determinar la distribución y el estado de conservación de *Acropora spp.* dentro del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (Álvarez-Filip y Banaszak 2014).

Los datos generados por el citado proyecto fueron obtenidos de la siguiente manera. Primeramente, se ubicó geográficamente los parches de *Acropora spp.* dentro del PNAPM, para esto se delimitaron las áreas potenciales donde este género de coral pudiera hallarse considerando una profundidad entre los 0 y 10 m, así como sitios que se encontraran dentro de lo que se denominan estructuras arrecifales (Gladfelter 1982; Bruckner 2002). Con este fin se utilizaron imágenes satelitales (Google Earth), sistemas de información geográfica (SIG) en conjunto con los generados por la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (Cerdeira-Estrada et al. 2012; CONABIO, 2015). Con la información generada se realizaron archivos de información geográfica SIG para su fácil ubicación en el campo.

A continuación, con los datos arrojados de la búsqueda de hábitats potenciales, se procedió a su muestreo en el campo, para ello se utilizó el protocolo Manta Tow, el cual consiste en muestrear un área determinada deslizándose en el agua usando equipo de snorkel mientras se es remolcado por una lancha, cuando las condiciones de profundidad lo permitían, en caso contrario el muestreo se realizó a nado libre (Fig. 3). En cada sitio potencial se realizaron al menos dos transectos con el fin de cubrir toda el área de este. Los transectos fueron paralelos a la costa y separados entre sí por una distancia de entre 30 y 100 m dependiendo de las condiciones ambientales (visibilidad, oleaje y corrientes).



Figura 3. Metodo de arrastre Manta Tow. Foto: Erendira de la Rosa Pimentel

Durante el muestreo se registraron todos los parches de *Acropora* que fueran mayores o iguales a $\sim 100 \text{ m}^2$. Asimismo, fueron registrados su contornos y georreferenciados como archivo vectorial con la ayuda de un GPS (Garmin modelo: GPSMAP 78s). El protocolo para georreferenciar el contorno de cada parche consistió en realizar un recorrido a nado libre por el perímetro haciendo el registro con ayuda de un GPS resguardado dentro de una caja estanca. Posteriormente en cada uno de los parches observados, se registró la densidad de colonias definidas en tres categorías (Fig.4): (C) baja densidad, donde existe un número reducido de colonias de *Acropora* separadas por un máximo de 3 m entre sí; (B) Densidad media, se refiere cuando el parche contiene colonias que están en contacto directo así como por colonias aisladas entre sí por una distancia no mayor a 3 m; (A) Alta densidad, cuando la mayoría de las colonias están en contacto directo y su separación entre ellas es menor a 1 m. De esta manera el protocolo de muestreo generó una base de información con los parches de $\sim 100 \text{ m}^2$ con los cuales se generaron polígonos para representar el área de cada parche en formato "Shape file", a esta base de información a la cual se hará mención en los apartados siguientes será mediante el nombre de "parches".

Para obtener la información de la prevalencia de enfermedades se muestreo el $\geq 10\%$ del área de los parches a manera tener una muestra estadísticamente representativa. Esto consistió en generar puntos de muestreo aleatorios georeferenciados, los cuales consisten en círculos de 12.5m^2 (4 m de diámetro). El número de puntos, así como localización geográfica de dichos puntos fueron determinados en el programa ArcGis 10.0, mediante el comando puntos aleatorios, por lo que fueron georeferenciados considerando los límites y el área de cada parche.

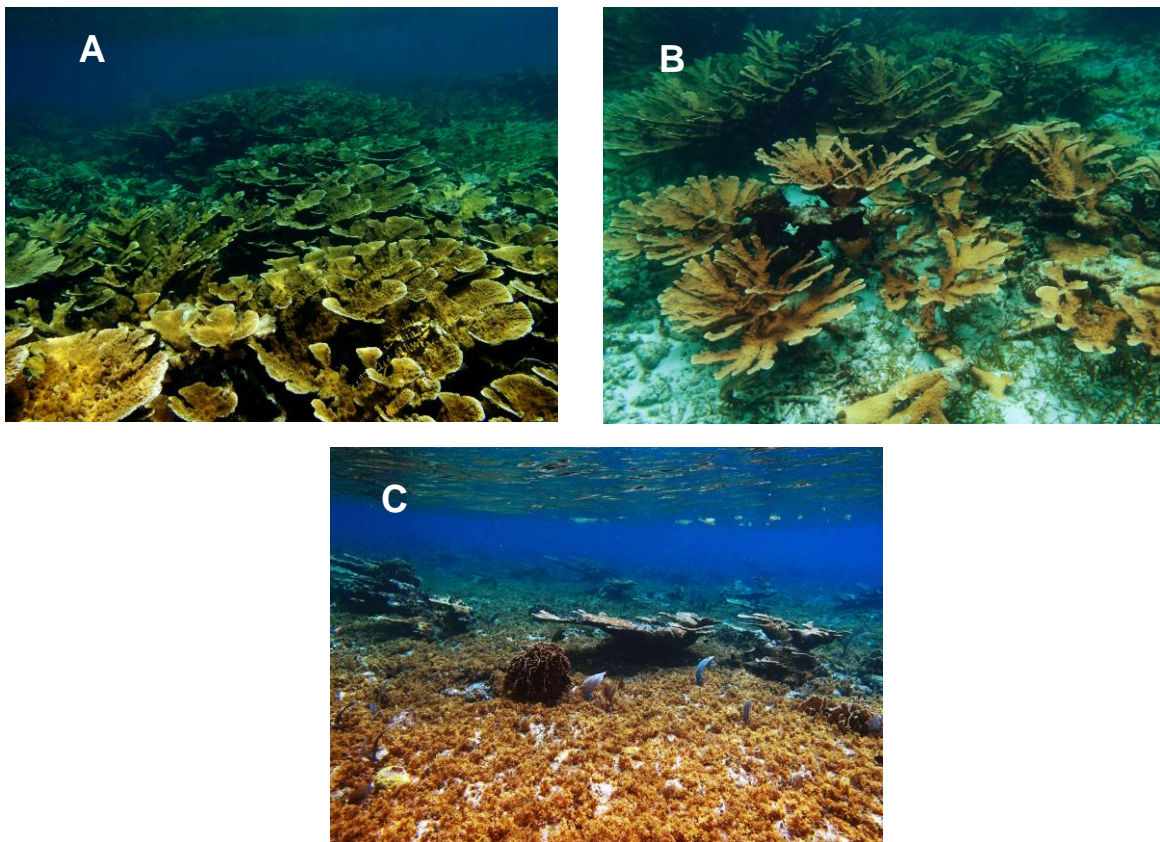


Figura 4. Categorías de parches según su densidad de colonias de *A. palmata*. **A)** Alta densidad. **B)** Densidad media **C)** Baja densidad.

En campo una vez ubicados los puntos de muestro mediante GPS, el muestro consistió en que una persona con ayuda de equipo de snorkel y GPS, censó cada colonia de *A. palmata*, registrando datos de localización, talla, (diámetro mayor, diámetro menor y altura), profundidad, así como la presencia de enfermedades; para esto se utilizaron las tarjetas Submarinas para la Evaluación

de la Salud en Coral Arrecifes del Caribe de Weil (2008), por lo que las enfermedades registradas representan “Síndromes similares” los mostrados en los mismos . Además, fueron tomados los datos de otros tipos de lesión en la colonia. Toda esta información generada de los puntos de muestreo y las colonias censadas, se conjuntó en base de datos en el software Microsoft Excel 2013 a las cual se harán referencia en los próximos apartados con el nombre de “puntos” y “colonias”.

A causa de lo anterior se generaron distintos niveles de información; i) arrecife, el cual contiene la información de cada uno de las estructuras arrecifales en las que se realizaron la búsqueda de los parches de *A. palmata*, ii) parche, contiene la información de las áreas punto y colonia. Donde el arrecife corresponde al áreas de las denominadas estructuras arrecifales (Gladfelter 1982; Bruckner 2002) el cual está conformado por varios parches, el nivel de parches corresponde a los polígonos generados a partir de la identificación de agregaciones *A. palmata*, el nivel de punto ataña a los puntos de muestreo generados dentro de los parches, por último el nivel de colonias es la información de cada una de las colonias censadas.

Localización de posibles fuentes puntuales y no puntuales de aporte de nutrientes

Ojos de agua

Para la localización de los ojos de Agua se hizo una consulta en las bases de datos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y del Servicio de Hidrología y Meteorología de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales (UASA), UNAM. Aunado a esto y con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posibles se realizó una salida de campo realizada el día 7 de febrero del 2015 para la búsqueda de ojos de agua no registrados, este recorrido fue mediante el apoyo del personal de guardaparques del PANPM. Para esto se realizó una búsqueda intensiva en bote (4 horas) a lo largo del PANPM, en donde el que realizaba el muestreo buscaba desde la embarcación zonas donde

el agua del mar se notara turbia y/o presentará alguna anomalía en la capa superficial (presencia de burbujas, espuma, etc.) del mar. Una vez divisado el punto se procedía a su corroboración, colocando la embarcación lo más cercano posible al punto se identificaban desde de la superficie algunas características de éstos como: la presencia de un olor a azufre, la presencia de una estela oligohalina y si la visibilidad lo permitía, la identificación visual de la apertura del ojo de agua. En algunos casos cuyas características no eran tan evidentes se corroboró mediante el uso snorkel. Una vez corroborada la presencia del Ojo de Agua se marcaba su localización mediante el uso de un GPS. Con los datos obtenidos de la CONANP y en campo se elaboró una base de datos georeferenciada para su posterior análisis

Descargas de agua de los humedales y canales al PNAPM.

Para obtener la ubicación de las desembocaduras de los humedales (manglar) tomaron en cuenta los puntos registrados por Velázquez-Olimán en el 2013 así como los obtenidos mediante imágenes aéreas del programa GoogleEarth Pro (versión 7.1.2) principalmente las imágenes tomadas tras el impacto del huracán Wilma en octubre del 2005. En éstas se observan todos los ingresos de agua de manglar a la laguna arrecifal siendo identificadas por la aparición de riachuelos con una clara tonalidad café en a la zona de la playa; cuando éstas no eran lo bastante evidentes se verificaba con la presencia de estelas de agua color marrón en el mar cerca de estos. A cada uno de los puntos identificados se le registro su ubicación geográfica para su procesamiento.

Desarrollo costero

El desarrollo costero es el reflejo de varios factores: crecimiento de la población, aumento de las actividades pesqueras, agrícolas, industriales y turísticas (Burke y Maidens 2005). Por lo que para obtener un estimado del desarrollo costero se utilizó el número de escusados, como medida estándar para equiparar la población local y el turismo. Se optó por el número de baños como medida

estándar debido a varios factores; primero, porque existe una gran cantidad de población flotante Puerto Morelos, por lo que esta medida garantiza una estimación fiable de esta población y la población local. Segundo se optó por este indicador debido a que es uno de los indicadores urbanos tomados por el INEGI. Tercero, este indicador está directamente implicado en la cantidad de aguas residuales producidas por el desarrollo costero. Cuarto este parámetro puede ser equiparado fácilmente para el desarrollo hotelero con el número de habitaciones de cada hotel. Para esto se utilizaron dos bases de datos: (i) el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI a través de su portal: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/ageburbana/default.aspx> (ii) Desarrollo Hotelero proporcionado por la Asociación de Hoteles de Puerto Morelos 2014.

De manera que partiendo de la premisa de que cada habitación de hotel cuenta con al menos un escusado, se utilizó el número de habitaciones de cada hotel como valor. Asimismo, se utilizó la variable “número de casas con acceso a sanitario” proporcionada por el punto (i), la cual nos proporcionó el número de casas que tienen acceso a este servicio en cada cuadra. Debido a que los datos proporcionados por el INEGI son del 2010, muchas de las cuadras no contaban con información o su información era imprecisa, se procedió a actualizarlos a mediante un censo donde se estimó el número de sanitarios. Para esto se utilizó como parámetro por cada planta de casa/habitación: es igual a dos sanitarios, en el caso de departamentos o estudios, se les contabilizó como unitarios. Asimismo, se tomaron por separado los datos correspondientes al Muelle Fiscal y al Campamento tortuguero debido a que el acceso es restringido y no representan un zona habitacional.

Integración de la información en un sistema de Información Geográfica (SIG)

Bases de datos de A. palmata

Con las bases de datos obtenidos durante los muestreos de *A. palmata* (arrecifes, parches, puntos y colonias) se generaron archivos espaciales (Shapefile) con el programa QGIS versión 2.6.1, estos fueron proyectados en el sistema de referencia de coordenadas WGS84/UTM zona 16N. Estos fueron de representados de distintas maneras según la naturaleza de las bases de datos,

para el nivel de información de “colonias” y “puntos” fueron representados como archivos shape de puntos, mientras que en el caso del nivel de información de arrecifes y parches generaron archivos shape de tipo polígonos. Para referirnos a estos archivos utilizamos el nombre de “capa”.

Además, de las capas descritas anteriormente se obtuvo un nivel de información diferente, el cual consistió en generar una gradilla de 100 por 100 m de toda la zona muestreada. Inicialmente se generó una gradilla de 100 por 100 m que cubriera todo el polígono del PNAAPM mediante la función cuadrícula vectorial, la cual genera una cuadrícula con la extensión de la capa, formada por celdas de las dimensiones deseadas. Posteriormente, utilizando a partir de la ubicación espacial de cada una de las colonias censadas en el presente estudio, se procedió a usar la herramienta de corte en la cual se usó como capa vectorial de entrada a la gradilla, mientras que la capa de corte la capa que corresponde a las colonias. Esto dio como resultado una capa con celdas de 100 x 100 m que incluyen la información de las colonias que se encuentran dentro del área de la celda.

Para realizar los análisis espaciales se utilizaron los niveles de información “Celdas” y “Parches”, esto debido a que dichos niveles de información representan la distribución de las colonias en áreas delimitadas, donde el nivel “Celdas” representa agregaciones espaciales de las colonias de *A. palmata* en cuadros de una hectárea, mientras que los parches son las agregaciones de colonias observadas durante el muestreo, por lo tanto ambos niveles brindan áreas delimitadas de distribución evitando con esto la aparición de pseudo replicas, asimismo brinda tamaños de muestra aceptables para obtener la prevalencia enfermedades.

Bases de datos de fuentes de aportes de nutrientes

En el caso de las fuentes de aportes de nutrientes se generaron archivos shapefile para cada uno: ojos de agua, desembocaduras de manglar y desembocadura de río. Dichas capas fueron de tipo puntos con una proyección de referencia de coordenadas WGS84/UTM zona 16N.

Desarrollo Costero

Para obtener los polígonos correspondientes al desarrollo costero, primero se obtuvo la capa vectorial de las “Áreas Geostadísticas Básicas” (AGEB) de Puerto Morelos del sistema de “Cartografía Geoestadística Urbana” disponible en <http://buscador.inegi.org.mx/>, la cual contiene los polígonos correspondientes a los polígonos del área urbana de Puerto Morelos, a la cual se le integró la información previamente consultada y homogeneizada. Se decidió solo utilizar el área correspondiente a la zona de Javier Rojo Gómez y aledaños a la costa. Posteriormente se dividieron los polígonos correspondientes a las zonas que carecían de población según los datos reportados en el censo de población y vivienda (INEGI 2010), asimismo se recortó el área correspondiente a los hoteles cuyos polígonos eran mayores a una hectárea y que se encontraban en dichos AGEB.

Para la identificación geoespacial de los Hoteles de Puerto Morelos se utilizó el software Google Earth Pro (versión 7.1.2) con el cual se identificaron las ubicaciones de los hoteles proporcionados por Asociación de Hoteles de Puerto Morelos 2014. Seguido a esto se utilizó el complemento para QGIS, Open Layers Plugin versión 1.3.6, el cual permite obtener mapas de diversos servidores como Google, Bing, MapQuest y anexarlos como capa al proyecto de Qgis actual. Con esto se obtuvo una capa con el mapa satelital de Puerto Morelos proporcionado por Google con este mapa se pudo trabajar con lo obtenido previamente en el programa Google Earth. Con el fin de tener una capa con los polígonos correspondientes a los hoteles se generó una capa nueva, con la cual se delimitaron las áreas de cada hotel previamente identificados, a los cuales se le agregó los datos de nombre del hotel, número de cuartos, un número de identificación. Cabe destacar que para los hoteles de que se encuentran dentro del área urbana de Puerto Morelos, sus datos únicamente fueron sumados a los del su AGEB correspondiente.

Por último teniendo ambas capas AGEB y hoteles junto con su información se realizó una fusión entre capas, a la cual posteriormente se le calcularon, sus

áreas y un código numérico para su identificación. Con esto se obtuvo una capa única la cual contiene la información de ambas capas (hoteles y desarrollo urbano). Esta fue capa de desarrollo costero fue guardada en una proyección de coordenadas WGS84/UTM zona 16N.

Evaluación del efecto de la cercanía a fuentes de aporte de nutrientes sobre la incidencia de enfermedades

Para evaluar el efecto de las fuentes de aporte de nutrientes se tomaron en cuenta 4 variables: La distancia promedio a los ojos de agua, el número de ojos de agua en un radio de 2 km, el número de desembocaduras de manglar en un radio de 2 km y la distancia al canal de Nichupté (Fig. 5). La variable distancia promedio a los ojos de agua pretende evaluar el efecto de la distancia a los ojos de agua en un punto dentro del arrecife, para esto se obtuvieron los centroides de las capas de celdas y parches mediante la función “Centroide de polígonos” del programa QGIS, el cual arroja el centroide geométrico de cada uno de los objetos de la capa seleccionada, posteriormente se obtuvo la distancia promedio de cada centroide a los ojos de agua esta se obtuvo mediante la función “matriz de distancias” con el programa QGIS cual nos permitió saber el promedio de la distancia de cada celda o parche a los ojos de agua (Fig. 5A). Asimismo, se tomó el número de ojos de agua y desembocaduras de manglar en un radio de 2.1 km para evaluar el efecto de la cantidad de fuentes de aporte de nutrientes en una zona crítica de influencia (Anexo 1), sobre un área del arrecife, para ello se generó un buffer de 2.1 km a partir de las capas de celdas y parche. Seguido de esto se utilizó la función “Puntos en polígonos” la cual permite contar la cantidad de puntos (en este caso ojos de agua o desembocaduras de manglar) y exportarlo como atributo en una capa nueva todo esto mediante el software QGIS (Fig. 5B).

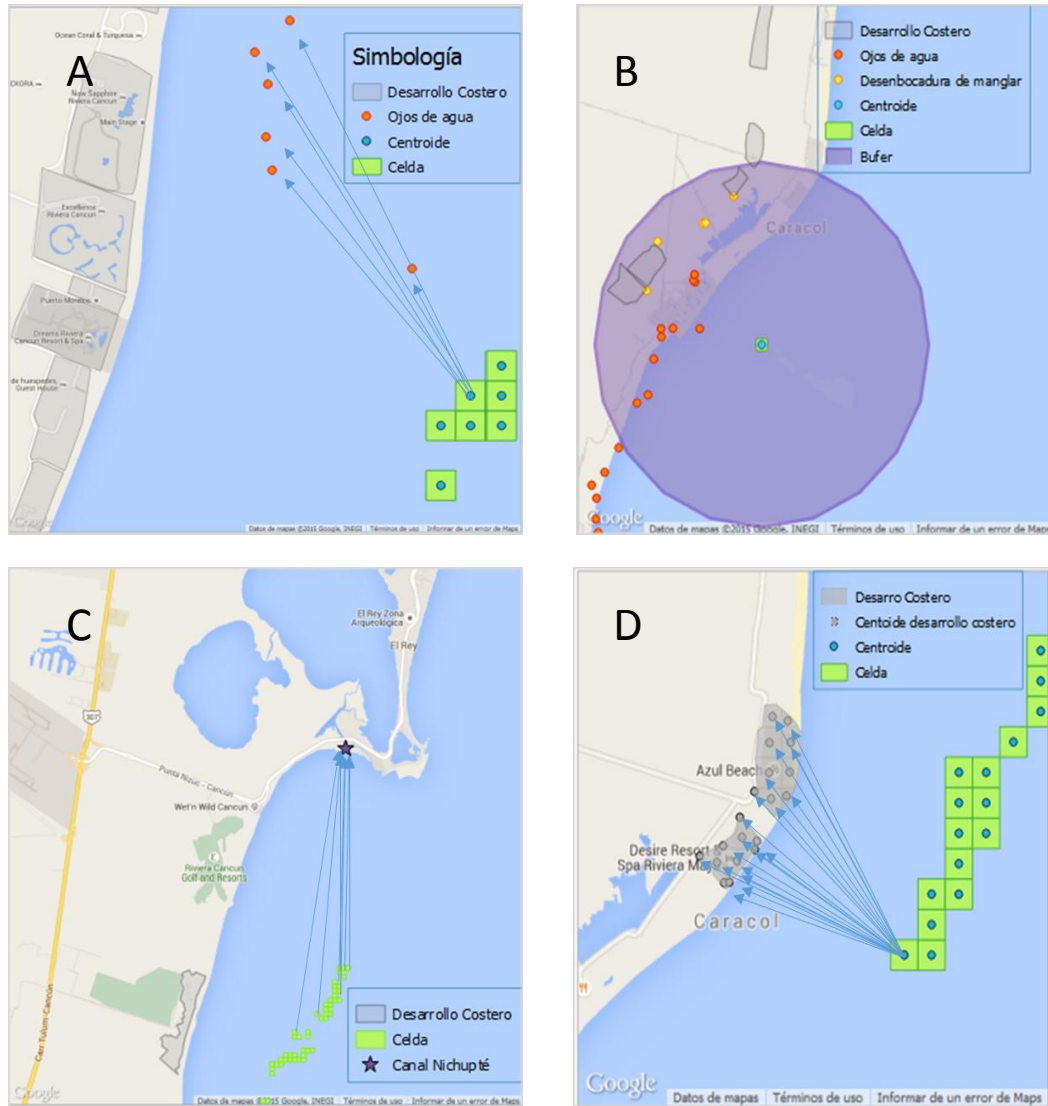


Figura 5. Representación gráfica de las variables espaciales para evaluar el efecto del aporte de nutrientes a la laguna arrecifal y el efecto del desarrollo costero. Se usó el nivel de celdas únicamente de manera demostrativa ya que se utilizó el mismo método en a nivel de parche. **A)** Distancia promedio al ojo de agua, los puntos azules representan el centroide el cual sirvió como punto de referencia de cada celda para tomar la distancia a los ojos de agua. **B)** Distancia al canal de laguna de Nichupté de cada centroide de celda o parche. **C)** Buffer de 2km para contabilizar el número de ojos de agua en ese radio, esta misma metodología se utilizó para las desembocaduras de manglar. **D)** Impacto del desarrollo costero, se utilizó el promedio del número de baños sobre la distancia al cuadrado de cada celda del arrecife a la celda de desarrollo urbano.

Por último, se tomó la distancia al canal de Nichupté para evaluar el efecto que tiene la descarga de aguas de este sistema lagunar sobre el arrecife, para esto se utilizó la función “Matriz de distancias” con el programa QGIS (Fig.5C).

Índice de impacto del desarrollo costero

Para medir el impacto del desarrollo costero se diseñó un índice que midiera el efecto de las áreas de desarrollo costero sobre un punto en el arrecife. Para esto se utilizó la capa de desarrollo costero previamente generada mediante las capas de AGEB y Hoteles. Seguido a esto se generó una gradilla de 100m por 100m mediante la función cuadrícula vectorial, la cual genera una cuadrícula con la extensión de la capa mediante el software QGIS. Posteriormente se procedió a usar la herramienta de corte en la cual se usó como capa vectorial de entrada a la gradilla mientras que la capa de corte la capa del desarrollo costero, debido a que los cortes generaron polígonos complejos es decir con partes faltantes se utilizó la herramienta “Multipartes a partes sencillas”, esta opción nos permitió separar polígonos que quedaron con huecos o unidos a partes de otros polígonos. Posteriormente con el área de cada celda se calculó su número de baños, esto multiplicando el número de baños del hotel o AGEB y posteriormente dividiendo entre el área del hotel o AGEB, a continuación, se transformó cada una de las celdas en puntos mediante la herramienta “Centroide” esta generó un punto en el centro del área de un polígono, a los cuales se obtuvo sus coordenadas y un identificador numérico.

Los datos fueron analizados en Matlab mediante la siguiente fórmula para estimar el impacto del desarrollo costero:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{b}{d_i^2} \right) = \frac{\left(\frac{b}{d^2} \right)_1 + \left(\frac{b}{d^2} \right)_2 + \left(\frac{b}{d^2} \right)_3 + \dots + \left(\frac{b}{d^2} \right)_n}{n}$$

Donde:

D=Índice de impacto desarrollo costero

b=Numero de baños por unidad de área

d= distancia promedio del punto del arrecife a los puntos de desarrollo costero

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

x_i = Longitud en coordenadas UTM del punto en el arrecife

x_j = Longitud en coordenadas UTM del punto de desarrollo costero

y_i = Latitud en coordenadas UTM del punto en el arrecife

y_j = Longitud en coordenadas UTM del punto de desarrollo costero

Este índice está basado en el promedio de la distancia euclidiana al cuadrado entre un punto dentro del arrecife y un punto dentro del desarrollo esto dividido entre el número de baños asociado a cada punto en el arrecife. En el modelo se utilizó el cuadrado de la distancia debido a que el desplazamiento de los nutrientes en el espacio es bidimensional al igual que los datos utilizados para realizarlo (Fig. 5D). El índice está desarrollado para que mientras más cercano del desarrollo costero se encuentre la celda o parche así como tenga una cantidad de baños alta, arroje valores altos, mientras que cuando la celda o parche se encuentre más lejos o esta tenga un numero bajo de baños, dará un valor bajo, siempre influyendo más la distancia que el número de baños. Este índice se propone como un indicador de la influencia que tiene el desarrollo costero sobre las poblaciones de *Acropora palmata*.

Análisis estadístico

Para analizar la relación entre las variables espaciales (distancia promedio al ojo de agua, numero de ojos de agua, numero de desembocaduras de manglar, distancia al canal de Nichupté así como el índice de Desarrollo costero) con la incidencia de enfermedades, se realizaron regresiones lineales ponderadas; estas fueron ponderadas con el número de colonias para evitar que los porcentajes dados por un bajo número de colonias tuvieran un efecto amplio dentro del análisis (Crawley 2013). Para el análisis se utilizó el software estadístico R CORE TEAM (2013).

A causa de que el índice de desarrollo costero arrojó una clara división en la distribución de la influencia en el PNAPM se procedió analizar el efecto de estas zonas en la prevalencia de enfermedades mediante una prueba de t en el software Past versión 2.17c, no sin antes comprobar que los supuestos de normalidad fueran cubiertos mediante una prueba de Shapiro.

Se realizó un análisis de componentes principales para analizar la influencia de las variables sobre la prevalencia de enfermedades, así como cuales de estas son las que tienen un mayor efecto sobre el sistema. Para esto se utilizó el software estadístico PAST versión 2.17c. Posteriormente se procedió a analizar la influencia del primer componente principal (PC) con la prevalencia de enfermedades mediante una regresión lineal ponderada en el software R (2014).

RESULTADOS

Los protocolos de identificación registraron un total de 7,398 colonias de *A. palmata* repartidos en 132 parches en los distintos arrecifes del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM; Fig. 1). Muestreando un área total de 2,969,811 m². Además, se registraron 76 colonias de *A. cerviconis* y 16 *A. prolifera*. El arrecife con mayor número de colonias fue “Limonos” con 2,174 seguido de “Bocana” con 1,049 siendo el arrecife “La Pared”, el cual no presentó ningún registro (Cuadro 1.)

El porcentaje de prevalencia de enfermedades en el PNAMP fue del 9.74%, siendo viruela blanca la enfermedad con mayor representación con el 5.94%, mientras que la banda blanca fue del 3.79%; además de estos se encontró evidencia de otro tipo de lesión que afecta a las colonias de *A. palmata* (Cuadro 1) con una prevalencia mínima (0.054%) dentro del parque es decir solo cuatro colonias presentaron este tipo de lesión. Cabe destacar que las colonias de *A. cervicornis* y de *A. prolifera* no presentaron ningún síntoma de enfermedad. En términos generales el arrecife con mayor proporción de enfermedades fue “Cuevones” con un porcentaje de prevalencia del 17.28 % mientras que el arrecife con mayor número de prevalencias fue Limonos con 213 colonias con signos de enfermedad (de un total de 2,177 colonias). El arrecife que presentó un menor número de prevalencia fue “Muelle fiscal” con ningún registro de enfermedad seguido del arrecife “Peligro” con un 0.03 % de prevalencia.

Los resultados muestran que la enfermedad ligeramente más abundante fue viruela blanca en el polígono del parque, así como entre los arrecifes (Fig. 4), teniendo su mayor prevalencia en el arrecife “Manchones” con un porcentaje de 11.16% seguido de “Bonanza” con el 8.7% Aunque la prevalencia banda blanca en el parque es en general baja ($\leq 5\%$), se registró un área especial de concentración de esta enfermedad donde llegó a ser del 11.6% en el arrecife Cuevones.

Cuadro 2. Características de cada Arrecife del PNAPM. Información obtenida del “Diagnóstico y estado de Conservación de la Poblaciones de *A. palmata* en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos” (Álvarez-Filip & Banaszak 2014). .Se muestra la cantidad de colonias, puntos de muestreo y parches de *A.palmata* registrados durante el muestreo en campo, así se muestra el área del arrecife y la cantidad de colonias enfermas de *A.palmata*

Arrecife	No. Colonias	No. Puntos	No. Parches	Área del arrecife m ²	Banda blanca	Viruela blanca	Otras enfermedades	Colonias enfermas
LIMONES	2177	256	19	216,969.38	76	136	1	213
MANCHONES	953	117	23	186,360.29	8	106	0	114
BONANZA	198	19	3	273,019.56	2	17	0	18
PELIGRO	131	15	3	205,601.93	2	2	0	4
HERRADURA	151	11	3	274,639.35	1	5	0	6
CUEVONES	867	109	14	302,793.72	100	49	2	149
TANCHACTE	635	81	14	331,522.50	6	33	0	39
PUNTA CARACOL	87	7	4	23,558.62	0	3	0	3
PICUDAS	678	72	6	79,501.61	22	17	1	40
BOCANA	1055	143	16	278,708.32	55	54	0	108
PUERTO MORELOS	527	96	15	821,807.71	8	16	0	24
MUELLE FISCAL	8	1	1	74.74	0	0	0	0
JARDINES	31	4	4	75,206.24	1	2	0	3
PNAPM	7498	931	125	3,069,763.96	281	440	4	721

Prevalencia de enfermedades según las tallas

El censar las colonias de *A. palmata* se obtuvieron las tallas de cada colonia, tomando tres parámetros dimensionales (largo, ancho y alto), encontrando tallas que van desde los 2 cm hasta los 500 cm en el caso del largo, mientras que en el ancho van desde 1.5 cm hasta los 410 cm y en el caso de la altura es de 1 cm a 256 cm.

Según las alturas registradas de cada colonia, se generaron 6 clases de tallas con intervalos de 50 cm entre cada una (0 a >250 cm), de manera que fuesen más fácil la visualización de la información. Se encontró que la clase de talla con mayor presencia dentro del PNAMP es de 0-50 cm en todas los parámetros (largo, ancho y largo) teniendo la mayor parte de las colonias dentro de este clase principalmente en los parámetros de ancho y alto con (5,215 y 6,143 colonias respectivamente) mientras que la menor representación fue la clase de talla de >250 cm con 8 colonias en el caso del ancho y 1 en el caso del alto, no

así en el caso del largo la menor cantidad de colonias por clase de talle se encontró en la clase 201-250 cm con 58 colonias.

Al relacionar las clases de tallas con la prevalencia de enfermedades se pudo encontrar una clara tendencia donde las colonias de mayor tamaño se ven más afectadas por las enfermedades (Fig. 6), llegando a tener hasta un 22.4 % de prevalencia de viruela blanca en una de las tallas mayores (201-250 cm) y la menor prevalencia en la clase de talla más pequeña (0-50 cm) con un 2.59% la cual presenta el mayor número de colonias (3,625). En el caso de la banda blanca también se encontró que existe una tendencia positiva entre la talla y el porcentaje de colonias enfermas, aunque con menor escala que la viruela blanca donde la mayor prevalencia se encontró en la clase de talla de 201-250 cm con 10.34% y la menor se encontró en la talla de 0-50cm con 2.04%.

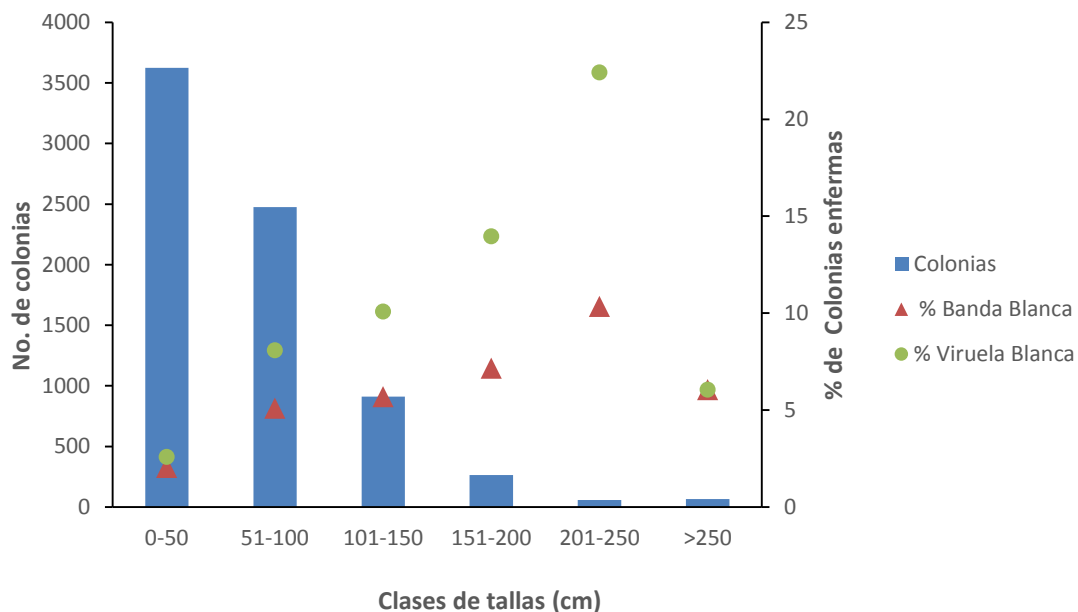


Figura 6. Porcentaje de colonias enfermas por clase de talla. Las barras muestran la cantidad de colonias en cada clase de talla, mientras que los puntos y triángulos muestran el porcentaje de colonias con banda blanca y viruela blanca respectivamente.

Densidad de colonias y enfermedades

La densidad de las colonias en el PNAMP fue muy variada yendo desde el 0.1 hasta los 2.9 ind/m² los arrecifes con un mayor promedio de densidad fueron

Herradura y Punta Caracol con 1.09 (± 0.81 D.E.) y 0.98 ind/m² (± 0.63 D.E.) respectivamente (Cuadro 3) siendo los que menor porcentaje de enfermedad de banda blanca presentaron con 0.66% (± 0.3 E.D.) y 0% respectivamente, asimismo fueron de los arrecifes con menores porcentajes de viruela blanca 3.31% (± 1.5 E.D.) y 3.44% (± 0.78 E.D.). Mientras tanto las menores densidades se encontraron en Puerto Morelos y Bocana con 0.43 (± 0.25 E.D.) y 0.58 ind/m² (± 0.4 E.D.) que presentaron una prevalencia de enfermedades variada principalmente Puerto Morelos que tuvo porcentajes de prevalencia bajos con respecto al promedio general con 1.51 (± 0.31 E.D.) para la banda blanca y 3.03 (± 0.45 E.D.) mientras que Bocana presento un porcentaje de prevalencia alto con respecto al promedio en la enfermedad de la banda blanca 5.21% (± 0.82 E.D.) y ligeramente bajo para la viruela blanca con 5.11 (± 0.86 E.D.).

Al graficar el porcentaje de prevalencias en 6 categorías densidad (Fig. 7), las enfermedades reaccionaron de distinta manera a la densidad poblacional pero siempre con tendencia hacia las menores densidades. Se puede apreciar que la banda blanca se concentra en las categoría central 1.0-.1.5 ind/m² (Fig.7 A), seguido de una disminución la de la prevalencia hacia las categorías de mayor densidad, mientras que viruela blanca tiene una preferencia por las menores densidades entre 0.1 y 1.0 ind/m² (Fig.7 B).

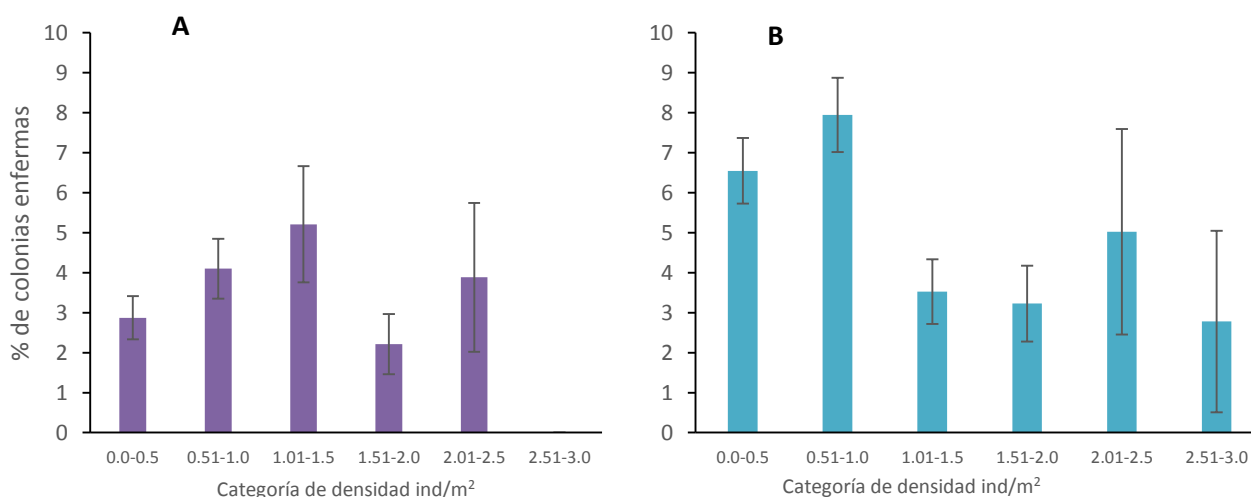


Figura 7. Porcentaje de prevalencia de enfermedades de A. palmata por categoría de densidad (ind/m²) de colonias en cada punto de muestreo (\pm E.E). A) Enfermedad de la banda blanca B) Viruela blanca. Números junto a las barras representan el N en cada categoría de densidad.

Cuadro 3. Promedio de densidad ind/m² por arrecife además se muestra el porcentaje de prevalencia de enfermedades por arrecife así como por el PNAMP

Arrecife	No. Colonias	Promedio de Densidad ind/m ²	Desvest ind/m ²	% Banda blanca	Desvest Banda blanca	% Viruela blanca	Desvest Viruela Blanca
BOCANA	1055	0.59	0.40	5.21	0.82	5.12	0.86
BONANZA	198	0.83	0.48	1.01	0.46	8.59	1.76
CUEVONES	867	0.63	0.40	11.53	2.40	5.65	0.99
HERRADURA	151	1.09	0.82	0.66	0.30	3.31	1.51
JARDINES	31	0.62	0.35	3.23	0.50	6.45	1.00
LIMONES	2177	0.68	0.48	3.49	1.09	6.25	1.19
MANCHONES	953	0.65	0.47	0.84	0.29	11.12	1.84
MUELLE FISCAL	8	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PELIGRO	131	0.70	0.51	1.53	0.35	1.53	0.35
PICUDAS	678	0.75	0.48	3.24	0.60	2.51	0.66
PUERTO MORELOS	527	0.44	0.25	1.52	0.31	3.04	0.45
PUNTA CARACOL	87	0.99	0.64	0.00	0.00	3.45	0.79
TANCHACTE	635	0.62	0.33	0.94	0.31	5.20	0.96
Total general	7498	0.64	0.44	3.75	0.44	5.87	1.15

Efecto de la profundidad en la prevalencia de enfermedades

La profundidad en la que se registraron colonias de *A. palmata* oscilo entre 0 y los 7 m. Para analizar el efecto de la profundidad en la prevalencia de enfermedades se graficó generando siete categorías una por cada metro de profundidad, esto se comparó con el porcentaje de colonias enfermedades de banda blanca y la viruela blanca (Fig. 8). Las categorías generadas mostraron, la mayor cantidad de colonias se encuentra entre dos categorías de 1-2m y 2-3m (5,604 colonias) mientras que la categoría con menor número colonias fue de 6-7m con 30 colonias.

Los resultados muestran comportamientos distintos de las dos enfermedades en el gradiente de profundidad. La incidencia de banda blanca disminuye con la profundidad; mientras que la viruela blanca presenta una clara tendencia positiva (Fig. 8). En el caso de la viruela blanca la prevalencia aumento conforme la categoría de profundidad aumenta siendo muy elevada en las categorías de mayor profundidad llegando a presentar prevalencias de hasta del 34% en la categoría de 6-7m. Mientras tanto la banda blanca muestra el valor más alto en

la primera categoría correspondiente a 0-1m de profundidad y su prevalencia decrece conforme aumenta en la categoría.

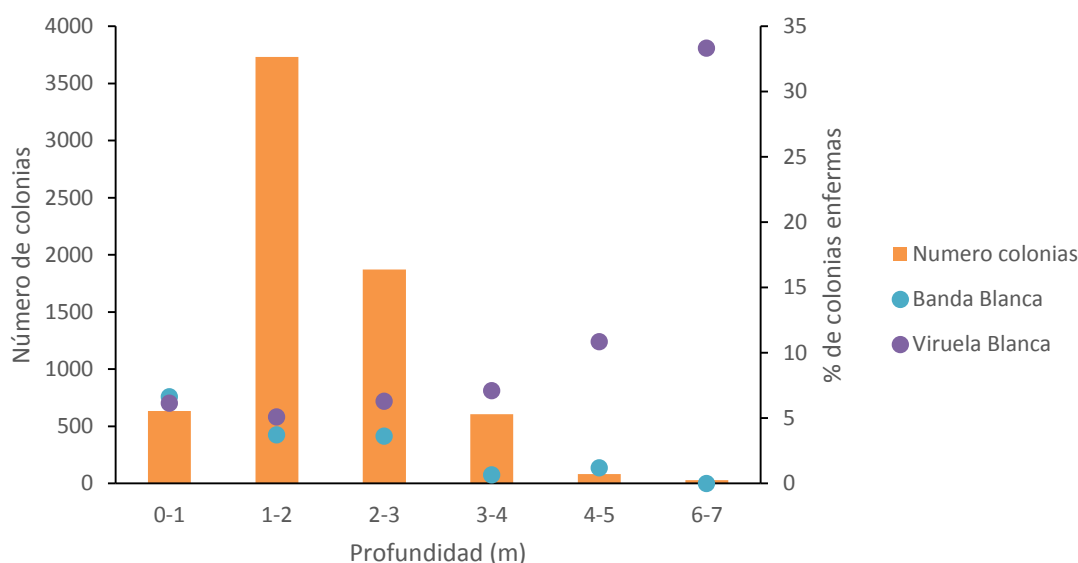


Figura 8 Prevalencia de enfermedades por metro de profundidad. Las barras amarillas muestran el total de colonias en cada intervalo de profundidad. Los puntos muestran el porcentaje de enfermedad por intervalo de profundidad en azul representan las colonias con signos de banda blanca mientras que en morado los correspondientes a la viruela blanca.

Localización de las fuentes de aporte de nutrientes y caracterización del desarrollo costero

Se localizaron 23 ojos de agua de los cuales 12 fueron proporcionados por las bases de datos del Servicio de Hidrología y Meteorología de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales (UASA) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM y la CONANP y 10 fueron obtenidos mediante los recorridos de campo (Anexo 1). La ubicación de los ojos de agua se concentra principalmente en la zona centro sur del parque que comprende los arrecifes La Bocana, Picudas y Punta caracol donde se ubica el 54% de estos (Fig. 9). Asimismo, se localizaron 15 desembocaduras de manglar las cuales se concentran en la zona centro norte del parque entre los arrecifes Cuevones y Herradura en el que se encuentra el 66% de los registros (Fig. 9).

El desarrollo costero de Puerto Morelos abarca 64 cuadras distribuidas en 2 AGEB (Área geográfica básica) y 21 hoteles con los cuales se generaron 20 polígonos. El polígono con mayor densidad baños por hectárea fue el

correspondiente al Hotel Azul Sensori con 160.87 baños/hectárea, seguido del Hotel Ocean Coral and Turquesa con 87.42 baños/hectáreas, ambos ubicados en la zona centro sur del PNAPM entre los arrecifes Tanchacte y Picudas. Asimismo, el polígono con menor densidad fue el perteneciente al campamento tortuguero el cual presenta una densidad de 0.28 baños/hectáreas, además que existe un área de gran magnitud sin desarrollo costero a partir del arrecife Tanchacte donde existen algunas viviendas a las que no es posible acceder o son zonas sin construcción (Fig. 9)

Análisis espaciales

Distancia promedio a los ojos de a los Ojos de Agua

La distancia promedio de los ojos de Agua osciló entre 2,406.81m ($\pm 2,206.92$ D.E.) y 12,194.39 m ($\pm 3,062.47$ D.E.) en el caso de los parches mientras que en las celdas fue de 2,423.94m ($\pm 2,181.80074$ D.E) a 12,222.27m ($\pm 3,058.52$ D.E). Al relacionar esta variable con la prevalencia de enfermedades mediante una regresión lineal ponderada, los resultados arrojados no fueron significativos para la banda blanca en ninguno de los dos niveles (parches y celdas), sin embargo, resulto ser significativo para la viruela blanca y todas las enfermedades en ambos niveles (Cuadro 4 y 5). Estas tuvieron una relación positiva y un R^2 que oscilo entre 0.3 y 0.4. Tomando en cuenta lo anterior nos está indicando que la prevalencia de enfermedades es mayor cuando estos se encuentran a mayor distancia de los ojos de agua.

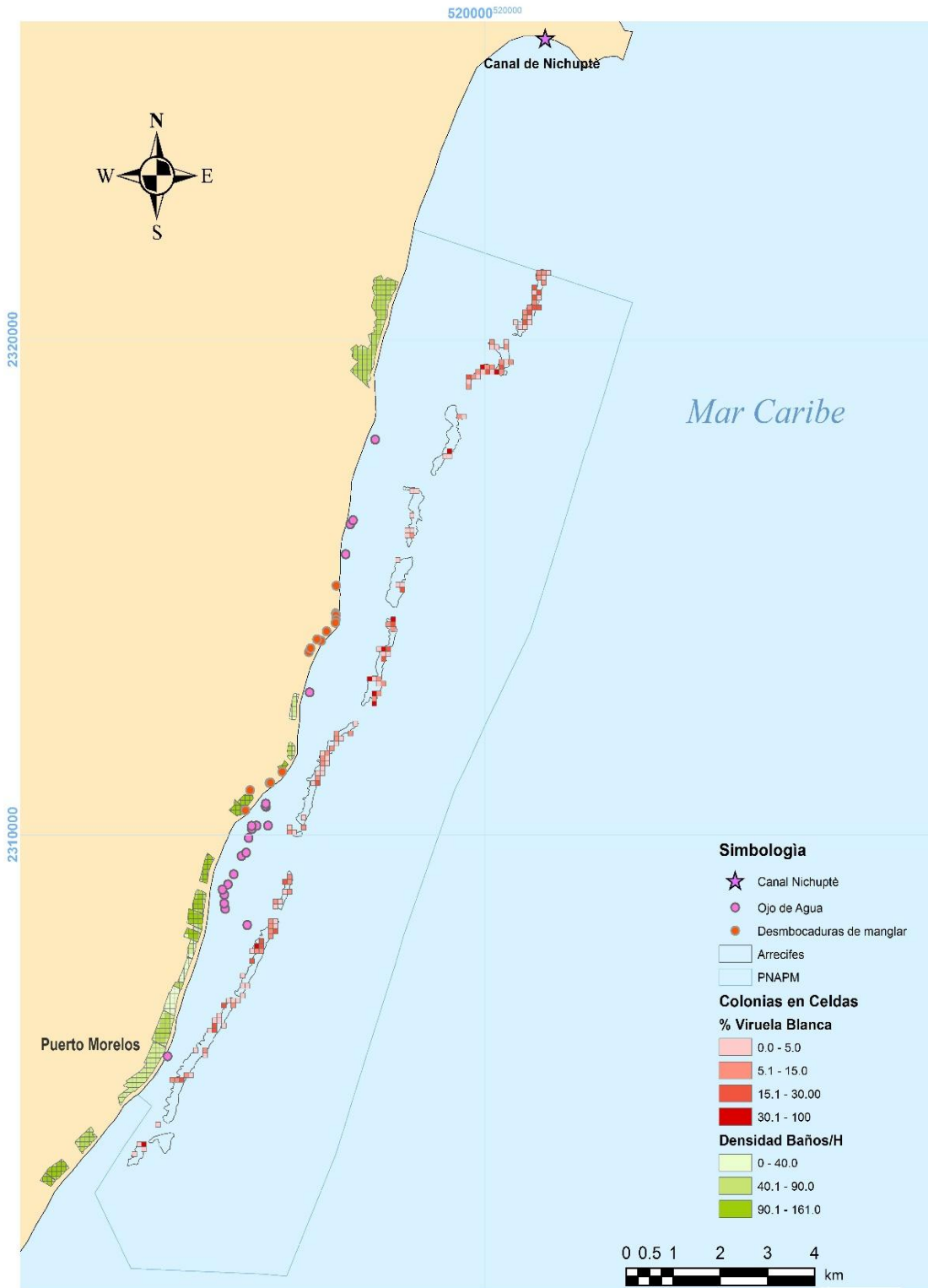


Figura 9. Prevalencia de enfermedades en celdas en 4 categorías, se muestra con líneas negras el contorno de los arrecifes. Asimismo, se muestra la ubicación espacial de los ojos de agua (puntos rosas), desembocaduras de manglar (puntos naranjas) y el canal de la laguna de Nichupté en la parte norte (estrella morada). Además, se muestran los peligros del desarrollo costero categorizado en distintos tonos de verde según el número de baños que presentan.

Numero de ojos agua en un radio de dos kilómetros

El número de ojos de agua en un radio de 2 km oscilo entre 0 y 17 en ambos casos (parches y celdas). Cabe destacar que el 34.12% de los parches no contó con algún ojo de agua en un radio de 2 km, mientras que en el caso de las celdas fue del 30.57%. En el caso de la regresión lineal ponderada solo fue significativo en el caso de viruela blanca ($p=0.14$) a nivel de celdas con una $R^2 = 0.03$ y una relación negativa (Cuadro 4 y 5). Lo que sugiere que entre mayor cantidad de ojos de agua menor es la prevalencia de enfermedades.

Numero de desembocaduras de manglar en un radio de dos kilómetros

El número de desembocaduras de manglar en un radio de 2 km oscilo entre 0 y 10 en ambos niveles (parches y celdas), de los cuales el 65.87% de los parches no tuvo ninguna desembocadura de manglar, mientras que a nivel de celdas fue del 62.42%. Al relacionar esta variable con la prevalencia de enfermedades por medio de una regresión lineal ponderada se encontró que tuvo una relación positiva significativa con la banda blanca en ambos niveles (parches y celdas; $p=0.02$ y $p=0.00$ respectivamente) además en el caso de la regresión aplicada a "Todas las enfermedades" en el nivel de celda el valor de p fue de $p=0.05$ y su R^2 es 0.02 y su relación es positiva (Cuadro 4 y 5). Esto resultados indican que los parches o celdas ubicados a un radio de 2 km de distancia que presentan un mayor número de desembocaduras de manglar están presentando una mayor prevalencia de la enfermedad de la banda blanca de *A. palmata*.

Distancia al canal de Nichupté

La distancia mínima al canal de Nichupté fue de 4,738.46 m y la mayor fue de 24,177 m a nivel de parches mientras tanto a nivel de celdas fue de 440.94 m la menor distancia y 24174.3 m. Al realizar la regresión lineal ponderada para analizar la relación entre esta variable y la prevalencia de enfermedades, los resultados arrojan que no hay relación significativa entre el número de colonias enfermas y esta variable, mismo caso se presenta en la enfermedad de la banda blanca. Por otro lado, la enfermedad de la viruela blanca resultó ser significativa en ambos niveles; parches ($p=0.009$) con un $R^2=0.053$ y celdas ($p=0.0095$) con un $R^2=0.042$, en ambos casos la relación resultó ser negativa (Cuadro 4 y 5). Por lo que existen mayor cantidad de enfermedades mientras más cercano este el arrecife del canal de Nichupté.

Cuadro 4 Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la banda blanca, viruela blanca y todas las enfermedades en conjunto realizados a nivel de Parche. Los * muestran el nivel de significancia de las regresiones.

Variables	Impacto de desarrollo costero	Distancia promedio a los ojos de agua	No. De ojos de agua en radio de 2 km	No. de Desembocaduras de manglar en radio de 2 km	Distancia al canal de Nichupté	
<i>Banda Blanca</i>	P	0.59	0.30	0.26	0.02*	0.580
	Intercepto	4.87	5.17	4.30	2.72	0.29
	Pendiente	-0.03	-0.00	-0.20	0.47	-0.00
	R²	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
<i>Viruela blanca</i>	P	0.03*	0.01*	0.84	0.15	0.00*
	Intercepto	9.45	3.20	5.90	7.00	8.89
	Pendiente	-0.09	0.00	-0.02	-0.00	-0.00
	R²	0.035	0.04	0.00	0.0	0.05
<i>Colonias enfermas</i>	P	0.03*	0.03*	0.28	0.41	0.20
	Intercepto	16.25	16.25	10.25	9.10	11.84
	Pendiente	-0.16	-0.16	-0.22	0.21	0.00
	R²	0.03	0.03	0.00	0.05	0.01

Cuadro 5. Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la viruela blanca y todas las enfermedades realizados a nivel de Celda, no se incluyen los valores de la banda blanca en esta Cuadro debido a que en ningún caso resulto sin embargo se presentan en el Anexo 3. Los * muestran el nivel de significancia de las regresiones.

Variables	Desarrollo costero	Distancia promedio a los ojos de agua	No. De ojos de agua en radio de 2 km	No. de Desembocaduras de manglar en radio de 2 km	Distancia al canal de Nichupté	
<i>Banda blanca</i>	P	0.59	0.28	0.82	0.00*	0.58
	Intercepto	4.87	5.19	3.86	2.49	0.00
	Pendiente	-0.03	-0.00	-0.02	0.65	-0.00
	R²	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
<i>Viruela blanca</i>	P	0.03*	0.01*	0.01*	0.42	0.01**
	Intercepto	9.38	3.17	6.88	6.13	8.89
	Pendiente	-0.15	0.00	-0.25	-0.14	-2.53
	R²	0.02	0.03	0.03	0.00	0.04
<i>Colonias enfermas</i>	P	0.06	0.06	0.07	0.05	0.20
	Intercepto	4.87	14.29	10.74	8.62	11.83
	Pendiente	-0.03	-0.12	-0.27	0.51	-0.00
	R²	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01

Índice de impacto del desarrollo costero

El índice de impacto del desarrollo costero el cual busca evaluar el efecto del desarrollo costero sobre un punto específico en el arrecife el cual utilizo la distancia y el número de baños como indicadores, arrojó resultados que van desde 22.11×10^{-4} hasta 62.29×10^{-4} , al aplicar la regresión lineal ponderada para relacionar el índice con la prevalencia de enfermedades, se encontró que no hubo relación significativa entre el índice de desarrollo costero y la enfermedad de la banda blanca así como al compararlo con todas las enfermedades a nivel de celdas, en contraste la viruela blanca resulto significativo en ambos niveles parches ($p=0.039$; $R^2=0.035$) y celdas ($p=0.035$; $R^2=0.027$) además de todas las enfermedades a nivel de parches ($p=0.033$; $R^2=0.03$) todas presentaron relación negativa (Cuadro 4 y 5). Lo que indicaría

que donde existe mayor desarrollo costero existen menor cantidad de enfermedades para *A. palmata*.

Los valores mostrados por el índice revelaron una tendencia a agruparse en dos diferentes unidades las cuales al ser ubicadas espacialmente; resultaron pertenecer a dos polos dentro del PNAMP (Fig. 10 y 11) donde los valores más bajos corresponden a sitios (parches o celdas) ubicados al zona norte del parque mientras que los valores más altos corresponden a sitios en el arrecife al sur, esto tomando como referencia el arrecife "Tanchacte" en el cual los datos cambian su tendencia claramente (Fig. 10 y 11). De ahí que se procedió al analizar la prevalencia de enfermedades en estas dos zonas. Para esto se realizaron pruebas de t para muestras independientes, no sin antes comprobar los que los datos cumplieran los supuestos de normalidad que requiere dicha prueba por lo que los datos se sometieron a una prueba de Shapiro. Los resultados demuestran que existen diferencias significativas entre la zona norte y la sur en la enfermedad de la viruela blanca y todas las enfermedades mientras que la enfermedad de la banda blanca no fue significativa para ninguno de los dos niveles (celdas y parches) (Anexo 5). Al graficar su prevalencia en las dos zonas se observa que existe una mayor prevalencia de enfermedades en la zona norte (Fig. 12A y 12B), de igual manera la viruela blanca tiene una mayor prevalencia en la zona norte que en el sur (Fig. 12C y 12D), no así la enfermedad de la banda blanca que no muestra una diferencia clara entre las dos zonas (Fig. 12E y 12F).

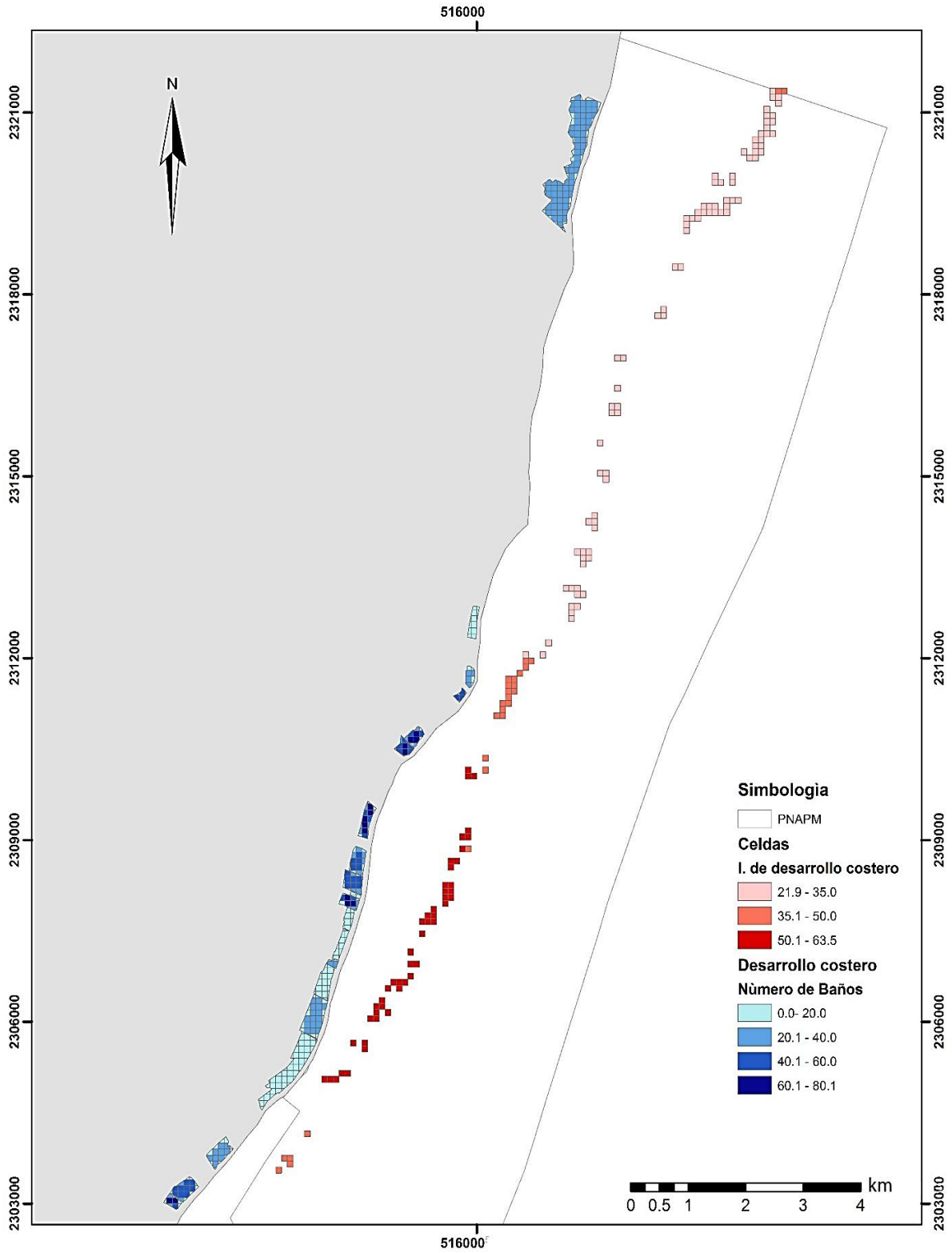


Figura 100. Mapa de celdas categorizadas con los valores del índice de impacto del desarrollo costero, la flecha muestra la zona donde se aprecia el cambio entre los grupos de datos. Además, se muestra el desarrollo costero categorizado con el número de baños por unidades de área de cada celda.

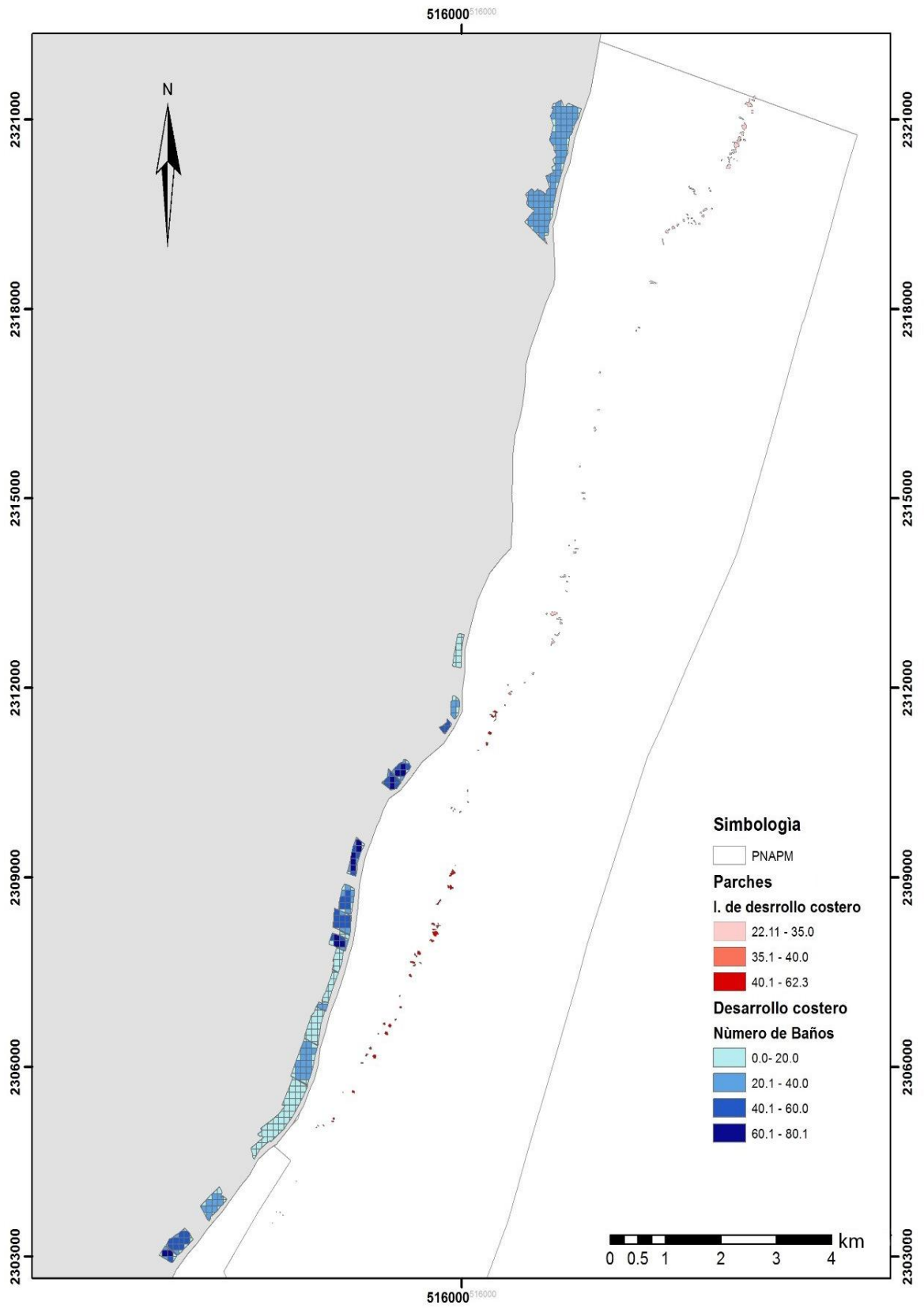


Figura 111. Mapa de parches categorizados con los valores del índice de impacto del desarrollo costero, la flecha muestra la zona donde se aprecia el cambio entre los grupos de datos. Además, se muestra el desarrollo costero categorizado con el número de baños por unidades de área de cada celda

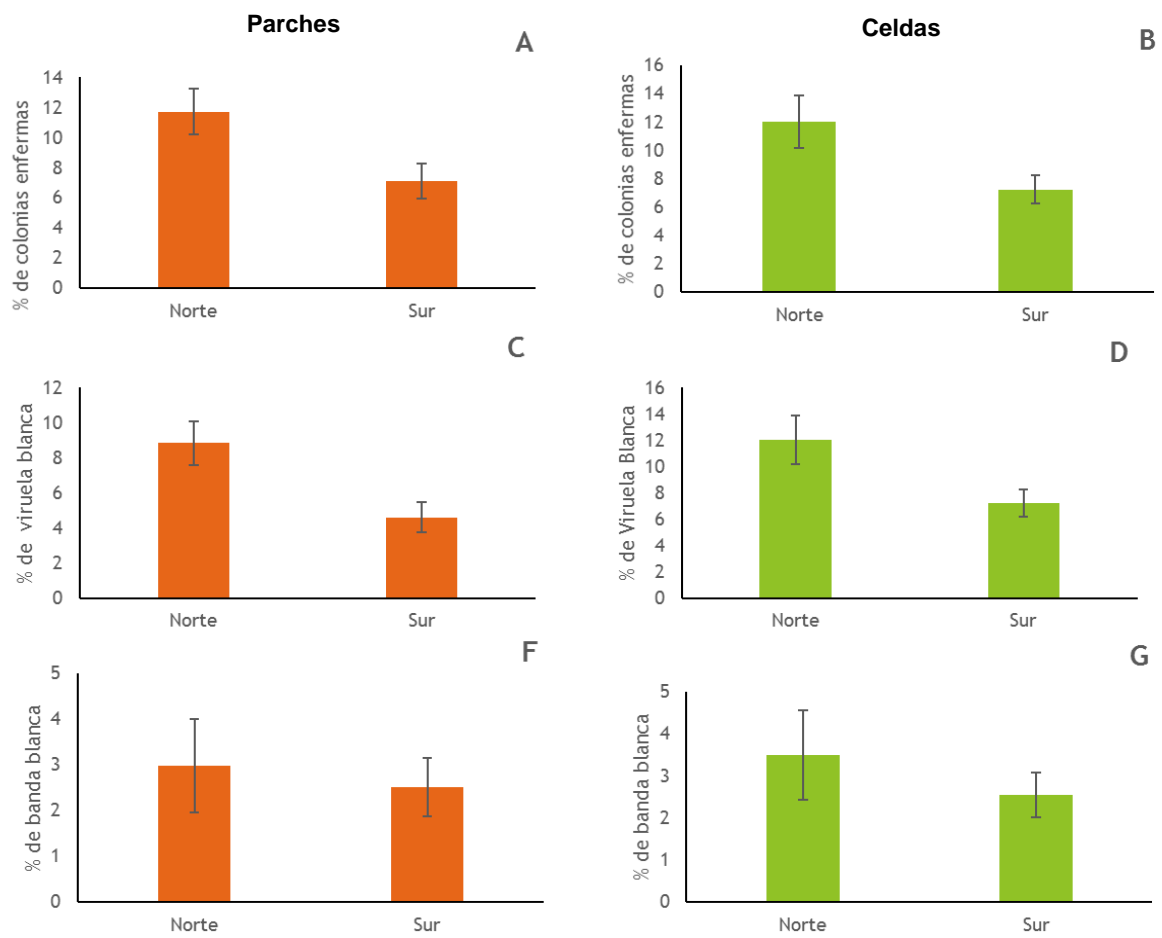


Figura 122. Porcentaje promedio de enfermedades (\pm E.E) en las regiones generadas a partir del índice de desarrollo costero Norte/Sur, los gráficos en naranja representan los resultados a nivel de parche mientras que los verdes corresponden a nivel de celdas. A y B) Porcentaje de colonias enfermas. C y D) Porcentaje promedio de colonias con la enfermedad de la viruela blanca. E y F) Porcentaje promedio de colonias con la enfermedad de la banda blanca.

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP; Cuadro 6) arrojó que la mayor parte de la varianza está explicada por el primer componente principal (CP1) (Cuadro 6) con el 61.39% en el caso de celdas y 62.67% a nivel de parches, el cual está explicado principalmente por las variables: índice de impacto del desarrollo costero, distancia al canal de Nichupté, número de ojos de agua en un radio de 2 km y distancia promedio a los ojos de agua (Fig. 13). Por otro lado el segundo componente principal (CP2) explica el 25.11% en el caso de celdas 24.1% a nivel de parches, y está compuesto principalmente por la variable número de desembocaduras de manglar en un radio de 2 km. Al graficar en biplot los dos primeros componentes principales (Fig. 13) nos

Al comparar el CP1 con la prevalencia de enfermedades mediante una regresión lineal ponderada, arrojó como resultado que únicamente fue significativo para la enfermedad de la viruela blanca a nivel de celdas ($p=0.009$) (Cuadro 7).

Cuadro 6. Componentes principales de las variables de aporte de nutrientes a la laguna costera y desarrollo costero. CP número de componente principal, junto con su eigen-valor y su % de varianza.

Celdas			Parches		
CP	Eigen-valor	% varianza	CP	Eigen-valor	% varianza
1	3.06	61.39	1	3.13	62.67
2	1.25	25.11	2	1.21	24.21
3	0.56	11.31	3	0.55	11.20
4	0.06	1.25	4	0.05	1.06
5	0.04	0.92	5	0.04	0.84

Cuadro 7. Resultados de las regresiones lineales ponderadas para la banda blanca, viruela blanca y todas las enfermedades con el primer componente principal CP1. Los * representan la significancia del valor de p

	Parches	Celdas
Todas las enfermedades	0.02*	0.03*
Banda Blanca	0.71	0.43
Viruela Blanca	0.009**	0.03*

DISCUSIÓN

El presente estudio representa el primer esfuerzo de relacionar al desarrollo costero y la fuente de aporte de nutrientes con la prevalencia de enfermedades *A. palmata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Asimismo, se proporciona una propuesta metodológica para evaluar el efecto del desarrollo costero sobre el arrecife; este mismo mostró que el arrecife puede dividirse en dos zonas Norte y Sur lo cual tiene que ser considerado para el manejo del parque. Donde los arrecifes ubicados al norte deben tener categorías de protección especial debido a que se están viendo más afectados por la prevalencia de enfermedades y probablemente por otros efectos que pudieran tener las fuentes de aporte de nutrientes y el desarrollo costero.

La prevalencia de enfermedades en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) es relativamente alta con respecto a otros estudios en el Caribe mexicano. Ward et. Al (2006) registraron que para el caribe mexicano las enfermedades de *A. palmata* eran de ~5%, mientras que los datos del programa de Monitoreo de la Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an (CONANP 2011) registraron que la prevalencia de viruela blanca era del 7.5% mientras que la banda blanca es menor al 0.01%. Estas diferencias se pueden deber al mayor número de agentes estresantes presentes en los arrecifes del PNAPM. La sobrepesca, el desarrollo costero y turístico, así como la destrucción de los manglares se ven exacerbados en esta zona (Burke y Maidens 2005; Burke et al. 2011). Bozec et. al (2008) encontraron que los arrecifes aledaños a Cancún tienen una menor diversidad de corales, así como una mayor cantidad de algas en comparación con los arrecifes ubicados al sur Quintana Roo; esto mismo podría estar ocurriendo con la prevalencia de enfermedades de coral donde los arrecifes aledaños a Cancún se pueden estar viendo más afectados. Sin embargo, las prevalencias de enfermedades se mantienen bajas con respecto a las registradas durante los eventos epizooticos de las décadas de 1980 y 1990 donde llegaron a ser del 80% en las Antillas Holandesas, Jamaica y los cayos de Florida (Gladfelter 1982; Green y Bruckner 2000). La viruela blanca fue la enfermedad que tuvo mayor presencia en el PNAPM, lo que concuerda con

resultados de estudios previos que establecen que la enfermedad de la viruela blanca es la más distribuida en el Caribe (Mayor et al, 2006; Muller et al. 2008; CONAMP 2011; Rodríguez-Martínez et al. 2014). Por otro lado las colonias de *A. prolifera* y *A. cervicornis* no mostraron signos de ninguna enfermedad, esto puede deberse al bajo número de colonias que se registraron 16 y 76 respectivamente dado que el monitoreo se centró en buscar parches de *A. palmata* puede indicar que estos resultados este subvalorados.

Las colonias de *A. palmata* de mayores tallas son más propensas a la aparición de enfermedades. Los resultados del presente estudio concuerdan con las observaciones obtenidas por Kaczmarzsky et. al (2005) para la especie *Pseudodiploria strigosa*; y Rodríguez-Martínez et. al (2014) para *A. palmata*. Kaczmarzsky et. al (2005) sugieren la posibilidad de que las colonias de mayores tallas no son más vulnerables a las enfermedades si no que estas tienen un mayor tiempo para desarrollar la enfermedad y recuperarse, mientras que las pequeñas pueden estar muriendo debido a que la infección puede matar rápidamente todo el tejido vivo de la colonia. La genética de las colonias también puede estar jugando un papel importante en este fenómeno. Vollmer y Kilne (2008), reportan la existencia fenotipos de *A. cervicornis* resistentes y vulnerables a la enfermedad de la banda blanca en Bocas del Toro, Panamá, este mismo fenómeno podría estar ocurriendo en *A. palmata* debido a su cercanía con *A. cervicornis* (Vollmer y Kline 2008; Rodríguez-Martínez et al. 2014). Considerando que los brotes de la banda blanca y la viruela blanca iniciaron en las décadas de 1980 y 1990 respectivamente (Gladfelter 1982; Patterson et al. 2002), según la talla de las colonias con respecto a la tasa de crecimiento anual de 3 a 11.5 cm; (NMFS 2015) existe la posibilidad de que las colonias mayores a 1 m sean anteriores o contemporáneas de estos eventos por lo que la tasa de recambio genético entre colonias resistentes y susceptibles a estas enfermedades sean mínimos, provocando que pudieran existir un mayor número fenotipos con una menor inmunidad innata de las colonias hacia dichas enfermedades (Rosemberg et al 2007; Vollmer y Kline 2008; Rodriguez-Matinez et. al 2014). De manera que la determinación y ubicación de los fenotipos resistentes a las enfermedades así como a otros padecimientos como el blanqueamiento dentro del PNAPM, debe de ser una prioridad para el manejo

del parque y para la elaboración de estrategias integrales de conservación de esta especie (Rodríguez-Martínez et al. 2014), más aun extender la búsqueda de estos fenotipos a otras especies de interés de conservación dentro del parque.

El contagio directo entre colonias podría no estar teniendo un papel importante en la prevalencia de enfermedades. En el presente estudio no se observó ningún patrón claro entre la densidad de colonias y la prevalencia de enfermedades, por lo que los posibles vectores *Coraphillia abbreviata* y *Hermodice curunculata* (Sutherland et al. 2010) pueden no estar teniendo un efecto significativo en la prevalencia de enfermedades. Estas observaciones coinciden con lo reportado por Kaczmarek et al. (2005), quienes no encontraron una relación clara entre la densidad de colonias y la prevalencia de la enfermedad de la plaga blanca tipo II, recusando la posibilidad de que exista contagio directo. Sin embargo, es contrario a lo observado por Gladfelter (1980) donde observó que la enfermedad de la banda blanca generaba patrones de agregación. Gladfelter argumenta que el contagio se daba en pequeñas áreas, donde las colonias recién infectadas no necesariamente se encuentran cerca de una colonia previamente enfermas y las colonias sanas que se encuentran adyacentes a colonias enfermas no necesariamente desarrollaban la enfermedad. Por lo tanto los mecanismos del contagio pueden ser mucho más complejos que el simple contagio entre colonias, esto puede indicar que la resistencia intrínseca de cada colonia dada por las bacterias simbiotas alojadas en la capa de mucus, así como los mecanismos de defensa del coral (Rosenberg et al. 2007; Augustin y Bosch 2010), pueden desempeñar un papel importante sobre la prevalencia de las enfermedades donde dentro de un mismo punto de muestreo podrían haber distintos fenotipos de resistencia a las enfermedades generando así variaciones espaciales en la prevalencia de enfermedades (Vollmer y Kline 2008; Jordan-Dahlgren obs. per.).

La presencia de síntomas de banda blanca y viruela blanca están altamente relacionadas con la profundidad. Por un lado, la banda blanca tiene una mayor prevalencia en las colonias situadas a menor profundidad, mientras que viruela blanca tuvo una mayor prevalencia en colonias que se encuentran a mayor profundidad (Fig. 8). Este patrón se relaciona directamente con las estrategias

de cada uno de los agentes causantes de la enfermedad. En el caso de la enfermedad de la banda blanca el patógeno causante de la enfermedad es aún desconocido, pero se sabe que es un patógeno oportunista el cual está relacionado con el estrés lumínico y/o térmico (Lesser et al. 2007; Kline y Vollmer 2011). Debido a lo anterior las colonias que se encuentran en sitios con menor profundidad tienen más probabilidad de sufrir estrés térmico y lumínico con lo cual se ven comprometidas las complejas relaciones simbióticas del coral, dejándolo vulnerable a la aparición de esta enfermedad oportunista (Lesser et al. 2007; Rosenber et al. 2007). Por otro lado la viruela blanca se halló a mayores profundidades resultado similar a lo reportado para la enfermedad de la plaga blanca tipo II en *Orbicella annularis*, *O. faveolata*, *O. franksi*, *O. cavernosa*, *Diploria labyrinthiformis*, *D. strigosa*, *Colpophyllia natans* y *Stephanocoenia intercepta*, en los cuales se encontró una mayor prevalencia a mayores profundidades, esto es de gran relevancia debido a que la enfermedad de la plaga blanca tipo II también se le ha relacionado con las actividades y su cercanía estas, al igual que la viruela blanca (Green y Bruckner 2000; Croquer et al, 2003; Ward et al. 2006). Esto puede deberse a que el agente causal de la viruela blanca (la entero bacteria *Serratia marcescens*) está asociada a heces fecales humanas y aguas residuales, por lo que es posible que las partículas infectadas con el patógeno se estén sedimentando en las zonas más profundas donde las dinámicas de corriente y oleaje son menores. Estas diferencias entre las tendencias en las enfermedades pueden aportar valiosa información para la conservación de la especie y la comprensión de los patrones de distribución de estas, por lo cual deberían ser abordadas con mayor detenimiento para entender mejor el comportamiento de estas enfermedades. Se sugiere que en el caso de la viruela blanca se estudie el efecto del sedimento y se analice la presencia del patógeno *S. marcescens* en el mismo.

Efecto de fuentes de nutrientes y desarrollo costero

Este estudio representa una contribución importante para el conocimiento de las fuentes de aporte de nutrientes a la laguna arrecifal. En total se registraron 23 ojos de agua y 15 desembocaduras de manglar. En el caso de los ojos de agua supone el mayor número de registros del que se tenga conocimiento en el PNAPM, no obstante este número no necesariamente representa el total de fuentes de aporte submarino de agua dulce, ya que también existen salidas de agua dulce por fracturas del suelo marino (Hernández-Terrones et al. 2011). Asimismo, el número de ojos de agua registrados podría estar subestimado ya que su visibilidad depende de varios factores como el oleaje, la cantidad de agua que contenga el acuífero y las corrientes marinas. Por ejemplo, existen reportes de la existencia de ojos de agua ubicados sobre la cresta arrecifal, pero las condiciones climáticas no hicieron posible su observación. Por otro lado, las desembocaduras de manglar tomadas por Vazquez-Oliman et. al (2013) y las observadas en Google Earth Pro en el 2005 proporcionan una idea general del comportamiento de estas sin embargo, el desmesurado crecimiento urbano y de los complejos turísticos en las costas del PNAPM pueden haber modificado el cauce natural de estos puntos. De modo que los ojos de agua y las desembocaduras de manglar constituyen fuentes intermitentes de aporte de nutrientes. Mientras tanto el canal de Nichupté representa el mayor aporte de nutrientes a la laguna arrecifal por su elevado grado de contaminación proveniente de la mancha urbana de Cancún, así como del desarrollo turístico del mismo (Prospero-Villan 2001).

Por otro lado, el índice de impacto del desarrollo costero mostró ser altamente sensible a los cambios en la distancia, por lo que al medir el impacto de la distancia y la cantidad de baños sobre el arrecife, se observaron valores bajos en zonas donde la distancia del desarrollo costero al arrecife es mayor, así como zonas donde los polígonos del desarrollo costero están más separados entre sí y cuentan con una menor cantidad de baños (Fig. 10 y 11); sin embargo las limitaciones del modelo están sujetas al acceso a la información y al detalle del mismo. Además, aún falta explorar el efecto de la escala sobre el modelo,

pudiendo generar grandes variaciones en los resultados del mismo. Un índice similar fue desarrollado por Burke y Reytar et. al 2011, en el cual miden la amenaza que genera el desarrollo costero, el cual consideró varios factores para su desarrollo: La densidad de la población costera en un máximo de 10 km de la costa, el crecimiento demográfico, el crecimiento anual en el turismo y la cercanía a puertos y aeropuertos. Esto se midió mediante la acción de buffer, donde se generaron 3 categorías (media, alta y baja) según la distancia para establecer el nivel de amenaza que pudiera tener el arrecife (Burke y Reytar 2011). Esto en contraste con el índice propuesto en este estudio, muestra el efecto conjunto de la población y el impacto del turismo sobre un punto específico en el arrecife, mientras que el propuesto por Burke y Reytar et. al 2011 establece áreas con distintos niveles de amenaza para los arrecifes. Por ende, nuestro modelo puede llegar a tener un nivel mayor de resolución ya que se centra en puntos y no en áreas. Por lo tanto, este modelo puede representar una herramienta para medir el efecto del desarrollo costero sobre el arrecife. Asimismo puede ser utilizado para medir el efecto del impacto del desarrollo humano sobre un ecosistema distinto al marino si se hicieran los ajustes necesarios al modelo.

Las variables de aporte de nutrientes mostraron en general una relación débil con la incidencia de enfermedades, y únicamente fueron significativos para la viruela blanca y todas las enfermedades en conjunto (Cuadro 4 y 5), para el caso de la banda blanca únicamente tuvieron relación con las desembocaduras de manglar. Esto puede tener varias implicaciones debido a que para la aparición de las enfermedades pueden intervenir varios factores en conjunto como lo es la genética, las distintas variables ambientales, así como las características del patógeno y de los síntomas que causa. Asimismo, lo observado en la banda blanca, la cual no presentó una relación con las fuentes de aporte de nutrientes, coincide con lo reportado por Aronson y Precht et. al (2001), en donde mencionan que la banda blanca no tiene una relación con el desarrollo costero o la calidad de las aguas; sin embargo al ser significativa con las desembocaduras de manglar, podría estar señalando que la fuente del patógeno podría provenir de los manglares, por lo que al ser parte importante de los

ecosistemas costeros, su propagación podría no depender del impacto directo del hombre.

Es de destacar que la variable de “distancia promedio a los ojos de agua” y el “número de ojos en radio de 2 km” mostraron resultados opuestos a los esperados ya que el primero muestra una relación positiva y el segundo una relación negativa, esto sugiere que la enfermedad de la viruela blanca se produce en lugares que se encuentran en promedio más lejanos a los ojos de agua y con un número menor de los mismos. Esto puede indicar que los ojos de agua pueden tener un efecto positivo en los arrecifes, de manera que los que se encuentran más cercanos a estos pueden haber desarrollado una resistencia mayor a los patógenos o al aporte de nutrientes, sin embargo al ser muy bajo el coeficiente de determinación puede que estos no tengan un efecto real sobre la prevalencia de enfermedades.

De la misma manera el índice de impacto de desarrollo costero propuesto en el presente estudio, mostró una relación negativa con la prevalencia de enfermedades lo que sugiere que la mayor prevalencia de enfermedades se encuentra lejos del desarrollo costero o de las grandes densidades poblacionales. En efecto, el índice de impacto del desarrollo costero generó un patrón espacial donde el parque es dividido en dos zonas Norte /Sur a partir del arrecife “Tanchacte” (Fig. 10 y 11) donde las colonias ubicadas en parte sur son las que presentan los mayores valores en el índice de impacto del desarrollo costero. Este patrón al ser analizado con la prevalencia de enfermedades, se obtuvo diferencias significativas entre las dos zonas donde la zona Norte (menor desarrollo) es la que presenta la mayor prevalencia de la viruela blanca.

La relación entre las enfermedades y la cercanía a ojos de agua y el desarrollo costero sugieren un patrón contrario a lo que se esperaba obtener, ya que las zonas con mayor incidencia de enfermedades (en particular viruela blanca) se encuentran en donde los valores del índice de desarrollo costero son más bajos y los ojos de agua están más alejados. Una posible explicación a lo anterior puede ser la sinergia de dos factores principalmente: la corriente que predomina en el PNAPM y la cercanía de la zona norte del PNAPM al mayor polo de desarrollo en Quintana Roo: Cancún. La corriente costera dentro del área de

estudio corre paralela a la costa con dirección norte y que al llegar a la zona norte genera un bucle (Coronado et al. 2007), la cual podría estar sirviendo como transporte para los contaminantes y sedimentos contenedores del patógeno (Richmond 1993; Kaczmarzsky et al. 2005). La segunda y potencialmente de mayor impacto sobre los arrecifes del PNAPM, es el Canal de Nichupté el cual vierte las aguas de la laguna que presenta un alto grado de contaminación por el vertimiento de aguas residuales por parte del desarrollo urbano de Cancún (Prospero-Villan 2001). Esto debido a la naturaleza de bacteria causante de la viruela blanca asociada con las aguas contaminadas por heces fecales humanas (Patterson et al. 2002; Sutherland et al. 2010), por lo que la laguna de Nichupté puede estar sirviendo como medio de dispersión para este patógeno. La gran presión antropogénica puede estar llevando grandes cantidades del patógeno de la viruela blanca, así como una gran cantidad de sedimentos y contaminantes a laguna arrecifal del PNAPM, los cuales son retenidos en el bucle de la zona norte (Fig. 14). En consecuencia las colonias de *A. palmata* distribuidas en la zona norte del parque, pueden estar sometida a un gran estrés producido por sedimentos así como por contaminantes (Richmond 1993) aunado a la acción de una gran cantidad de patógenos, que resultan en una mayor prevalencia de enfermedad de la viruela blanca en esta zona. Existen dos puntos a favor de esta hipótesis. El primero es el hecho de que es que los arrecifes ubicados al norte dentro del parque (Limones, Manchones,) reportan los mayores índices de mortalidad promedio por colonia (Álvarez-Filip y Banaszak 2014) y el segundo es que los arrecifes ubicados fuera del PNAPM pero más cercanos a la desembocadura de la Laguna de Nichupte (Fig. 14) presentan altos grados de mortalidad e incidencia de enfermedades (Álvarez-Filip et al. datos no publicados).

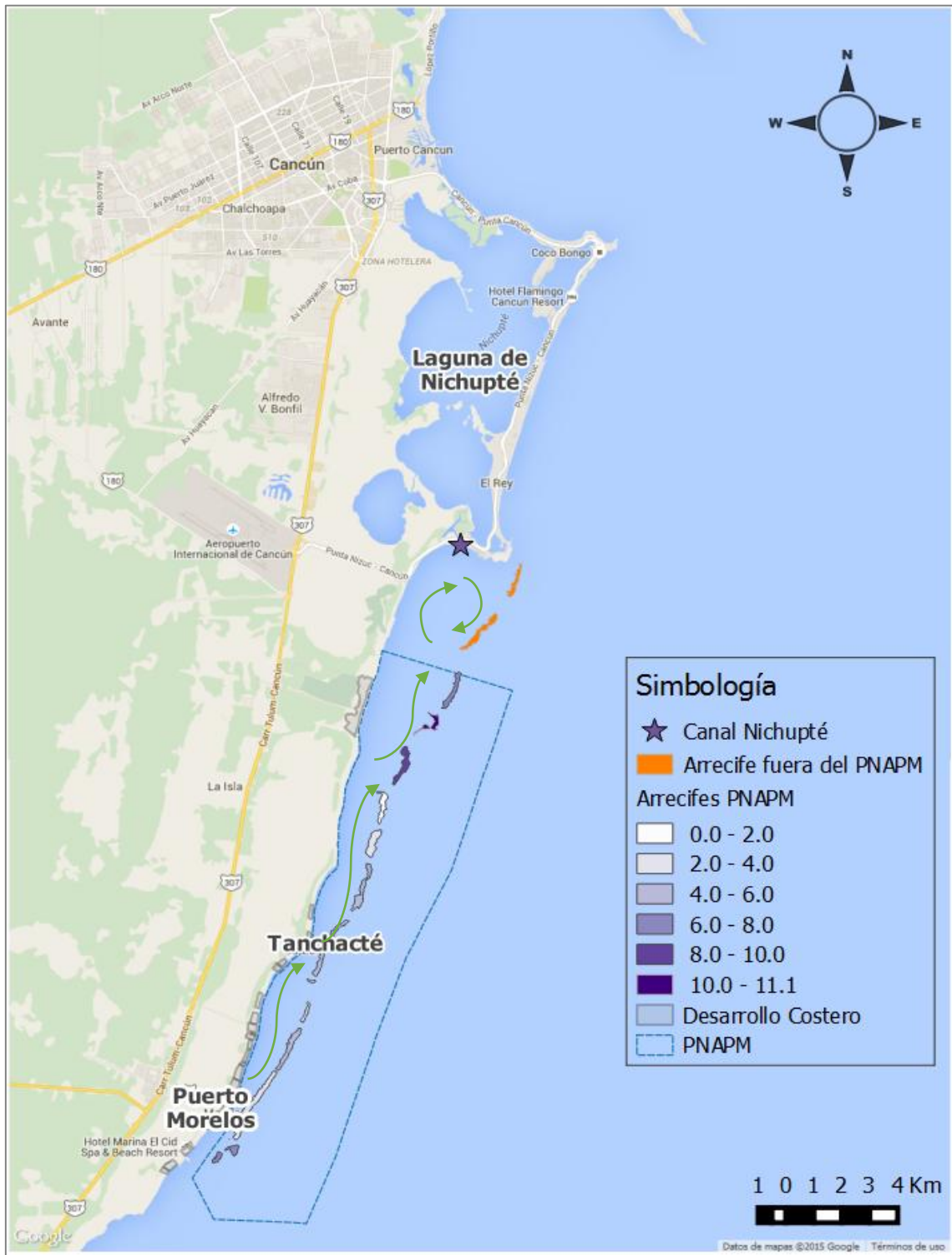


Figura 144. Mapa de visualización del impacto de las corrientes marítimas de Puerto Morelos y el área urbana de Cancún sobre la prevalencia de las enfermedades. Los polígonos del arrecife están categorizados por el porcentaje de viruela blanca que poseen. El polígono del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos está representado por la línea punteada color azul. Los polígonos en color naranja representan los arrecifes que se encuentran fuera del polígono del parque. Por otro lado, el desarrollo costero está representado en polígonos grises los correspondientes a Cancún se encuentran en la parte norte y los de Puerto Morelos en la parte sur. En la parte norte se puede observar la laguna de Nichupté y el canal que desemboca en la laguna arrecifal de Puerto Morelos está marcado con una estrella color morado. Las flechas color verde representan la dirección de las corrientes dentro del PNAPM descritas por Cornado y colaboradores en el 2007 la cual corre paralela a la costa y genera un bucle en la parte norte

CONCLUSIÓN

Los mecanismos que rigen la dispersión y distribución de las enfermedades en los corales son mucho más complejos que la simple exposición al patógeno, donde las variaciones individuales y las condiciones ambientales juegan un rol fundamental. El escaso conocimiento que se tiene acerca de los patógenos que las causan, así como de la ecología de las enfermedades en los corales, provocan que las estrategias para el manejo de estas no sean las adecuadas o inexistentes. En el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) las enfermedades del coral *Acropora palmata* son altas a comparación al resto del Caribe mexicano, pero se mantienen en niveles mucho menores que en las epizootias de 1980 y 1990, donde la enfermedad de la viruela blanca fue la que mayor presencia tiene dentro del parque.

Por otro lado, nuestros resultados indican que las colonias de *A. palmata* de mayor tamaño podrían estar siendo más vulnerables a las enfermedades, lo cual podría deberse a la genética de las colonias, donde su tamaño sugiere que su edad puede ser equiparada con la de las grandes epizootias de esta especie, teniendo así fenotipos con menor recambio genético y por ende una menor resistencia intrínseca a las enfermedades. A causa de esto se deben realizar estudios sobre la genética de las poblaciones del parque en busca de fenotipos resistentes a las enfermedades y a otros padecimientos como el blanqueamiento o el estrés térmico, que permitan hacer programas de restauración con reclutas sexuales con mayor éxito.

Así mismo las enfermedades adquieren características de distribución y asociación a diversos factores según las características del patógeno. Esto se vio un diferencial en la distribución vertical de las enfermedades, donde la enfermedad de la banda blanca, presenta una mayor prevalencia en someras, esto debido a que el su agente causal es considerado como un patógeno oportunista que se ve beneficiado por las altas temperaturas y la alta radiación solar, mientras que la enfermedad de la viruela blanca tuvo una mayor presencia en zonas profundas, esto probablemente debido a que su agente causal está asociado a las fuentes de contaminación por aguas residuales y sedimentos, teniendo que en las zonas de mayor profundidad, las partículas cargadas con el

patógeno pueden presentar mayor sedimentación, debido a que el efecto de las corrientes y el oleaje son menores.

El índice de impacto del desarrollo costero mostró que los arrecifes del PNAPM pueden dividirse en dos zonas norte, por el impacto que estos reciben del desarrollo costero. De manera que la parte norte resulto ser la más afectada por la viruela blanca, debiéndose principalmente por la presión ejercida por la zona urbana y hotelera de Cancún combinada con la acción de las corrientes que pueden estar arrastrando los contaminantes y patógenos provenientes de los ojos de agua, desembocaduras de manglar y los provenientes de la zona urbana de Puerto Morelos a los arrecifes del norte del parque. Por lo que esto debe ser considerado para el manejo del parque, dando como lugares prioritarios para la conservación la zona norte que abarca los arrecifes Limones, Manchones, Bonanza, cuyo efecto proveniente de Cancún, está teniendo efectos en la salud de estos arrecifes. Además de que se deben replantear los planes del desarrollo turístico “Las Américas” en la llamada “Milla de oro” el cual plantea la construcción de complejos turísticos con una capacidad de 2,104 habitaciones frente el arrecife Limones.

REFERENCIAS

- Álvarez-Filip, L. y Banaszak, A., 2014. Diagnóstico y estado de conservación de las poblaciones de *Acropora* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.
- Augustin, R., & Bosch, T. C. (2010). Cnidarian immunity: a tale of two barriers. In *Invertebrate immunity* (pp. 1-16). Springer US.
- Aronson, R. B., y Precht, W. F. (2001). White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. In *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases* (pp. 25-38). Springer Netherlands.
- Bruckner, A. W. (2002). Priorities for effective management of coral diseases (p. 54). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.
- Brusca, R., & Brusca, G. (2005). Cnidaria. En R. Brusca & G. Brusca, *Invertebrados* (1st ed., pp. 231-291). Madrid: MacGraw-Hill Interamericana de España.
- Bourke, L., & Maidens, J. (2005). Arrecifes en Peligro en el Caribe (Reefs at Risk in the Caribbean). World Resources Institute. Washington, USA. Disponible en: http://marine.wri.org/pubs_pdf.cfm.
- Biodiversidad.gob.mx,. (2015). *CITES | Biodiversidad Mexicana*. Recuperado 30 de Agosto 2015, de <http://www.biodiversidad.gob.mx/CITES/especies.html>
- CONANP. 2011. Monitoreo Del Coral Cuerno de Alce (*Acropora Palmata*) En La Reserva de La Biosfera Arrecifes de Sian Ka ' an. México D. F.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M., y Ocampo-Torres, F. J. (2007). On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26(1), 149-163.
- Croquer, A., Pauls, S. M., & Zubillaga, A. L. (2003). White plague disease outbreak in a coral reef at Los Roques National Park, Venezuela. *Rev. Biol. Trop*, 51(Suppl 4), 39-45.
- Crawley, M. J. «Statistical Modelling.» En *The R Book*, de Michael J. Crawley, 388-448. Wiley, 2013.
- Davy, S. K., Allemand, D., & Weis, V. M. (2012). Cell biology of cnidarian-dinoflagellate symbiosis. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 76(2), 229-261.
- Gardner, T. A., Côté, I. M., Gill, J. A., Grant, A., & Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 301(5635), 958-960.

- Gladfelter, W. B. (1982). White-band disease in *Acropora palmata*: implications for the structure and growth of shallow reefs. *Bulletin of Marine Science*, 32(2), 639-643.
- Coraldisease.org,. (2015). Index of /. Recuperado 30 de mayo 2015, de <http://coraldisease.org>
- Glowka, Lyle, Françoise Burhenne-Guilmin , Hugh Synge, Jeffrey A. MacNeely, y Lothar Gündling (1959). Artículo 8: Conservación In Situ. En Guía del Convenio Sobre la Diversidad Biológica., The Ecology of Jamaican Coral Reefs. Species Composition and Zonation: *Ecological Society of America*, 40(1), pp.67–90.
- Haynes, D., Brodie, J., Waterhouse, J., Bainbridge, Z., Bass, D., y Hart, B. (2007). Assessment of the water quality and ecosystem health of the Great Barrier Reef (Australia): conceptual models. *Environmental Management*, 40(6), 993-1003..
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., y Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1-4), 517-528.
- Hess, G. (1996). Disease in metapopulation models: implications for conservation. *Ecology*, 1617-1632.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research*, 50(8), 839-866.
- Icri/Unep-Wcmc, 2010. Disease in Tropical Coral Reef Ecosystems: ICRI Key Messages on Coral Disease. , p.11.
- Jordan-Dahlgren, E., 1978. Estructura y composición de arrecifes coralinos, en la región noreste de la península de Yucatán, México. *Anales del Instituto Ciencias del Mar y Limnología.*, 28.
- Jordán-Garza, A. (2007). Condición y cambio de corales enfermos del género *Montastrea sp.* en tres hábitats arrecifales (Maestro en Ciencias). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kaczmarek, L. T., Draud, M., y Williams, E. H. (2005). Is there a relationship between proximity to sewage effluent and the prevalence of coral disease. *Caribb J Sci*, 41(1), 124-137.
- Kline, D. I., y Vollmer, S. V. (2011). White Band Disease (type I) of endangered Caribbean acroporid corals is caused by pathogenic bacteria. *Scientific reports*, 1.

- Lapointe, B. E., O'Connell, J. D., y Garrett, G. S. (1990). Nutrient couplings between on-site sewage disposal systems, groundwaters, and nearshore surface waters of the Florida Keys. *Biogeochemistry*, 10(3), 289-307.
- Lesser, M. P., Bythell, J. C., Gates, R. D., Johnstone, R. W., y Hoegh-Guldberg, O. (2007). Are infectious diseases really killing corals? Alternative interpretations of the experimental and ecological data. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 346(1), 36-44.
- Rubio Maldonado, E., Murad Robles, M., Sanroque, R., y Vicente, J. (2010). Crisis ambiental en la costa de Quintana Roo como consecuencia de una visión limitada de lo que representa el desarrollo sustentable. *Argumentos* (México, DF), 23(63), 161-185.
- Mayor, P. A., Rogers, C. S., y Hillis-Starr, Z. M. (2006). Distribution and abundance of elkhorn coral, *Acropora palmata*, and prevalence of white-band disease at Buck Island Reef National Monument, St. Croix, US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 25(2), 239-242.
- Muller, E. M., Rogers, C. S., Spitzack, A. S., y Van Woesik, R. (2008). Bleaching increases likelihood of disease on *Acropora palmata* (Lamarck) in Hawksnest Bay, St John, US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 27(1), 191-195.
- Irigoyen, C. G. (2004). Restauración en arrecifes de coral. *Ciencias*, (076), 42-45.
- NMFS. (2014). Recovery Plan for Elkhorn (*Acropora palmata*) and Staghorn (*A. cervicornis*) Corals. Prepared by the Acropora Recovery Team for the National Marine Fisheries Service, Silver Spring, Maryland
- NOAA. (2015). Redirect - Office of Protected Resources - NOAA Fisheries. Recuperado 10 de Agosto de 2015, de <http://www.nmfs.noaa.gov/pr/species/invertebrates/elkhorncoral.htm>
- Papina, M., Meziane, T., y Van Woesik, R. (2003). Symbiotic zooxanthellae provide the host-coral *Montipora digitata* with polyunsaturated fatty acids. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 135(3), 533-537.
- Patterson, K. L., Porter, J. W., Ritchie, K. B., Polson, S. W., Mueller, E., Peters, E. C., y Smith, G. W. (2002). The etiology of white pox, a lethal disease of the Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(13), 8725-8730.

- Porto-Hannes, I., Zubillaga, A. L., Shearer, T. L., Bastidas, C., Salazar, C., Coffroth, M. A., y Szmant, A. M. (2015). Population structure of the corals *Orbicella faveolata* and *Acropora palmata* in the Mesoamerican Barrier Reef System with comparisons over Caribbean basin-wide spatial scale. *Marine Biology*, 162(1), 81-98.
- Prospero-Villan, V. (2015). *Nicupté, una cloaca*. *Unesco.org*. Recuperado 22 de Mayo 2015, de http://www.unesco.org/csi/wise/nichupte_s.htm
- Raymundo, L. J., Couch, C. S., Harvell, C. D., Raymundo, J., Bruckner, A. W., Work, T. M., ... y Aeby, G. S. (2008). Coral Disease Handbook Guidelines for Assessment, Monitoring & Management.
- Rodriguez- Martinez, R. (1998). *Patrones de recuperación de Acropora palmata en un área perturbada por el huracán Gilberto (1998)* (Maestro en Ciencias). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Banaszak, A. T., McField, M. D., Beltran-Torres, A. U., y Alvarez-Filip, L. (2014). Assessment of *Acropora palmata* in the Mesoamerican Reef System. *PloS one*, 9(4), e96140.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Banaszak, A. T., y Jordán-Dahlgren, E. (2001). Necrotic patches affect *Acropora palmata* (Scleractinia: acroporidae) in the Mexican Caribbean. *Diseases of Aquatic Organisms*, 47(3), 229-234.
- Rogers, C. S., & Muller, E. M. (2012). Bleaching, disease and recovery in the threatened scleractinian coral *Acropora palmata* in St. John, US Virgin Islands: 2003–2010. *Coral Reefs*, 31(3), 807-819
- Rosenberg, E. et al., 2007. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution. *Nature reviews. Microbiology*, 5(5), pp.355–362.
- Rosenberg, E., y Kushmaro, A. (2011). Microbial diseases of corals: pathology and ecology. In *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition* (pp. 451-464). Springer Netherlands.
- Sutherland, K. P., Porter, J. W., Turner, J. W., Thomas, B. J., Looney, E. E., Luna, T. P., y Lipp, E. K. (2010). Human sewage identified as likely source of white pox disease of the threatened Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Environmental microbiology*, 12(5), 1122-1131.
- Sweet, M.J., Croquer, A. y Bythell, J.C., 2014. Experimental antibiotic treatment identifies potential pathogens of white band disease in the endangered Caribbean coral *Acropora cervicornis*.
- UNESCO, 1992. UNEP-IO-IOC-WMO-IUCN Meeting of Experts on a Long-Term Global Monitoring System of Coastal and Near-Shore Phenomena.
- Valdespino, P., Merino-Ibarra, M., y Falcón, L. (2015). *Revista Ciencia y Desarrollo*. *Cyd.conacyt.gob.mx*. Retrieved 30 November 2015, from

<http://www.cyd.conacyt.gob.mx/272/articulos/planta-animal-u-holobionte.html>

- Vollmer, S. V., y Kline, D. I. (2008). Natural disease resistance in threatened staghorn corals. *PLoS One*, 3(11), e3718-e3718.
- Ward, J. R., Rypien, K. L., Bruno, J. F., Harvell, C. D., Jordan-Dahlgren, E., Mullen, K. M., ... y Smith, G. (2006). Coral diversity and disease in Mexico. *Diseases of aquatic organisms*, 69(1), 23-31.
- Weil, E., y Hooten, A. J. (2008). Underwater cards for assessing coral health on Caribbean reefs. *Coral Reefs Targeted Research & Capacity Building for Management. Currie Communications, Melbourne, Australia*, 21(3).
- Wallace, Carden C. Staghorn corals of the world: a revision of the coral genus *Acropora*, de Carden C. Wallace, 1-7. Queensland: CSIRO, 1999.
- Young, C. N., Schopmeyer, S. A., y Lirman, D. (2012). A review of reef restoration and coral propagation using the threatened genus *Acropora* in the Caribbean and Western Atlantic. *Bulletin of Marine Science*, 88(4), 1075-1098.

ANEXO 1 Determinación de la dimensión del buffer

Para calcular el radio necesario para los buffers aplicados en el estudio, se obtuvieron imágenes satelitales de las desembocaduras de manglar tomadas de GoogleEarth Pro versión 7.1.2 tras el impacto del huracán Wilma en octubre del 2005. Las imágenes seleccionadas fueron aquellas en las que se pudiera apreciar la pluma de sedimentos y su origen (Fig 1). De ahí que se obtuvieron 3 imágenes, con estos requisitos.



Fig.1 Pluma de sedimento en el PNAPM posterior al huracán Wilma del 24 de octubre del 2005. Imagen satelital obtenida de Google earth Pro versión 7.1.2.2041.

Posteriormente se procedió al análisis de las imágenes, las cuales fueron previamente tratadas para mejorar el brillo y el contraste de las mismas, de manera que fuese posible apreciar de mejor manera la pluma de sedimento, para su posterior análisis.

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software ImageJ versión 1.50b con el cual se obtuvieron medidas desde distintos ángulos de la desembocadura de manglar hasta el límite de la pluma de sedimento en las distintas imágenes, para la cual se tomó solo en cuenta la distancia máxima obtenida, debido a que lo que se busca es tener una aproximación de la distancia máxima que puede tener una pluma de sedimento.

Se realizaron 14 mediciones de las cuales la menor fue de 954m mientras que la mayor de 2016m. Esto sin que la pluma de sedimento se distorsionará o no pudiera ser identificado sus límites

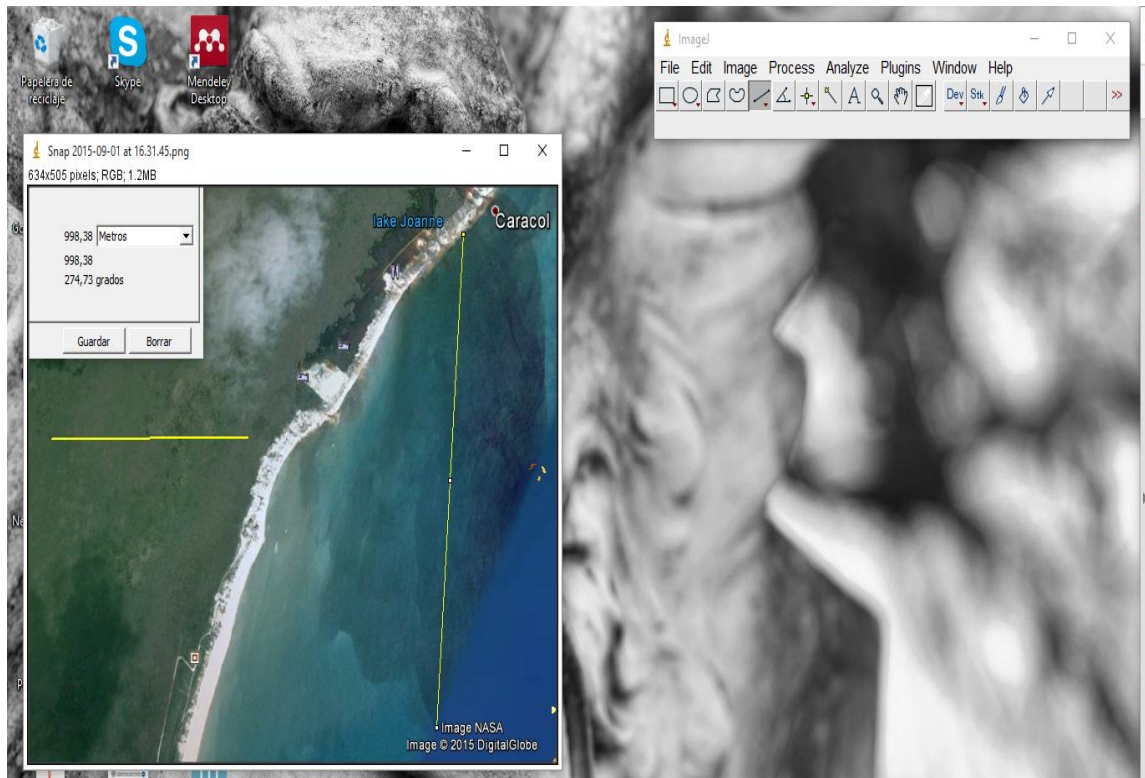


Fig 2. Método de medición de las Pluma de sedimento en el PNAPM. Mediante el software ImageJ versión 150b. Se tomaron varias líneas a partir de la desembocadura hasta el límite de la pluma de sedimentos.

ANEXO 2. Ubicación geográfica de las fuentes de aporte de nutrientes

Cuadro 1. Ubicación de los ojos de agua en sistema de coordenadas UTM GSM 84.

Ojo de agua	Longitud	Latitud	Fuente
O.Norte	514830	2309572	UNAM/PNAPM
O.Pastos	514953	2308177	UNAM/PNAPM
O.Doble	514481	2308505	UNAM/PNAPM
O. Mini	514665	2309203	UNAM/PNAPM
O.Laja	514466	2308788	UNAM/PNAPM
O.Agua	513260	2305528	UNAM/PNAPM
O.Doble	514540	2309001	UNAM/PNAPM
O.Gorgos	514460	2308616	PNAPM
O.Pargos	514422	2308895	PNAPM
O.Parque	515351	2310567	PNAPM
O.Fractura	517143	2316272	PNAPM
O.Palapa	517042	2315667	PNAPM
O.Bonita	516276	2312878	PNAPM
15	514928	2309639	RC
16	514980	2309934	RC
17	515049	2310116	RC
19	515153	2310187	RC
20	515337	2310583	RC
21	515346	2310629	RC
22	515393	2310184	RC
18	515046	2310183	RC
25	517200	2316355	RC
26	517672	2317985	RC

Cuadro 2. Ubicación de las desembocaduras de manglar proporcionadas por Vazquez-Oliman (2013). Las coordenadas se proporcionan en UTM WGS 84 zona 16

Localidad	longitud	Latitud
Hotel Secrets	514916	2310494
Plague Beach	515013	2310900
Sur H.Desire	515424	2311051
Sur H.Desire	515447	2311054
Hotel Desire	515698	2311275
Casa salida de agua	516524	2313920
Casa salida de agua	516435	2313951
Terreno rellenado	516262	2313692
Casa rosa	516299	2313766
Remanente de construcción	516637	2314111
Punto doble	516833	2314473
Punta 4	516835	2314437
Punta 3	516843	2315032
Punta 2	516835	2314342
Punta caracol	516826	2314282

ANEXO 3. Ubicación y capacidad de los principales hoteles de Puerto Morelos

Cuadro 1. Ubicación y capacidad de los principales hoteles de Puerto Morelos proporcionados por la Asociación de Hoteles de Puerto Morelos 2014.

Hotel	No. de cuartos	Dirección
ZOETRY PARAISO DE LA BONITA RESORT & THALASSO	90	Carretera Cun- Chet., Km. 328, Bahía Petempich, Pto. Morelos
SECRETS SILVERSANDS RIVIERA CANCUN	433	Bahía de Petempich, S.M. 12 Mz. 31, Lt.10, Puerto Morelos
MARINA EL CID SPA & BEACH RESORT, CACUN RIVIERA MAYA	342	Blvd. El Cid Mz. 20 Lt. 1-01, unidad 15 S.M. 03, Pto. Morelos
EXCELLENCE RIVIERA CANCÚN	440	Carr. Fed. CTM-PTO. JUÁREZ Mz.7 , Lt.1, S.M.11, Pto. Mor. CP. 77580
GRAND RESIDENCES MOON PALACE	309 2,425	3 llaves por residencia Carr. Cancún-Chetumal, KM. 340 Fracc. Tamul, Cancun, Q. ROO. México C.P. 77500
NOW SAPPHIRE	496	Zona Fed. Maritima, Mz. 9, Lt 10, S.M.11, Pto. Mor. Pcp.77580 MZ 9 LT 10 KM 324
OCEAN CORAL & TURQUESA	591	S.M. 12, Mza. 15, Predio Maria Irene, Pto. Morelos
DESIRE RESORT & SPA RIVIERA MAYA	114	Carretera Cun-Pto.Mor. Km. 27.5, S.M. 12, Mz. 41, Lt. 1, Fracc. 2, Predio Tanchacte
AZUL SENSATORI	435	Entrada Bahía Petempich, Mz. 34, Lt. 154, S.M. 12, Pto. Morelos
DREAMS RIVIERA CANCUN RESORT & SPA	486	Col. Pto. Mor. Calle 55, S.M.11, Mz.4, Lt.1-01
NOW JADE RIVERA CANCUN (antes NH Riviera)	550	Unidad 26, S.M.3 Mz.20, Lote 1-1, Puerto Morelos
AZUL HOTEL BEACH RESORT	149	Carretera Fed. Chetumal-Pto. Juárez- KM. 27.5
DESIRE PEARL	88	Costera Norte, Lt.1, Mz.26, S.M. 10, Pto. Morelos
ROYALTON	1225	A un costado (después en el sentido Cancún-Puerto Morelos) del Moon Palace.
ACAMAYA REEF CABAÑAS*	7	S.M.11, Mz. 5, Lt. 5, Puerto Morelos
OJO DE AGUA*	36	Av. Javier Rojo Gómez, SM.2 Mz.2, LT.16, CP 77580, Pto. Morelos.
POSADA EL MORO*	18	Av. Javier Rojo Gómez, S.M. 2, Mz. 5, Lt. 17, Pto. Morelos
VILLAS LATINAS*	30	Av. Javier Rojo Gómez, S.M.2, Mz.2, Lt.2
AMAR INN*	10	Av. Javier Rojo Gómez, Esq. Lázaro Cárdenas, S.M. 2, Mz.1, Lt. 4, Pto. Mor.