

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina**

**Distribución potencial de peces de importancia comercial en
el norte del Golfo de California, México: Influencia del cambio
climático sobre las principales áreas de pesca de la zona**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Magdalena Précoma de la Mora

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

Magdalena Précoma de la Mora

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Co-director

Dr. Héctor Reyes Bonilla
Co-director

Dr. David Alberto Rivas Camargo

M.C. Alejandro Hinojosa Corona



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Magdalena Précoma de la Mora © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Magdalena Précoma de la Mora**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Distribución potencial de peces de importancia comercial en el norte del Golfo de California, México: Influencia del cambio climático sobre las principales áreas de pesca de la zona

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Co-director

Dr. Héctor Reyes Bonilla
Co-director

El Golfo de California es la zona de pesca más productiva en México. La pesca artesanal y los sistemas sociales que de ella dependen, son particularmente vulnerables al cambio climático global ya que el incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) puede ocasionar que algunos taxa marinos presenten alteraciones en su distribución espacial. El objetivo del presente trabajo fue analizar con base en modelos de distribución potencial y un escenario de cambio climático, las modificaciones potenciales en las áreas de pesca de 12 especies de peces de importancia comercial en el norte del Golfo de California. Para ello, se mapearon las áreas de pesca de las especies en la zona, y se realizaron modelos de distribución potencial para el tiempo presente, empleando el programa MaxEnt. Las simulaciones de la distribución geográfica futura (año 2050) se generaron utilizando valores proyectados de la TSM bajo un escenario de cambio climático que representa concentraciones intermedias de radiación de calor (RCP 4.5). Con base en los modelos obtenidos, se estimó la proporción de las áreas de pesca en donde no habría cambios (estabilidad), así como las áreas que representarían pérdida o ganancia. Utilizando esta información se evaluaron las posibles consecuencias económicas del cambio de distribución geográfica de las especies en tres localidades del área de estudio (San Felipe, Golfo de Santa Clara y Bahía de los Ángeles). Los resultados mostraron que cinco especies mantendrán una distribución estable, seis tendrán una posible pérdida y tres tendrán posibilidad de colonizar áreas nuevas. Por otra parte, las áreas de pesca se mantendrían estables para seis especies (cabrilla de roca, cabrilla pinta, baya, curvina de aleta corta, pargo cononaco y pargo amarillo), mientras que tres (baqueta, cabrilla sardinera y curvina golfina) presentarán poca pérdida (<6%) y dos (cabrilla chiruda y totoaba) sufrirán cambios severos (>85%). En ningún caso se obtuvo ganancia neta de área ocupada dentro de los polígonos de pesca. Los patrones observados en la distribución potencial de las especies y en las áreas de pesca se pueden atribuir a tres razones principales: 1) la afinidad biogeográfica que presentan las especies (que indica que la mayoría son euritermas y deben ser muy tolerantes a cambios ambientales), 2) el poco incremento relativo estimado en la TSM en la región para el año 2050 (sólo 1.6 °C en promedio) y 3) el hecho de que, al ser el golfo un mar semicerrado, las especies no podrán expandir su distribución hacia el norte. Finalmente, se estimó que los cambios en distribución de los taxa representarían poca disminución (0.03% – 1.20%) en los ingresos monetarios que generan las capturas anualmente para tres localidades.

Palabras clave: **distribución potencial, pesca, cambio climático, MaxEnt**

Abstract of the thesis presented by **Magdalena Précoma de la Mora** as a partial requirement to obtain the Master Science degree in Marine Ecology.

Potential distribution of commercial fish species in the northern Gulf of California, México: Influence of climate change in the principal fishing areas

Abstract approved by:

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Co-director

Dr. Héctor Reyes Bonilla
Co-director

The Gulf of California is the most productive fishing area in México. Nonetheless, the artisanal fisheries and the social systems that depend of them, are particularly vulnerable to global climate change due to the rise in sea surface temperature (SST) that could cause alterations in the spatial distribution of some marine taxa. The objective of the present study was to analyze, based on potential distribution models and a climate change scenario, the potential alterations in the fishing areas of 12 commercial fish species in the northern Gulf of California. To do that, the fishing grounds of each species were mapped, and potential distribution models for the present time were created using the MaxEnt software. Simulations of future geographic distribution (year 2050) were created using projected values of SST under an intermediate radiative forcing climate change scenario (RCP 4.5). Based on these models, the proportion of the fishing grounds where no changes would occur (stability) was estimated, as well as the areas that might represent losses or gains in occupied area. Using this information the possible economic consequences of changes in species distribution was evaluated in three locations in the study area (San Felipe, Gulf of Santa Clara and Bahía de los Ángeles). The results indicated that five species will maintain a stable distribution in the study area, six will have a possible loss and three could colonize new areas. On the other hand, fishing areas might remain constant for six species (spotted sand bass, spotted grouper, gulf grouper, shortfin corvina, barred pargo and yellow snapper), while three (gulf coney, leopard grouper and gulf corvina) will present a few losses (<6%) and two (sawtail grouper and totoaba) would suffer severe changes (>85%). No species presented a net gain in occupied area of the fishing polygons. The observed patterns in the potential distribution of species and in the fishing areas could be explained due to: 1) the biogeographic affinity that the species present (most are eurythermal, and may be quite tolerant to environmental changes), 2) the relatively low increment estimated in SST for the year 2050 (only 1.6 °C on average) 3) the fact that, being the gulf a semi closed sea, the species will not be able to expand their distribution northwards. Finally, it was estimated that changes in taxa distribution would represent a low decrease (0.03% - 1.20%) in the monetary income that catches produce annually for three locations in the study area.

Keywords: **potential distribution, fisheries, climate change, MaxEnt**

Dedicatoria

A mis papás y mis hermanos:

por ser mis pilares, mi inspiración

y lo más importante que tengo en la vida.

A Chiftas:

por todas tus enseñanzas e historias,

y por demostrarme que uno puede

vivir apasionado de su trabajo

Agradecimientos

A CONACYT por otorgarme una beca nacional con número de becario: 299991, una beca mixta nacional para realizar una estancia en la UABCS en La Paz y una beca mixta para el extranjero para llevar a cabo la estancia en la Universidad de Kansas, E.U.A.

A CICESE por admitirme en el posgrado de Ecología Marina y por permitirme llevar a cabo mis estudios de maestría durante estos dos años.

A mis directores, el Dr. Héctor Reyes y el Dr. Luis Calderón. Les agradezco por confiar en mí, por apoyarme incondicionalmente durante estos dos años, por siempre darme ánimos para seguir adelante, por sus valiosos comentarios y correcciones en el escrito de este trabajo y por su dedicación. Agradezco también al Dr. Héctor Reyes por permitirme realizar una estancia en la UABCS en La Paz y su apoyo durante ésta.

A mis sinodales, el Dr. David Rivas y el M.C. Alejandro Hinojosa. Gracias por su disposición a ayudarme durante la realización de mi tesis, su apoyo, y sus valiosas correcciones y críticas constructivas hacia este trabajo. Además, agradezco al Dr. David Rivas por su apoyo en el procesamiento e interpolación de las variables ambientales.

A los proyectos a partir de los cuales se derivaron datos o información necesaria para la realización de este trabajo. Proyecto UC-Mexus-CONACYT, CN-14-50. Al proyecto de CONABIO JM065 a partir del cual surgieron una parte de los registros de ocurrencia de las especies. Al proyecto PANGAS a partir del cual se derivaron los polígonos de pesca citados. Al Programa de Adaptación al Cambio Climático Endesu - APFF Islas del Golfo de California Sonora, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)-SEMARNAT (financiado por el Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ), a través de su iniciativa BIOMAR), a partir del cual se derivaron las capas de la temperatura superficial del mar proyectadas.

A la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA) por proporcionarme los avisos de arribo para San Felipe y Bahía de los Ángeles.

A la Dra. Marcia Moreno Báez por proporcionarme los polígonos de pesca que sirvieron como base para el desarrollo del enfoque pesquero del presente trabajo, por tu apoyo y tu disposición.

A la Dra. Hem Morzaria Luna por generar las proyecciones de la temperatura superficial del mar, utilizadas como base para hacer los modelos de distribución potencial futuros, por tu apoyo y por ayudarme a entender más sobre los escenarios de cambio climático.

Al Dr. Townsend Peterson por recibirme en tu laboratorio para realizar una estancia en la Universidad de Kansas, por dedicarle tiempo a mi trabajo enseñándome cosas nuevas, por compartir tus conocimientos y por demostrarme que a todo problema existe una solución. También agradezco a la Dra. Lindsay Campbell por su tiempo y por enseñarme pacientemente cosas nuevas en un tema que me apasiona tanto. Mi tiempo en Kansas fue productivo y divertido a la vez. Gracias al grupo de trabajo y a las

personas tan lindas que conocí durante ese tiempo por hacer de mi estancia una experiencia tan grata y feliz.

Al Dr. Saúl Álvarez por sus asesorías respecto a las variables ambientales y por transferirme sus conocimientos sobre la oceanografía del golfo de California.

A Elizabeth Farías por siempre responder a mis dudas, ayudarme con todos los trámites fundamentales durante la realización de la maestría y por siempre estar sonriente.

A todas las personas del laboratorio de sistemas arrecifales de la UABCS que colaboraron en la realización de mi tesis. Un especial agradecimiento a David Petatán por compartirme y extraer los datos de las variables ambientales del NODC y por estar siempre dispuesto a ayudarme (especialmente durante mis momentos de crisis), a Gaby Cruz por enseñarme tanto sobre el uso del ArcGIS y de MaxEnt, y por apoyarme siempre, a Daniel Auliz por apoyarme durante los trámites para llevar a cabo mi estancia en Kansas, por compartirme tus conocimientos y tu ayuda en todo lo relacionado a los escenarios de cambio climático, a Sara Melo por arrastrarme por el buen camino de los modelos de nicho, compartirme tu pasión en el tema y tus conocimientos, y por ser una gran amiga.

A mí familia. Mis papás, por ser mis maestros en la vida, siempre creyendo en mí, apoyándome en todas mis decisiones y extendiéndome su mano cuando caigo para ayudar a levantarme. Mis hermanos, por las pláticas, los buenos momentos, su apoyo y por mantenernos siempre en contacto a pesar de que llevamos viviendo lejos tantos años. Mis abuelos, por su cariño y por estar siempre pendientes de mí tanto profesional como emocionalmente, me siento muy afortunada por todos los momentos que hemos pasado juntos. También, agradezco a mi mamá por toda su ayuda durante la realización del escrito de la tesis.

A todas las personas que me han acompañado de una u otra manera a lo largo de estos dos años en Ensenada. Gracias a ustedes mi vida en este lugar ha sido divertida, feliz e intensa (en todo el sentido de la palabra), haciéndome sentir siempre apreciada y apoyándome durante los momentos buenos y malos.

A mis mejores amigas en Ensenada (Amparo, Maite, Tati y Bárbara), porque cada una ha aportado algo muy significativo a mi vida. Amparo, gracias por enseñarme la verdadera amistad incondicional (cariño, honestidad, intensidad y compasión). Maite, gracias por siempre estar ahí, y por impulsarme a creer y hacer cosas de las cuales a veces por diferentes razones no me siento capaz. Tati, gracias por tu optimismo y por siempre ver una solución a las circunstancias de la vida. Bárbara, gracias por siempre estar dispuesta a escucharme, apoyarme y enseñarme con tanta paciencia, por creer en mí y siempre ayudarme a ir hacia adelante. ¡Las quiero mucho!

Finalmente, agradezco a todos los mexicanos que pagan sus impuestos, porque gracias a eso pude tener el privilegio de ser becada para hacer una maestría en lo que me apasiona en la vida: la vida marina.

Tabla de contenido

	Página
Resumen español	ii
Resumen inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
1 Introducción y antecedentes	1
1.1 Cambio climático y pesquerías	1
1.2 Peces de importancia comercial en el Norte del Golfo de California (NGC)	4
1.3 Modelado de distribución de especies (MDE)	7
1.4 Justificación.....	10
2 Objetivos e hipótesis	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
2.3 Hipótesis	13
3 Material y métodos	14
3.1 Área de estudio	14
3.2 Datos de ocurrencia de las especies.....	16
3.3 Variables oceanográficas	18
3.3.1 Proyecciones de la temperatura superficial del mar (TSM) para el año 2050 ...	22
3.4 Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)	25
3.4.1 Evaluación de los modelos	27
3.5 Estimaciones de los cambios en las áreas de pesca del NGC	28
3.5.1 Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca	29
4 Resultados	31
4.1 Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)	31
4.2 Estimaciones de los cambios en las áreas de pesca del NGC	37
4.2.1 Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca	38

5	Discusión.....	39
5.1	Alcances y limitaciones del modelado de nicho ecológico	39
5.2	Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)	41
5.3	Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca	47
6	Conclusiones	50
7	Recomendaciones	51
	Lista de referencias bibliográficas	52
	Anexos	63

Lista de figuras

Figura	Página	
1	Diagrama de BAM. El círculo verde “A” representa el conjunto de factores abióticos que son apropiados para la especie y se puede considerar como el nicho fundamental. El círculo rojo “B” representa la interacción de las especies. La zona en dónde se intersectan A y B representa la extensión geográfica del nicho realizado. El círculo azul “M” está compuesto por aquellas partes del mundo que son accesibles para la especie, donde no existen barreras para su movimiento y colonización. La zona de intersección entre A, B y M (P) se entiende como una región geográfica que contiene el conjunto de factores abióticos y bióticos que son adecuados y que es accesible para la especie, por lo que es equivalente a la distribución geográfica de ésta (Soberón y Peterson, 2005).....	8
2	Mapa del norte del Golfo de California y de las comunidades pesqueras de la zona. Las líneas indican Áreas Naturales Protegidas marinas y costeras. Los datos de la población corresponden al año 2010 (tomado de Morzaria-Luna et al. 2014).....	16
3	Comportamiento de los escenarios RCP pertenecientes al quinto reporte del CIMIP5 según: a) el forzamiento radiativo (W/m ²) y b) los cambios en la concentración de CO ₂ estimados para el año 2100 (van Vuuren et al., 2011).....	24
4	Cambio global en la temperatura superficial del mar para el intervalo de tiempo de 2000-2100. Las líneas indican los diferentes RCPs y los números indican los valores de temperatura para el RCP 2.6 (32 °C) y el RCP 8.5 (39 °C; IPCC, 2014).....	24
5	Mapas de distribución potencial para las especies que mantendrán en su totalidad sus zonas de distribución. Los polígonos de pesca están señalados con un círculo negro	33
6	Mapas de distribución potencial para las especies que tendrán estabilidad y una posible pérdida en sus zonas de distribución. Los polígonos de pesca de la cabrilla sardinera, la baqueta y la curvina golfina se muestran en color negro; para la baya están señalados con un círculo negro.....	34
7	Mapas de distribución potencial para las especies que tendrán estabilidad, y una posible pérdida y ganancia en sus zonas de distribución. Se muestran los polígonos de pesca en color negro para la curvina golfina y el chano norteño. Para la totoaba el límite de la zona de pesca se señala con una línea negra.....	36

- 8 Ejemplo de los modelos de distribución potencial obtenidos en toda el área de distribución geográfica para: a) *Mycteroperca rosacea* (cabrilla sardinera), b) *Mycteroperca jordani* (baya) y c) *Cynoscion parvipinnis* (curvina de aleta corta). Se muestran las zonas en donde las especies permanecerán estables, y aquellas en donde podría haber una pérdida o ganancia en la distribución potencial..... 44
- 9 Modelo de la distribución potencial obtenido en toda el área de distribución geográfica para *Mycteroperca prionura* (cabrilla chiruda). Los puntos de color amarillo son los registros de ocurrencia utilizados para la modelación. Se muestran las zonas en donde la especie permanecerá estable, y aquellas en donde podría haber una pérdida o ganancia en la distribución potencial..... 45

Lista de Tablas

Tabla		Página
1	Número de registros georreferenciados y área de modelación utilizada para realizar los modelos de distribución potencial de las 12 especies de peces de interés. Los nombres comunes se extrajeron de Page et al. (2013).....	18
2	Variables oceanográficas seleccionadas para realizar los modelos de distribución potencial	22
3	Modelos del Sistema Global que fueron utilizados para generar el ensamble para proyectar los cambios de la temperatura superficial del mar	23
4	Porcentaje de estabilidad, pérdida y ganancia para cada especie respecto a sus respectivas áreas de pesca bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.....	38

1 Introducción y antecedentes

1.1 Cambio climático y pesquerías

Los modelos de cambio climático marcan una alta probabilidad de que el incremento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ y otros gases de invernadero llegarán a provocar un aumento en el promedio de la temperatura global y cambios en la precipitación y en el aporte de agua dulce, así como en el balance de los carbonatos y el nivel medio del mar (IPCC, 2014). Debido a la conexión que existe entre los sistemas costeros y marinos, el cambio climático va a interactuar con factores adicionales como el aporte de nutrientes provenientes de zonas terrestres, la contaminación, la sobrepesca y la degradación del hábitat, lo que maximizará los efectos potenciales (Crain, Halpern, Beck, y Kappel, 2009).

El cambio climático también está provocando modificaciones en los procesos físicos y químicos de los océanos. Uno de los mejores ejemplos es que el promedio global de la temperatura superficial del mar (TSM) se ha incrementado ~0.4 °C en las últimas décadas (IPCC, 2014). Las proyecciones proporcionadas por el Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) estiman un incremento potencial de la temperatura global para mediados de siglo de ~2.0 °C para un escenario con concentraciones elevadas de CO₂ (IPCC, 2014), mientras que en el Pacífico Oriental Tropical se espera que para la década 2020-2029 haya un incremento potencial que oscila entre 0.5 a 1 °C (Martínez-Arroyo, Manzanilla-Naim, y Zavala-Hidalgo, 2011). Este aumento de la TSM podría acompañarse por cambios en la velocidad de las corrientes, en los eventos de surgencia (Lluch-Cota et al., 2010; Martínez-Arroyo et al., 2011) y en una reducción en la solubilidad del oxígeno, lo que aunado con la mayor estratificación y los cambios en la circulación, disminuiría las tasas metabólicas de los organismos (Cheung, Pauly, y Sarmiento, 2013; Gardiner, Munday, y Nilsson, 2010; MacNeil et al., 2010; Pörtner y Peck, 2010). Además, el incremento de la temperatura puede ocasionar que algunos taxa marinos, cuyas respuestas fenológicas dependen de la temperatura, presenten modificaciones en su temporalidad y comportamiento reproductivo, lo que afectará aspectos como la

conectividad y el manejo de los stocks pesqueros (Pankhurst y Munday, 2011; Pörtner y Knust, 2007).

Una de las respuestas documentadas de los peces ante el incremento de la temperatura del mar ha sido el alterar su distribución espacial a nivel de población o de manera individual (Brander et al., 2003). MacNeil et al. (2010) mencionan que de manera general, las especies de peces que habitan zonas templadas expandirán su rango de distribución geográfica hacia zonas más frías debido al cambio climático, mientras que aquellas que habitan aguas más calientes (trópicos) se desplazarán hacia las zonas templadas, modificando así la composición de las comunidades ictiológicas. Por otro lado, Perry, Low, Ellis, y Reynolds (2005) mostraron que algunos peces en el Mar del Norte han respondido notoriamente a los recientes incrementos en la temperatura del mar, de tal forma que dos terceras partes de las especies se han desplazado tanto en latitud (hacia el norte) como en profundidad durante los últimos 25 años. Un ejemplo similar lo ofrecen Cheung et al. (2009), quienes hicieron modelos proyectando la distribución de 836 especies de peces comerciales a nivel mundial bajo tres escenarios de cambio climático representando concentraciones de gases de invernadero altas, medianas y bajas. Los autores encontraron que para el año 2050, podrían haber eventos de extinción locales en regiones subpolares, en los trópicos y en mares semicerrados como el Mar Mediterráneo, y que algunas especies de peces pelágicos y demersales se desplazarán hacia zonas polares.

Las modificaciones reportadas y previstas en la distribución espacial de los peces podrían producir cambios en la composición de la captura de especies objetivo en localidades específicas, así como en los sitios donde los peces son desembarcados y procesados. Esto conlleva a alteraciones en la distribución espacial y temporal en el esfuerzo pesquero, y en las características de la flota (Kaplan, Gray, y Levin, 2013). Estas transformaciones afectarán en conjunto la efectividad de las acciones de manejo existentes, incrementarán la vulnerabilidad de las especies marinas a los impactos antropogénicos, y eventualmente amenazarán la disponibilidad del alimento para los seres humanos (MacNeil et al., 2010).

Para el ambiente marino, los estudios que analizan los impactos de las proyecciones de cambio climático sobre las pesquerías generalmente se enfocan en pocas especies y efectúan inferencias cualitativas sobre los cambios potenciales (Brander, 2007; Roessig, Woodley, Cech Jr, y Hansen, 2004). Uno de los mejores ejemplos en donde se evalúa cuantitativamente la redistribución del potencial de captura a nivel global bajo escenarios de cambio climático para el año 2055 lo presentan Cheung et al. (2010). Los autores mencionan que las capturas disminuyen para la mayoría de las regiones costeras del planeta y sobre todo en la Antártida. En contraste, en latitudes altas las capturas se incrementan considerablemente (>50%), particularmente en zonas alejadas de la costa del Atlántico Norte, el Pacífico Norte y el Ártico. Para el Pacífico Tropical se pronostica una disminución del 42% en las capturas, derivado de los cambios esperados en los rangos de distribución de las especies y en la disminución de la producción primaria dentro del rango de distribución de las especies.

Dentro de los escasos trabajos realizados en México sobre los posibles efectos del cambio climático en las pesquerías, se encuentra el de Martínez-Arroyo et al. (2011). Los autores estudiaron la vulnerabilidad de 16 pesquerías en México ante el cambio climático en siete ambientes marinos (arrecifes, pastos marinos, lagunas, humedales, corrientes marinas, frentes y surgencias) que son susceptibles a ser afectados por variables climáticas. Los autores concluyen que, entre los impactos que afectarían la producción pesquera en México, destacan el incremento de la TSM, el aumento en el nivel del mar y la disminución de los caudales de los ríos por cambios en los patrones de precipitación.

1.2 Peces de importancia comercial en el Norte del Golfo de California (NGC)

El Golfo de California es una región conocida por su gran riqueza biológica, endemismo y productividad, derivada de eventos de surgencia y otros procesos oceanográficos (Lluch-Cota et al., 2007).

Una gran parte de la producción pesquera del norte del Golfo proviene de las especies comerciales que forman agregaciones para desovar en sitios específicos y durante ciertas temporadas (Aburto-Oropeza, Erisman, Valdez-Ornelas, y Danemann, 2008; Sala, Aburto-Oropeza, y Paredes, 2003). La mayoría de éstas pertenecen a las familias Serranidae, Scianidae y en menor proporción a la familia Lutjanidae. En las últimas décadas, la persistencia en la sobrepesca ha provocado una disminución en las poblaciones de peces costeros y en sus pesquerías asociadas (DOF, 2004), ocasionando que algunas especies se encuentren actualmente en peligro, incluyendo a las familias antes mencionadas (Aburto-Oropeza et al., 2008; Cisneros-Mata, Montemayor-López, y Román-Rodríguez, 1995; Sala, Aburto-Oropeza, Reza, Paredes, y López-Lemus, 2004).

Los serránidos (cabrillas) conforman una familia de peces cosmopolita que habitan en aguas tropicales, subtropicales y templadas, y representan uno de los grupos con mayor riqueza en los arrecifes (Aburto-Oropeza et al., 2008). Debido a que los serránidos presentan dietas carnívoras, se consideran depredadores de alto nivel y especies clave en dichos ecosistemas (Allen y Robertson, 1994). La mayoría de las especies de serránidos habitan en el fondo o cerca de éste, sin embargo, algunas forman grandes cardúmenes y se alimentan de plancton (Allen y Robertson, 1994). Esta familia de peces está entre las más importantes desde la perspectiva de la pesca artesanal en México; la Carta Nacional Pesquera (SAGARPA-INAPESCA, 2012) menciona 16 especies como las objetivo de captura, incluyendo a la baqueta *Hyphorhodus acanthistius* (Gilbert, 1982), la baya *Mycteroperca jordani* (Jenkins y Evermann, 1889); catalogada como especie amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), la cabrilla sardinera *Mycteroperca rosacea* (Streets, 1877) vulnerable según UICN, la cabrilla chiruda *Mycteroperca prionura*

(Rosenblatt y Zahuranec, 1967) considerada como especie casi vulnerable por la UICN, la cabrilla pinta *Epinephelus analogus* Gill, 1863 y la cabrilla de roca *Paralabrax maculatofasciatus* (Steindachner, 1868), entre otras. Las especies de esta familia tienen una alta susceptibilidad a la pesca por ser longevas, tener una maduración tardía y formar grandes agregaciones durante sus etapas reproductivas (Cheung, Watson, Morato, Pitcher, y Pauly, 2007; Erisman et al., 2010a).

Por otra parte, los peces de la familia Sciaenidae se distribuyen globalmente, aunque sobre todo en mares tropicales y subtropicales. Son demersales y habitan en fondos arenosos o lodosos de playas o bahías protegidas, estuarios y en la boca de los ríos (Allen y Robertson, 1994). Los scianidos representan uno de los grupos de mayor importancia comercial dentro de los recursos marinos del Golfo de California (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998), donde están representados por alrededor de 30 especies (Van der Heiden, 1985) de las cuales, al menos tres se consideran endémicas de esa región: 1) la totoaba *Totoaba macdonaldi* (Gilbert, 1890) considerada como especie en peligro crítico por la UICN, 2) la curvina golfina *Cynoscion othonopterus* (Jordan y Gilbert 1882) catalogada como especie vulnerable por la UICN y 3) el chano norteño *Micropogonias megalops* (Gilbert 1890). De ellas la más conocida es la totoaba debido a que soportó una de las principales pesquerías del norte del Golfo de California desde principios del siglo pasado (Cisneros-Mata et al., 1995). Por otro lado, la información taxonómica y biológica de las otras dos especies endémicas es limitada, a pesar de que actualmente son objeto de explotación pesquera a gran escala, especialmente en la parte norte del Golfo (Erisman, Moreno-Báez, Mascareñas-Osorio, y Aburto-Oropeza, 2010b; Román-Rodríguez, 2000).

Cabe mencionar que hoy en día únicamente la totoaba está protegida totalmente de la extracción comercial y que la curvina golfina tiene épocas de veda durante su temporada de agregación para llevar a cabo el desove (Cisneros-Mata et al., 1995; Erisman et al., 2012). Además de estas tres especies endémicas, la curvina de aleta corta *Cynoscion parvipinnis* se considera una de las especies objetivo de pesca de esta zona y es capturada hasta por 15 cooperativas pesqueras de los estados de Baja California y Sonora (Moreno-Báez et al., 2012).

Finalmente, los peces de la familia Lutjanidae se distribuyen en todos los mares tropicales, pero la mayoría habitan en la región del Indo Pacífico. Los pargos y sus aliados suelen habitar en aguas someras y hasta 100 m de profundidad, cerca de arrecifes (Allen y Robertson, 1994). Se consideran depredadores activos y sus dietas son variadas, basadas principalmente en peces. Dentro de las especies de esta familia que forman parte de la pesquería en el norte del Golfo de California se encuentran el pargo amarillo *Lutjanus argentiventris* (Peters, 1869) y el pargo coconaco *Hoplopagrus guentherii* Gill, 1862, ambas consideradas como especies de preocupación menor por la UICN. Estas especies tienen un rango de distribución amplio (desde las costas de Baja California hasta Perú, incluyendo la mayoría de las islas oceánicas adyacentes al continente americano (Robertson y Allen, 2015), y conforman una parte importante de las capturas en el norte del Golfo de California, en donde se pescan por 13 y 15 cooperativas pesqueras, respectivamente (Erisman et al., 2010a; Moreno-Báez et al., 2012). El pargo amarillo y el coconaco son vulnerables a la pesca debido a que forman agregaciones reproductivas de mayo a septiembre, las cuales coinciden con su temporada de captura (Erisman et al., 2010b; Sala et al., 2003).

Los sistemas sociales que dependen de la pesca artesanal en el Golfo de California, pueden ser particularmente vulnerables al cambio climático global por la limitada escala a la que realizan sus actividades pesqueras, y a otros factores socioeconómicos y demográficos (Morzaria-Luna, Turk-Boyer, y Moreno-Báez, 2014). Debido a ello, esa región representa un excelente escenario para evaluar cuáles podrían ser los cambios potenciales que ocurrirían en la distribución de los taxa blanco de las capturas, y si las actuales áreas de pesca se mantendrán en el futuro. Esto es factible gracias al gran trasfondo de información científica existente sobre la biología y distribución de las especies, sobre las pesquerías locales, y a la disponibilidad de escenarios adecuados de cambios en la temperatura superficial a futuro (IPCC, 2014; Morzaria-Luna, Reyes-Bonilla, Auliz-Ortiz, y Cruz-Piñon, en prep.). Estudios de este tipo son importantes si consideramos que la pesca artesanal en el norte del Golfo genera alrededor de 50,000 trabajos, y que esta región genera cerca del 50% de la producción pesquera nacional, involucrando aproximadamente a 26,000 embarcaciones pesqueras (Cisneros-Mata, 2010).

1.3 Modelado de distribución de especies (MDE)

Los MDE se basan en la teoría del nicho ecológico de las especies, el cual fue definido por Hutchinson (1957) como un hipervolumen n-dimensional, en donde las dimensiones constituyen distintas variables ambientales. El nicho de una especie representa las combinaciones de estos factores que permiten a los individuos sobrevivir y reproducirse, y con ello a que las poblaciones mantengan sus números (Brown y Lomolino, 1998). Otra aportación por parte de Hutchinson, fue la diferenciación entre el nicho fundamental y el nicho realizado; el nicho fundamental es el conjunto de factores abióticos en los cuales una especie es capaz de persistir, mientras que el nicho realizado se refiere a las condiciones en las que la especie realmente existe en la naturaleza, considerando las interacciones con otros organismos (Wiens y Graham, 2005). Los MDE tratan de reflejar el nicho fundamental de las especies en cuestión, ya que la información sobre las interacciones ecológicas es muy limitada (Morales-Castilla, Matias, Gravel, y Araújo, 2015).

El rango de distribución de una especie está en función de su ecología y de su historia evolutiva (Brown, 1995). Soberón y Peterson (2005) describen tres factores principales que determinan la zona de distribución de un taxón: 1) las condiciones abióticas (A, en la Figura 1), incluyendo aspectos del clima y del ambiente físico que imponen los límites fisiológicos para que una especie pueda persistir, 2) los factores bióticos (B), referentes al conjunto de interacciones que se generan con otras especies y que modifican la habilidad de una especie en particular para mantener sus poblaciones, y 3) las regiones que son accesibles para la dispersión de la especie a partir de las áreas en donde se originaron evolutivamente (M). Idealmente, una especie estará presente en aquel lugar donde se cumplan las tres condiciones antes mencionadas (Elith et al., 2006; Soberón y Peterson, 2005). Estos tres factores (Bióticos, Abióticos y Movimiento) se resumen en un “diagrama BAM” (Figura 1).

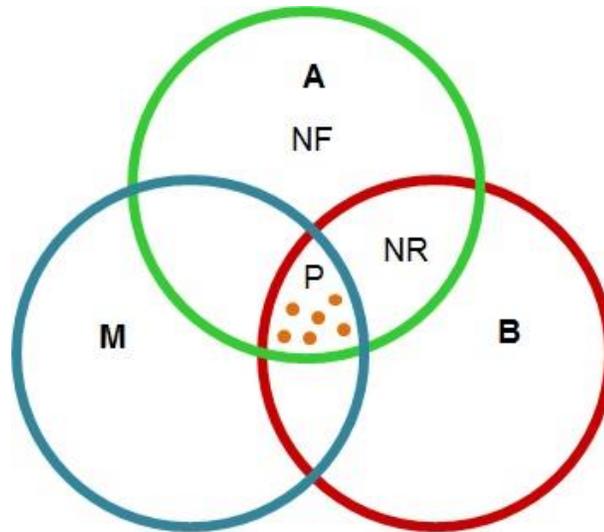


Figura 1. Diagrama de BAM. El círculo verde “A” representa el conjunto de factores abióticos que son apropiados para la especie y se puede considerar como el nicho fundamental. El círculo rojo “B” representa la interacción de las especies. La zona en donde se intersectan A y B representa la extensión geográfica del nicho realizado. El círculo azul “M” está compuesto por aquellas partes del mundo que son accesibles para la especie, donde no existen barreras para su movimiento y colonización. La zona de intersección entre A, B y M (P) se entiende como una región geográfica que contiene el conjunto de factores abióticos y bióticos que son adecuados y que es accesible para la especie, por lo que es equivalente a la distribución geográfica de ésta (Soberón y Peterson, 2005).

En la actualidad existen distintos algoritmos para modelar la distribución de las especies. Peterson et al. (2011) clasifican éstos de acuerdo al tipo de datos biológicos que se requieren de entrada. Uno de estos enfoques utiliza únicamente datos de presencia de la especie e información del “trasfondo ambiental”, que está conformado por aquellos sitios en donde no existen registros de ocurrencia de la especie en cuestión. Este enfoque contrasta las condiciones climáticas u oceanográficas donde se sabe que la especie está presente con aquéllas donde existe el potencial de ocurrencia del taxón (Phillips, Anderson, y Schapire, 2006; Phillips y Dudík, 2008). Se ha demostrado que este enfoque es muy sensible en cuanto a la selección del área de modelación, ya que ésta influye directamente en el desempeño y la evaluación de los modelos (Barve, Barve, Jiménez-Valverde, Lira-Noriegaa, Maher, 2011). Por esta razón, se recomienda partir de una hipótesis *a priori* para la selección de la misma considerando principalmente los patrones de dispersión y colonización de la especie en cuestión, así como su historia evolutiva, ya que ésta ayuda a conocer el nicho fundamental de la misma (Barve et al., 2011; Saupe et al., 2012).

Uno de los algoritmos más utilizados para modelar la distribución de especies utilizando datos de presencia y del trasfondo ambiental está basado en el principio de máxima entropía, implementado en el programa MaxEnt (<https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>; Phillips et al., 2006). La máxima entropía fue descrita por Shannon (1948) como “una medida de la cantidad de opciones que están involucradas en la elección de un evento”. El algoritmo parte del supuesto de que la ocurrencia de una especie es equiprobable dentro del área de estudio (M). Para poder delinear entonces el nicho ecológico, el programa identifica el conjunto de las características ambientales en los registros de ocurrencia de la especie y busca una distribución de probabilidad lo más cercana posible a la uniformidad aplicando la máxima entropía, evitando suposiciones que no son soportadas por los datos (Phillips et al., 2006). De esta manera, el algoritmo estima la idoneidad del hábitat para la especie y como resultado final arroja un mapa en donde se muestra la probabilidad de ocurrencia de la especie en cuestión (Anderson, Lew, y Peterson, 2003). Cabe mencionar que el utilizar este algoritmo para modelar la distribución de especies proporciona ciertas ventajas como el tener un mayor poder discriminativo y conocer cuáles son los factores ambientales que contribuyen más al modelo (Elith et al., 2006; Peterson, Papeş, y Eaton, 2007; Phillips et al., 2006). Además, se ha comprobado que su desempeño es superior en comparación a otros métodos al trabajar con un número de muestra pequeño (<20 registros; Pearson, Raxworthy, Nakamura, y Peterson, 2007).

Para la mayoría de las especies de peces existen datos generales sobre su distribución en el Pacífico americano (Love, Mecklenburg, Mecklenburg, y Thorsteinson, 2005; Robertson y Allen, 2015). Sin embargo, los mapas son imprecisos si se quieren revisar detalles en áreas espaciales pequeñas, por ejemplo en el Golfo de California. Para subsanar este tipo de deficiencias que se presentan en publicaciones sobre la distribución de muchos taxa se han utilizado los análisis de distribución potencial (Elith et al., 2006; Franklin y Miller, 2009), los cuales han dado excelente resultado al aplicarse a comunidades terrestres en México (Peterson et al., 2015; Peterson et al., 2002). De igual forma en el ambiente marino estas técnicas también han demostrado su eficiencia. Por ejemplo, los MDE se han utilizado en el Golfo de California para abordar problemas relacionados con la distribución de especies comerciales y organismos que

son ingenieros del ecosistema (Saavedra-Sotelo et al., 2013; Suárez-Moo et al., 2012). Además han sido utilizados para predecir cambios en el tamaño poblacional y la distribución de ciertas especies ante el cambio climático (Auliz-Ortiz, 2014; Melo-Merino, 2013)

En la actualidad existe la necesidad de entender los impactos potenciales del cambio climático sobre la distribución espacial de las especies, dado que esto impactará los servicios ambientales que las sociedades humanas aprovechan. En el caso particular de esta tesis se usó esta perspectiva para estudiar las condiciones actuales y potencialmente futuras de la distribución de algunos peces con importancia comercial residentes en el norte del Golfo de California (NGC). El análisis ayudará a predecir posibles modificaciones en las áreas de pesca de las diferentes especies y generará una idea sobre el impacto que éstas podrían tener en los ingresos que se generan anualmente en algunas localidades de esta región.

1.4 Justificación

A pesar de que se esperan modificaciones provocadas por el cambio climático en todos los ecosistemas marinos, la ciencia que se necesita a nivel regional para entender los cambios ecológicos es aún inmadura y por lo mismo, la magnitud y la extensión de la mayoría de los efectos permanecen aún desconocidos. Hoy en día se sabe que el cambio climático producirá modificaciones en los rangos de distribución de algunos peces marinos, afectando las pesquerías y teniendo posibles implicaciones socio-económicas importantes. Sin embargo, existen pocos estudios a nivel mundial enfocados a evaluar el impacto que podrían tener estas modificaciones en los sitios de captura de especies de importancia comercial. Además, la mayoría de estos trabajos reportan patrones generales a nivel poblacional o de comunidades en áreas extensas (por ejemplo, a escala global, el Mar Rojo, el Mar Mediterráneo, etc.) siendo escasos los estudios a nivel individual. Tanto los estudios de modelación de nicho como los análisis empíricos indican que las especies usualmente mostrarán respuestas individuales a cambios climáticos, por lo que las generalidades se mantendrán sólo en promedio, y no

en casos particulares. Los posibles efectos pueden ser pronosticados utilizando modelos de nicho.

Aun cuando el Golfo de California es la zona de pesca más productiva en México y genera una gran cantidad de empleos, no existen estudios sobre el posible impacto del cambio climático en la pesquería. Por esta razón, en el presente trabajo se pretende generar una primera aproximación sobre el posible impacto del cambio climático en la distribución geográfica de especies de peces objetivo de pesca en el NGC, considerando además, que ésta es quizá la única zona en México en donde se tiene información georreferenciada sobre las zonas de pesca de diferentes especies de importancia comercial a nivel local y nacional.

2 Objetivos e hipótesis

2.1 Objetivo general

Analizar con base en modelos de distribución potencial y el escenario RCP 4.5 de cambio climático, las modificaciones potenciales en las áreas de pesca del norte del Golfo de California para 12 especies de peces de importancia comercial (*Hyporthodus acanthistius*, *Mycteroperca jordani*, *M. rosacea*, *M. prionura*, *Paralabrax maculatofasciatus*, *Epinephelus analogus*, *Totoaba macdonaldi*, *Cynoscion othonopterus*, *C. parvipinnis*, *Micropogonias megalops*, *Hoplopagrus guentherii* y *Lutjanus argentiventris*).

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Generar los mapas de la probabilidad de ocurrencia actual y futura para las 12 especies de estudio, y transformarlos en mapas binarios de distribución potencial (presencia/ausencia).
- ❖ Definir el área de pesca actual para cada una de las 12 especies y relacionarla con los mapas de la distribución potencial generados previamente.
- ❖ Evaluar los posibles cambios en la distribución potencial de las especies bajo un escenario de cambio climático que represente concentraciones de radiación de calor medianas ($4.5\text{W}/\text{m}^2$) para el año 2050.
- ❖ Estimar los cambios (pérdida o ganancia) de las áreas de pesca con base en los mapas de distribución potencial generados bajo el escenario de cambio climático y sus posibles consecuencias económicas.

2.3 Hipótesis

Las 12 especies que se revisan en este estudio presentan diferentes rangos de distribución geográfica y por ello deben tener distintos niveles de tolerancia a la temperatura. Considerando esto, se espera que las especies endémicas del Golfo de California incluidas en el análisis no presentarán modificaciones en su distribución geográfica ni en sus áreas de pesca bajo un escenario de cambio climático y de incremento térmico, debido a que al ser un golfo no podrán desplazarse hacia el norte. Para el resto de las especies que se distribuyen en el Pacífico Oriental, es de esperarse que se desplazarán hacia el norte del Golfo de California propiciando una ganancia en sus áreas de pesca, ya que el incremento de la temperatura abrirá opciones de colonización.

3 Material y métodos

3.1 Área de estudio

El Golfo de California es un mar semicerrado con 1,070 km de largo y con un rango de 100–200 km de ancho (Lindsay y Engstrand, 2002). La variabilidad estacional está forzada principalmente por el Océano Pacífico, el esfuerzo del viento y los flujos superficiales de calor (Lavín, Beier, y Badan, 1997; Lavín y Marinone, 2003). El Golfo de California se caracteriza por tener características oceanográficas que lo hacen único, especialmente la mezcla de mareas de la parte norte del Golfo y la alta productividad (Alvarez-Borrego, 2010; Lavín et al., 1997).

En esta región el aporte de nutrientes proviene de los eventos de surgencia inducidos por el viento, la mezcla de mareas y el intercambio de agua que se produce entre el Golfo y en el Océano Pacífico (Lavín y Marinone, 2003). Los eventos de surgencia en la costa este del golfo son fuertes y se producen con los vientos del noroeste de diciembre a mayo, generando concentraciones de clorofila que pueden exceder los 10 mg m⁻³ (Alvarez-Borrego, 2010). Por otro lado, las surgencias en la península de Baja California se producen por los vientos del sureste en los meses de julio a octubre, los cuales suelen ser más débiles en comparación a los anteriores (Alvarez-Borrego, 2010).

Ulloa, Torre, Bourillón, y Alcantar, (2006) dividen al Golfo de California en cinco ecorregiones, dentro de las cuales se encuentra el NGC (Figura 2). Esta región tiene profundidades de 20 m en la desembocadura del Río Colorado, hasta 1,600 m en el Canal de Ballenas, y se caracteriza por presentar valores de salinidad superficial altos y temperaturas que oscilan de 10° a 32 °C en invierno y verano (Alvarez-Borrego, 2003; Lavín y Marinone, 2003).

El NGC presenta mareas que varían de >7 m durante primavera en la parte más norteña del Golfo, hasta >4 m en la región de las Grandes Islas (Alvarez-Borrego, 2010). La mezcla intensa produce un intercambio de agua hasta profundidades

mayores de 500 m, y de manera relativamente constante, de modo que su resultado es similar al de una surgencia; ello da como resultado una alta productividad todo el año en la región (Álvarez-Borrego, 2002). La mezcla por mareas provoca además que la temperatura superficial del mar sea anualmente la más fría en todo el Golfo de California (Paden, Abbott, y Winant, 1991). Los efectos mencionados, y por ende la alta productividad y gran energía producto de las mareas, se presentan con mayor intensidad en el Canal de Ballenas, Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón (Alvarez-Borrego, 2007).

Dentro del NGC se encuentra la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Figura 2). La parte más norteña de esta zona tiene un fondo o lecho marino que recibe el influjo de los depósitos deltaicos del Río Colorado y es plano y somero. La topografía es irregular, con una serie de canales y bajos con dirección noroeste-sureste (Alvarez-Borrego, 2003).

El Alto Golfo de California tiene características oceanográficas particulares por su poca profundidad, rangos extremos de temperatura, alta evaporación, alta salinidad, sedimentos finos y altos índices de turbidez (CONANP, 2007). Además, presenta ciclos de mareas diurnas y semidiurnas, con amplios rangos y se registran variaciones en el nivel del mar de 6.95 m en San Felipe y hasta cerca de 10 m en el delta del Río Colorado (Gutiérrez y González, 1989). Estas características dan origen a corrientes de mareas con velocidades de 0.2 a 0.9 m s⁻¹ a lo largo de las costas de Sonora y Baja California, respectivamente; a la vez que se produce un fenómeno de homogeneización vertical de la columna de agua (Gaxiola-Castro, Alvarez-Borrego, y Schwartzlose, 1978).

Finalmente, los patrones de corrientes muestran giros estacionales a favor y contra las manecillas del reloj en invierno y verano, respectivamente, debido a los extremos de temperaturas, los vientos estacionales y los rangos de salinidad (CONANP, 2007).

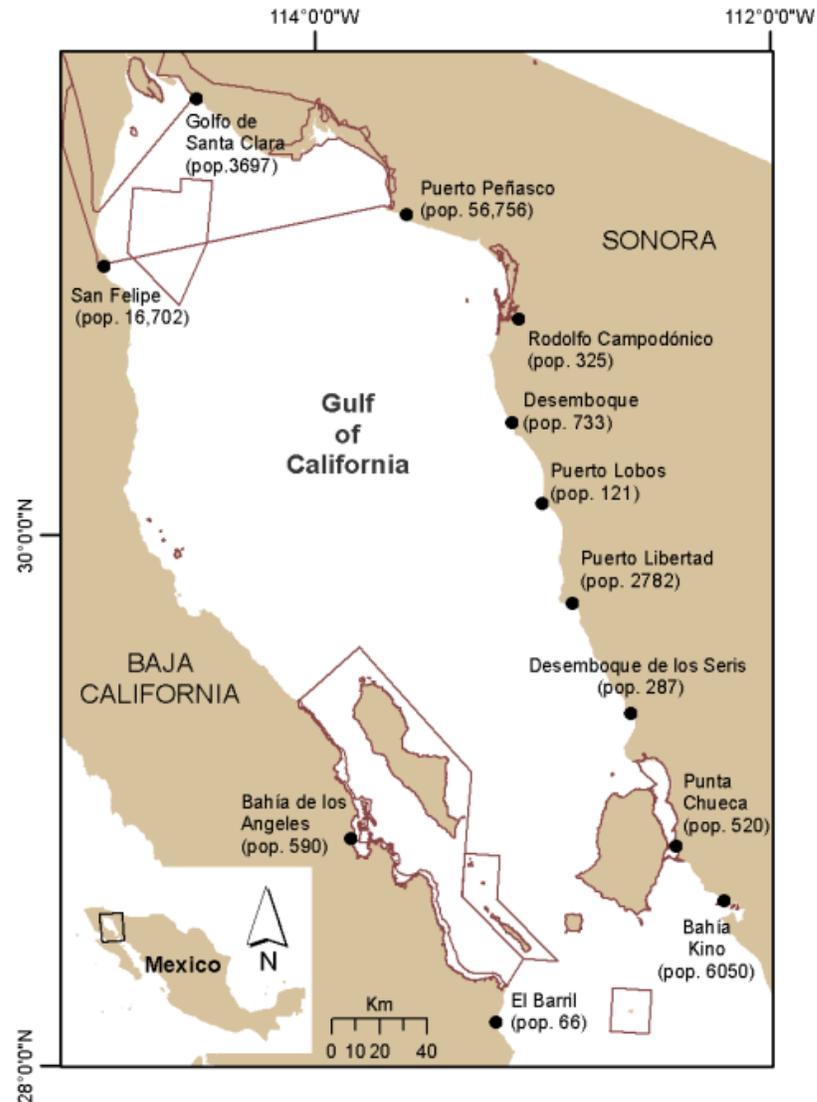


Figura 2. Mapa del norte del Golfo de California y de las comunidades pesqueras de la zona. Las líneas indican Áreas Naturales Protegidas marinas y costeras. Los datos de la población corresponden al año 2010 (tomado de Morzaria-Luna et al. 2014).

3.2 Datos de ocurrencia de las especies

El primer paso de esta tesis consistió en obtener los datos georreferenciados de ocurrencia para cada una de las 12 especies de interés, los cuales se tomaron de fuentes de acceso libre: Fishbase (www.fishbase.org), Fishnet2 (www.fishnet2.net), Global Biodiversity Information Facility (GBIF; www.gbif.org), Ocean Biogeographic Information System (OBIS; www.obis.org) y Shorefishes of the Tropical Eastern Pacific Online Information System, Smithsonian Tropical Research Institute (SFTEP;

<http://biogeodb.stri.si.edu/sfstep/>). Estos registros provienen de museos y observaciones desde el año 1950 hasta el 2012. Una vez obtenidos todos los registros se realizó una depuración exhaustiva de los mismos, en donde se eliminaron aquellos repetidos o que carecían de coordenadas geográficas.

En adición a la búsqueda en medios electrónicos, se tomaron en cuenta datos de campo generados por el Consorcio Pangas y el Laboratorio de Sistemas Arrecifales (UABCS) del 2009 y 2010, a una precisión de un segundo de latitud-longitud. Se cuenta con alrededor de 1,650 censos de 100 m², todos georreferenciados y en donde se registró la presencia y abundancia de algunas de las especies. Los sitios revisados durante estas visitas fueron (de norte a sur): Puerto Peñasco (Son.), Islote La Poma (B.C.), Isla Tiburón (Son), Isla Ángel de la Guarda (B.C.), Bahía de Los Angeles (B.C.), Isla San Pedro Mártir (Son), Isla San Esteban (Son.) y el Archipiélago de San Lorenzo (B.C.).

Los datos de referencia geográfica de los registros depurados se introdujeron en un sistema de información geográfica (ArcGIS versión 10.1) para detectar posibles errores en la localización de los avistamientos. En los casos necesarios, se realizaron correcciones eliminando aquellos registros localizados fuera del área de modelación o en tierra (Anexo 1). Posteriormente, éstos se utilizaron como base para definir el área de distribución máxima (M) la cual sería el marco geográfico para realizar los modelos de distribución potencial de cada especie. De esta manera, se definieron tres áreas genéricas para la modelación: Pacífico Oriental, Pacífico Mexicano y Golfo de California (Tabla 1; Anexo 2).

Tabla 1. Número de registros georreferenciados y área de modelación utilizada para realizar los modelos de distribución potencial de las 12 especies de peces de interés. Los nombres comunes se extrajeron de Page et al. (2013).

Especie	Nombre común	Número de registros	Área de modelación utilizada
<i>Mycteroperca jordani</i>	Baya	59	Pacífico Mexicano
<i>Mycteroperca rosacea</i>	Cabrilla sardinera	374	Pacífico Mexicano
<i>Mycteroperca prionura</i>	Cabrilla chiruda	49	Pacífico Mexicano
<i>Paralabrax maculatofasciatus</i>	Cabrilla de roca	794	Pacífico Mexicano
<i>Hyporthodus acanthistius</i>	Baqueta	156	Pacífico Oriental
<i>Epinephelus analogus</i>	Cabrilla pinta	280	Pacífico Oriental
<i>Totoaba macdonaldi</i>	Totoaba	92	Golfo de California
<i>Cynoscion othonopterus</i>	Curvina golfina	35	Golfo de California
<i>Cynoscion parvipinnis</i>	Curvina de aleta corta	185	Pacífico Mexicano
<i>Micropogonias megalops</i>	Chano norteño	35	Golfo de California
<i>Hoplopagrus guentherii</i>	Pargo coconaco	242	Pacífico Oriental
<i>Lutjanus argentiventris</i>	Pargo amarillo	810	Pacífico Oriental

3.3 Variables oceanográficas

El segundo paso consistió en seleccionar y generar las capas ambientales para construir el modelo de nicho ecológico de las especies. Para fines de este estudio, todas las variables oceanográficas se descargaron de bases de datos tomando en cuenta el área de distribución espacial máxima potencial de las especies (referente al Pacífico Oriental tropical y zonas adyacentes; coordenadas extremas: 39.4°N, 6.6°S, 77°O y 124.4°O), y posteriormente la información se recortó para cada una de las áreas de modelación indicadas antes; esta labor se completó utilizando el programa ArcGIS 10.1. Una vez definida el área de análisis, en el SIG se seleccionó el tamaño de celda o resolución a la que se procesaría la información ambiental y biológica dentro del modelo, siendo ésta de 9 x 9 km bajo la proyección cartográfica GCS_WGS_1984. Esto se hizo con la finalidad de fragmentar en unidades pequeñas y poder asignar un valor

de cada variable ambiental a cada uno de los recuadros de la rejilla (ver Anexo 3). Se seleccionó ésta porque la información oceanográfica que se toma a través de sensores remotos se encuentra a una resolución espacial de 4 x 4 Km o de 9 x 9 km. Sin embargo, realizar los modelos a resolución de 4 x 4 km aumentaba el tiempo de procesamiento y el requerimiento de memoria del sistema, haciéndolo inviable.

Como resultado de este procedimiento se generó un total de 180,269 puntos de malla para el área del Pacífico Oriental, 41,256 puntos de malla para el área del Pacífico Mexicano y 3,627 puntos de malla para el área de modelación del Golfo de California.

Debido a que los sensores remotos proporcionan una variedad de variables oceanográficas, se realizó una primera selección de éstas tomando en cuenta la relevancia biológica que presentan para las especies del presente trabajo. Para esto, se consideraron aquellas variables que tienen un efecto directo (por ejemplo, la temperatura) e indirecto (por ejemplo, la batimetría y los nutrientes) en la fisiología de las especies de estudio, siguiendo las recomendaciones de Peterson et al. (2011).

La batimetría se obtuvo de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO, por sus siglas en inglés; <http://www.gebco.net>) a una resolución de 30 segundos de arco (0.93 km). Ésta se incorporó al programa ArGIS 10.1 y se remuestreo a un tamaño de 5 minutos de arco (9 x 9 km) utilizando el método de la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), el cual ha demostrado ser un método de interpolación eficiente para conservar la variabilidad de las condiciones oceanográficas, además de minimizar los errores (Torres, Read, y Halpin, 2008). Por otro lado, la productividad primaria (Pp) se obtuvo a partir de imágenes de satélite proporcionadas por el Programa de Productividad Oceánica de la Universidad Estatal de Oregón (PPO-UEO, Ocean Productivity en inglés; <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>). Se descargaron los datos mensuales a una resolución de 9 x 9 km únicamente para el año 2010 y se calculó un promedio anual. Adicionalmente, se extrajeron los valores máximos y mínimos de cada mes para obtener los valores extremos, y a partir de ahí se calculó el rango de temperatura mensual, como un indicativo de la variabilidad.

Los datos de sensores remotos: clorofila a, temperatura superficial del mar, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y coeficiente de atenuación de la luz (kd) pertenecen a la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés) y se obtuvieron del sensor MODIS-Aqua del portal Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) a una resolución de 9 x 9 km. Se utilizó una serie de tiempo mensual del 2002-2015 (a excepción de la temperatura, en la que se utilizó una serie de tiempo del 2002-2012). Se generaron climatologías para cada variable por medio del paquete computacional Matlab 6.5 y para cada uno de éstos se calculó el valor promedio, máximo, mínimo y el rango.

También se utilizaron datos *in situ* del portal del Atlas Mundial de los Océanos 2009 (<https://www.nodc.noaa.gov>). Se descargaron los valores de los promedios anuales históricos para cinco variables oceanográficas: salinidad, nutrientes (fosfatos, nitratos y silicatos) y oxígeno disuelto a resolución de 1° (111 km aproximadamente) en formato ASCII. Posteriormente, se introdujeron en un sistema de información geográfica (ArcGIS 10.1) en donde se interpolaron a una resolución de 9 x 9 km utilizando el método de la distancia inversa ponderada. Finalmente, con los nuevos valores obtenidos se calculó el valor promedio, máximo, mínimo y rango de cada una de las variables.

Cabe mencionar que las variables correspondientes a la productividad primaria, la batimetría y todas aquellas obtenidas del sensor MODIS-Aqua se utilizaron para las tres áreas de modelación (Pacífico Oriental, Pacífico Mexicano y Golfo de California). Sin embargo, para el área del Golfo de California se utilizaron además datos *in situ* del Centro Nacional de Datos Oceanográficos (NODC, por sus siglas en inglés) pertenecientes a diferentes datos históricos de cruceros oceanográficos.

Los valores de las variables oceanográficas, salinidad, nitratos, silicatos, fosfatos y oxígeno disuelto, fueron extraídos por Petatán-Ramírez (2015) y posteriormente procesados en Matlab 6.5. Todos los datos históricos disponibles fueron separados por trimestres (enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre, octubre-diciembre) y se mapearon en una rejilla de 9 x 9 km utilizando un método de interpolación por medio de una función de correlación exponencial dependiente de la distancia entre los puntos de

observación, con una escala de decaimiento de aproximadamente 200 km y una señal a ruido de 0.10. De los mapeos resultantes para cada uno de los cuatro trimestres del año se interpolaron linealmente los mapas mensuales, los cuales formaron las climatologías usadas para los cálculos (valor promedio, máximo, mínimo y rango para cada variable).

Con los procedimientos anteriores se obtuvo inicialmente un total de 39 variables oceanográficas (valor promedio, máximo, mínimo y rango para cada una, sólo valor promedio y máximo para el PAR y únicamente valor promedio para la batimetría; Anexo 4). Sin embargo, para realizar modelos de distribución potencial se recomienda utilizar la menor cantidad de variables ambientales posibles con el fin de evitar errores en la modelación y altas correlaciones entre éstas (Peterson et al., 2011). Para cubrir este requisito, se extrajeron del SIG los valores georreferenciados para cada una de las variables oceanográficas en todos los puntos de malla y se estandarizaron para evitar tener diferentes escalas en los análisis posteriores (media=0, desviación estándar=1; Zar, 1999). Con los nuevos valores obtenidos se realizó una matriz de correlación de Pearson en el paquete computacional R (Team, 2010) para cada una de las tres áreas de modelación; aquellas variables que presentaron una correlación significativa y cuyo coeficiente fuera mayor a 0.75 se consideraron como altas correlaciones y fueron descartadas para la modelación. De esta manera, se seleccionaron finalmente 20 variables ambientales para realizar los modelos de distribución potencial de las especies (Tabla 2).

Tabla 2. Variables oceanográficas seleccionadas para realizar los modelos de distribución potencial.

Variable oceanográfica	Unidad	Resolución original	Fuente	Serie de tiempo utilizada
Salinidad (máximo, mínimo)	UPS	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Nitratos (máximo, media, rango)	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Silicatos (máximo, media, rango)	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Fosfatos (máximo, media, rango)	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Temperatura (máximo, media, mínimo, rango)	°C	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2012
PAR (media)	E/m ² /día	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2015
Clorofila a (máximo, media, rango)	mg/m ³	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2015
Batimetría	m	30'' (0.93 km)	GEBCO	2010

* Datos *in situ* para el área de modelación del Golfo de California.

3.3.1 Proyecciones de la temperatura superficial del mar (TSM) para el año 2050

Las proyecciones utilizadas en el presente trabajo para realizar los modelos de distribución potencial para el año 2050 provienen de las salidas de seis modelos globales de alta resolución que forman parte del Quinto Reporte del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5; Tabla 3). Se realizó un ensamble de éstos y se hizo una reducción de escala a una resolución de 9 x 9 km para el área máxima de distribución de las especies de este trabajo (Pacífico Oriental) (Morzaria-Luna et al., en prep.).

Tabla 3. Modelos del Sistema Global que fueron utilizados para generar el ensamble para proyectar los cambios de la temperatura superficial del mar.

Nombre del modelo	Grupo / Institución responsable
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques/ Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
EC-EARTH	EC-EARTH consortium
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute
NorESM1-M	Norwegian Climate Center

Las proyecciones de la TSM se realizaron bajo escenarios RCP (Representative Concentration Pathway), los cuales están definidos por el Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2014). Estos escenarios representan forzamientos radiativos futuros (calentamiento de la atmósfera) basados en opiniones de expertos sobre el uso de tierra y emisiones de contaminantes del aire y gases de invernadero (van Vuuren et al., 2011; Figura 3a), y se traducen a concentraciones futuras de CO₂ altas, medianas y bajas (RCP 8.4, 4.5 y 2.6, respectivamente; Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2011; Figura 3b). Cada uno de éstos presenta un comportamiento e incrementos de temperatura distintos, pero en general el cambio de la temperatura global predicha para el año 2050 entre el RCP 2.6 y el RCP 8.5 es alrededor de 0.7 °C (IPCC, 2014; Figura 4).

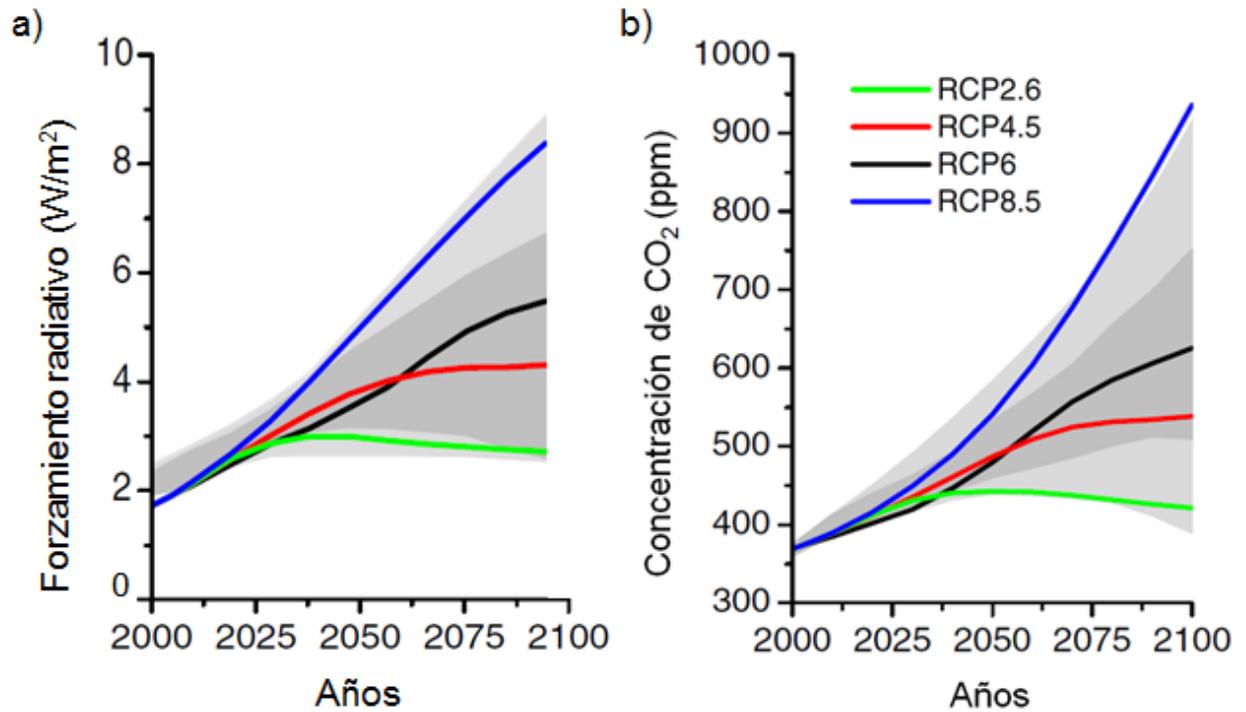


Figura 3. Comportamiento de los escenarios RCP pertenecientes al quinto reporte del CIMIP5 según: a) el forzamiento radiativo (W/m^2) y b) los cambios en la concentración de CO_2 estimados para el año 2100 (van Vuuren et al., 2011).

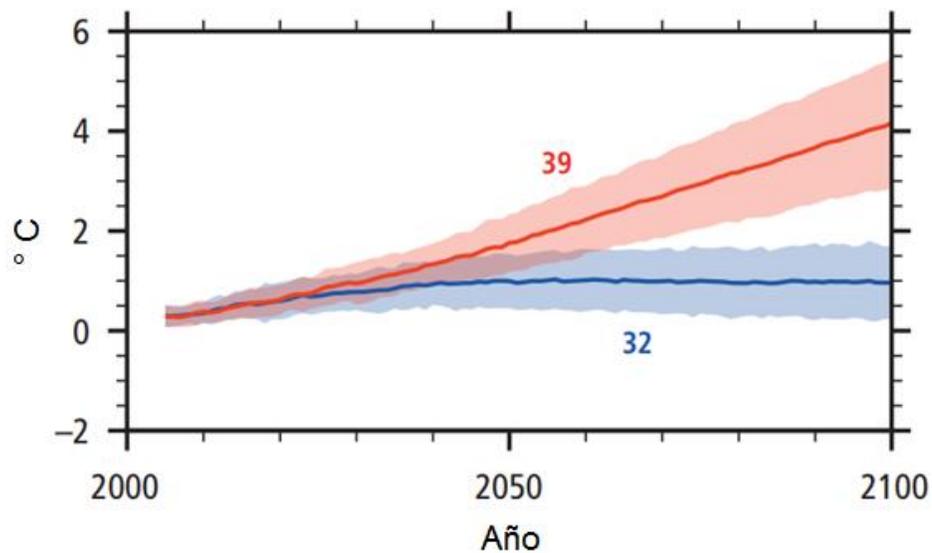


Figura 4. Cambio global en la temperatura superficial del mar para el intervalo de tiempo de 2000-2100. Las líneas indican los diferentes RCPs y los números indican los valores de temperatura para el RCP 2.6 (32 $^{\circ}C$) y el RCP 8.5 (39 $^{\circ}C$; IPCC, 2014).

En el presente estudio se contó con predicciones sólo para el promedio de la temperatura superficial del mar bajo los tres escenarios RCP mencionados antes. Para poder tener una aproximación sobre las temperaturas máximas y mínimas para el año 2050, se supuso que para cada uno de los puntos de malla el rango anual de variación de la temperatura no cambiaría para el tiempo futuro. Por lo tanto, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima con respecto a la media del tiempo presente, sería igual a la diferencia de estas temperaturas respecto a la media del tiempo futuro.

Cabe mencionar que al realizar modelos preliminares de distribución potencial de las 12 especies de interés utilizando los tres escenarios RCP se obtuvieron resultados muy similares. La razón tiene que ver con que la diferencia en la temperatura predicha para el año 2050 entre los tres RCPs es muy pequeña (0.7 °C), por lo que en los modelos proyectados no se distinguen modificaciones en cuanto a la distribución potencial de las especies. Por esta razón se decidió usar únicamente el escenario con radiaciones de calor medianas (RCP 4.5), ya que éste se estabiliza después del año 2100 y presenta un incremento de la TSM de 2.4 °C, siendo menos extremista que el RCP 8.5, y menos optimista que el RCP 2.6.

3.4 Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)

Los modelos se realizaron de manera individual para cada especie utilizando el algoritmo de máxima entropía en el programa MaxEnt (versión 3.3.3 k; Phillips et al. 2006). El programa proporciona dos tipos de salidas (cruda y logística), y para fines del presente trabajo se utilizó la salida logística, en la que se busca obtener una predicción sobre la probabilidad de encontrar a la especie de interés en un determinado punto de la malla. El programa asigna un valor de probabilidad de cero a aquellos puntos donde las condiciones son totalmente inadecuadas para la ocurrencia de la especie, y uno a aquellos que presentan condiciones totalmente idóneas para su ocurrencia (Phillips y Dudík, 2008). La salida seleccionada tiene un buen nivel de eficiencia y resulta fácil de interpretar (Peterson, Papeş, y Soberón, 2008).

En cuanto a los ajustes del programa, en su mayoría se usaron valores predeterminados siguiendo las recomendaciones de Elith et al. (2011): 500 iteraciones máximas, umbral de convergencia de 10^{-5} y un máximo de 10,000 puntos de fondo (aquellos puntos que no han sido registrados como presencias). Únicamente se modificó el método para realizar las réplicas durante la modelación, seleccionando un método de remuestreo aleatorio con reemplazo (bootstrap) y se desactivó la opción de “clamping”. Este último ajuste supone que la probabilidad de ocurrencia permanece constante para aquellos valores extremos de las variables ambientales. Por ejemplo, al tener activada esta función el programa supone probabilidades de ocurrencia iguales para todos los valores de temperatura que superen el valor máximo o mínimo, por lo que se pueden llegar a identificar probabilidades de ocurrencia altas donde probablemente no las haya en el futuro.

Una vez establecidos los ajustes, se construyeron tres modelos de distribución potencial de las 12 especies para el tiempo presente y futuro, utilizando los registros de ocurrencia depurados y la información de las variables oceanográficas mencionadas anteriormente.

Primero, se realizó un modelo de distribución potencial “actual” para cada una de las especies utilizando las 20 variables ambientales presentadas en la Tabla 2 llamado “modelo detallado para el tiempo presente”.

El segundo modelo de distribución potencial se generó de manera paralela utilizando sólo tres variables referentes a la temperatura (máxima, media y mínima), denominado “modelo simple para el tiempo presente”.

El tercer modelo se realizó siguiendo las recomendaciones de Molinos et al. (2015), utilizando las mismas tres variables de temperatura pero con los valores proyectados para el año 2050 bajo un escenario de cambio climático con RCP 4.5. Este modelo se nombró “modelo simple para el tiempo futuro”.

Los mapas obtenidos para cada especie a partir de los tres modelos mencionados se convirtieron a formato binario (presencia/ausencia) utilizando el

programa ArcGIS 10.1. Existen diferentes métodos para llevar a cabo esta conversión, en el presente trabajo se aplicó el reportado por Peterson et al. (2011) en donde se consideró el 90% de los valores de la probabilidad de ocurrencia más altos para asignar la presencia de la especie (Anexo 5).

3.4.1 Evaluación de los modelos

Una de las maneras para saber cuáles son las variables ambientales que tienen mayor importancia al momento de realizar los MDP es con la tabla de los porcentajes de contribución que tiene cada una de éstas en el ajuste del modelo; esta información puede ser utilizada además para tomar decisiones sobre la inclusión o la exclusión de ciertas variables ambientales al momento de realizar los modelos (Phillips et al., 2006).

Al hacer los modelos detallados para el tiempo presente para las 12 especies se analizaron los porcentajes de contribución que presentó cada una de las variables ambientales al modelo. Con base en esto, se decidió excluir únicamente a la batimetría para aquellas especies en donde ésta presentó un porcentaje de contribución mayor al 70%. Para realizar la evaluación de los modelos se hizo una división aleatoria de los registros de ocurrencia para entrenar al modelo (75% de los registros) y el resto se utilizaron para probarlo (25%), siguiendo las sugerencias de Franklin y Miller (2009).

Utilizando un análisis de características operativas (ROC), la curva ROC se obtiene graficando la sensibilidad o los verdaderos positivos que es la medida de la capacidad del modelo para identificar correctamente los sitios de presencia de las especies, contra la especificidad o verdaderos negativos (Phillips et al., 2006). El parámetro de comparación es el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en ingles), la cual mide la habilidad de las predicciones para discriminar la presencia de la ausencia, esperando que ésta sea mejor que un modelo aleatorio. Cuando un modelo tiene un poder predictivo excelente presenta un valor de AUC mayor a 0.9, un buen modelo tiene un AUC entre 0.7 y 0.9, mientras que un modelo con valores por debajo de 0.7 se considera con un desempeño pobre (Swets, 1988).

Una vez evaluados los tres modelos se combinaron usando un SIG. Para esto, se hizo primero una sobreposición de los modelos del tiempo presente (detallado y simple) utilizando la herramienta de “map algebra” en el programa ArcGIs 10.1. Como producto, se obtuvo un archivo raster resultante de la diferencia entre los dos modelos mencionados. Posteriormente, este archivo raster se sobrepuso al modelo del tiempo futuro utilizando la misma herramienta antes mencionada, generando así un solo mapa de distribución potencial representativo de cada especie. En cada uno de éstos se muestran: 1) aquellos sitios en donde la distribución de la especie se mantiene estable a través del tiempo, definidos como las zonas en las que coincidieron los tres modelos (detallado y simple para el tiempo presente, y simple para el tiempo futuro), 2) aquéllos donde podría haber una pérdida en el área de distribución de la especie, refiriéndose a las zonas en dónde la especie estaba presente en los modelos del tiempo presente (detallado y simple) y ausente en el tiempo futuro y 3) aquéllos en los que la especie podría colonizar áreas nuevas, definidas como las zonas en donde la especies está presente sólo en el modelo simple del tiempo futuro.

3.5 Estimaciones de los cambios en las áreas de pesca del NGC

Los polígonos de las áreas de pesca en el NGC se obtuvieron de los trabajos de Moreno-Báez, Barron, Cudney-Bueno, y Shaw (2010) y Moreno-Báez et al. (2012), y fueron procesados en el programa ArcGIS 10.1 con la finalidad de separarlos para cada una de las especies, exceptuando a la totoaba. Para este caso se generó un polígono abarcando todo el Alto Golfo de California, ya que es la zona en donde se capturaba antes del establecimiento de su veda (Cisneros-Mata et al., 1995). Las estimaciones realizadas en las áreas de pesca partieron del supuesto de que los polígonos de pesca actuales se mantendrán para el tiempo futuro.

Los mapas combinados para cada especie sirvieron como base para hacer las estimaciones de los posibles cambios en las áreas de pesca. Para llevar a cabo esto, se realizó un traslape de los mapas combinados de distribución potencial con los polígonos respectivos en el programa ArcGIS 10.1 utilizando la herramienta de “tabular

área”. De esta manera, se obtuvo la proporción de: 1) las áreas de pesca en donde no hay un cambio a pesar del cambio climático (definidas como áreas de estabilidad), 2) las áreas de pesca en las que podría haber una pérdida y 3) las áreas de pesca en las que podría haber una ganancia.

3.5.1 Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca

Las estimaciones de los posibles cambios económicos (en dólares americanos; USD al año) se realizaron en las localidades de San Felipe, Bahía de los Ángeles y el Golfo de Santa Clara, con base en los datos reportados por Erisman et al. (2015) y los avisos de arribo proporcionados por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA 2009–2013; pesca de escama).

Las estimaciones se realizaron partiendo del supuesto de que hay una relación lineal entre el valor económico de las capturas y los cambios en las áreas de pesca. Esto es, por ejemplo, si se pierde un 10% neto de las áreas de pesca en el futuro, se perdería un 10% de los ingresos económicos.

A falta de datos del valor económico de la captura en Bahía de los Ángeles se tomó el valor de San Felipe reportado por Erisman et al. (2015).

Únicamente se obtuvieron avisos de arribo de San Felipe y de Bahía de los Ángeles, por lo que las estimaciones de captura para el Golfo de Santa Clara se obtuvieron directamente a partir de Erisman et al. (2015).

Los avisos de arribo clasifican de manera individual a la baqueta y a la baya, por lo que se utilizaron estos datos para realizar las estimaciones. En el caso de las especies de serránidos los avisos de arribo las clasifican con el nombre de cabrillas y garropas, por lo que las estimaciones para la cabrilla chiruda, la cabrilla sardinera, la cabrilla de roca y la cabrilla pinta se realizaron conjuntando los datos de captura (toneladas) incluidos en ambas categorías.

Para las estimaciones de los cambios económicos de la curvina golfina, se utilizó el dato con el nombre de “corvina” reportado en los avisos de arribo y para las estimaciones del chano norteño se usó el reporte con el nombre de “chano”. Las estimaciones de la curvina de aleta corta se realizaron con base en los datos reportados por Erisman et al. (2015) bajo el nombre de “otras curvinas” debido a que los avisos de arribo no incluyen esta información. Finalmente, los datos reportados con el nombre de “pargos” en los avisos de arribo se utilizaron para generar las estimaciones del pargo amarillo y el pargo coconaco.

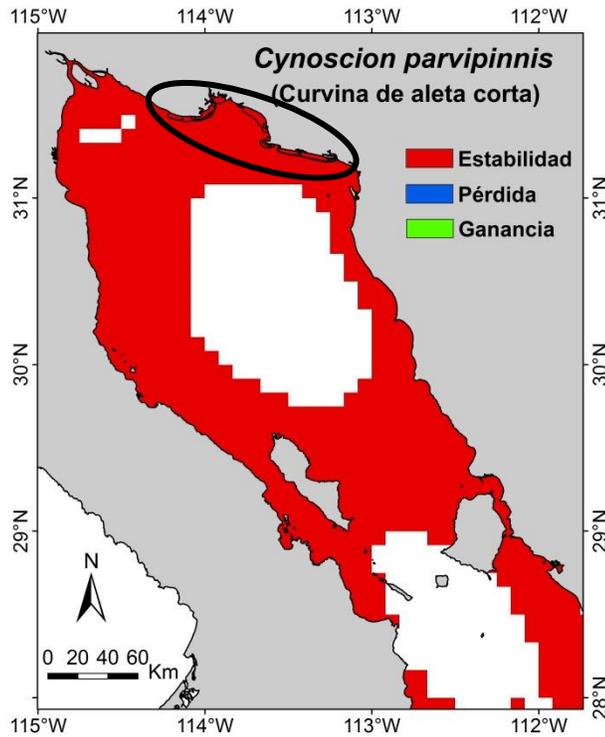
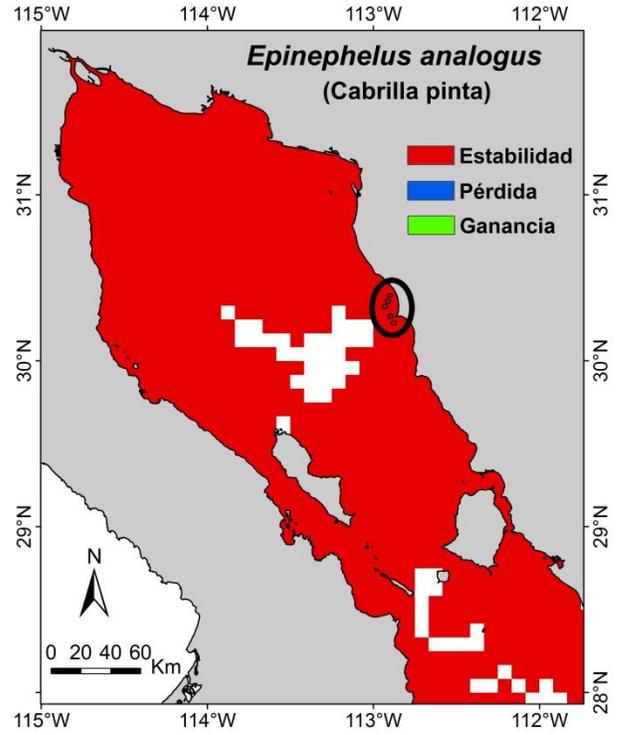
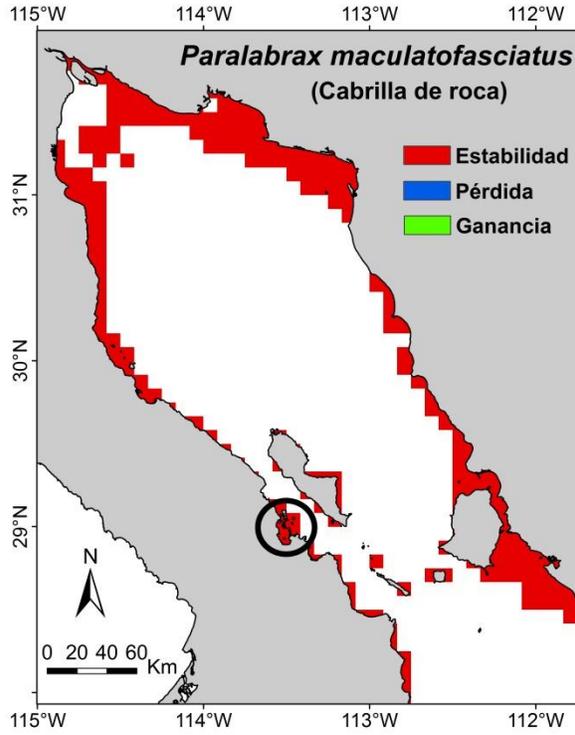
4 Resultados

4.1 Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)

La curva ROC mostró valores altos de AUC (>0.8 ; Anexo 6 y 7), lo que indica que en todos los casos se tuvo un buen valor predictivo. Esto se refleja en la concordancia observada entre los mapas de distribución potencial de los modelos detallados y simples para el tiempo presente, con los registros de ocurrencia de las especies (ver mapas en Anexo 5).

Las tablas de contribución indicaron que las variables oceanográficas más relevantes al realizar los modelos detallados para el tiempo presente fueron la clorofila a, la temperatura, la salinidad y los nitratos. En el Anexo 8 se muestra una gráfica resumiendo la información obtenida a partir de estas tablas.

Los MDP resultantes para el NGC mostraron diferentes tendencias para las especies. De manera general, los resultados obtenidos indican que todas las especies mantendrán una distribución estable en el futuro, al menos en alguna parte de su ámbito actual de residencia en el NGC. Para el caso de cinco especies (la cabrilla de roca, la cabrilla pinta, la curvina de aleta corta, el pargo coconaco y el pargo amarillo), se observó que mantendrán por completo una distribución espacial estable bajo el escenario RCP 4.5 (Figura 5).



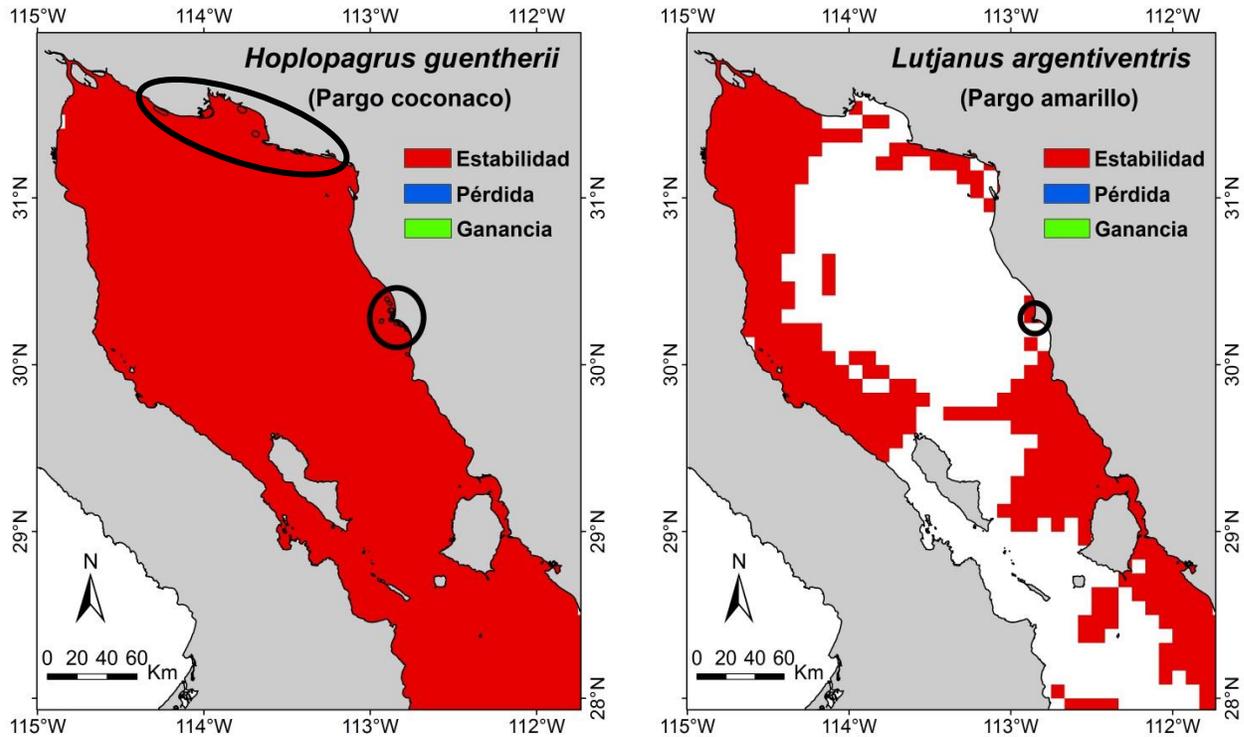


Figura 5. Mapas de distribución potencial para las especies que mantendrán en su totalidad sus zonas de distribución. Los polígonos de pesca están señalados con un círculo negro.

Por otro lado, los MDP muestran posibles pérdidas para seis especies. Para la cabrilla sardinera y la baya se observa una estabilidad en la mayoría de su distribución, presentando algunas posibles pérdidas principalmente alrededor de Isla Tiburón, al sur de San Felipe, cerca de Bahía Magdalena y cerca de El Barril (Figura 6).

De manera similar, la curvina golfinia mantendrá una distribución estable en la mayoría de sus actuales zonas de distribución, en la desembocadura del Río Colorado, y del Golfo de Santa Clara a Puerto Peñasco. Se obtuvo una posible pérdida cerca de San Felipe, en Puerto Lobos y en Puerto Libertad (Figura 6).

El mapa resultante para la baqueta muestra estabilidad en la mayor parte de su distribución, presentando una posible pérdida en la zona del Alto Golfo (Figura 6).

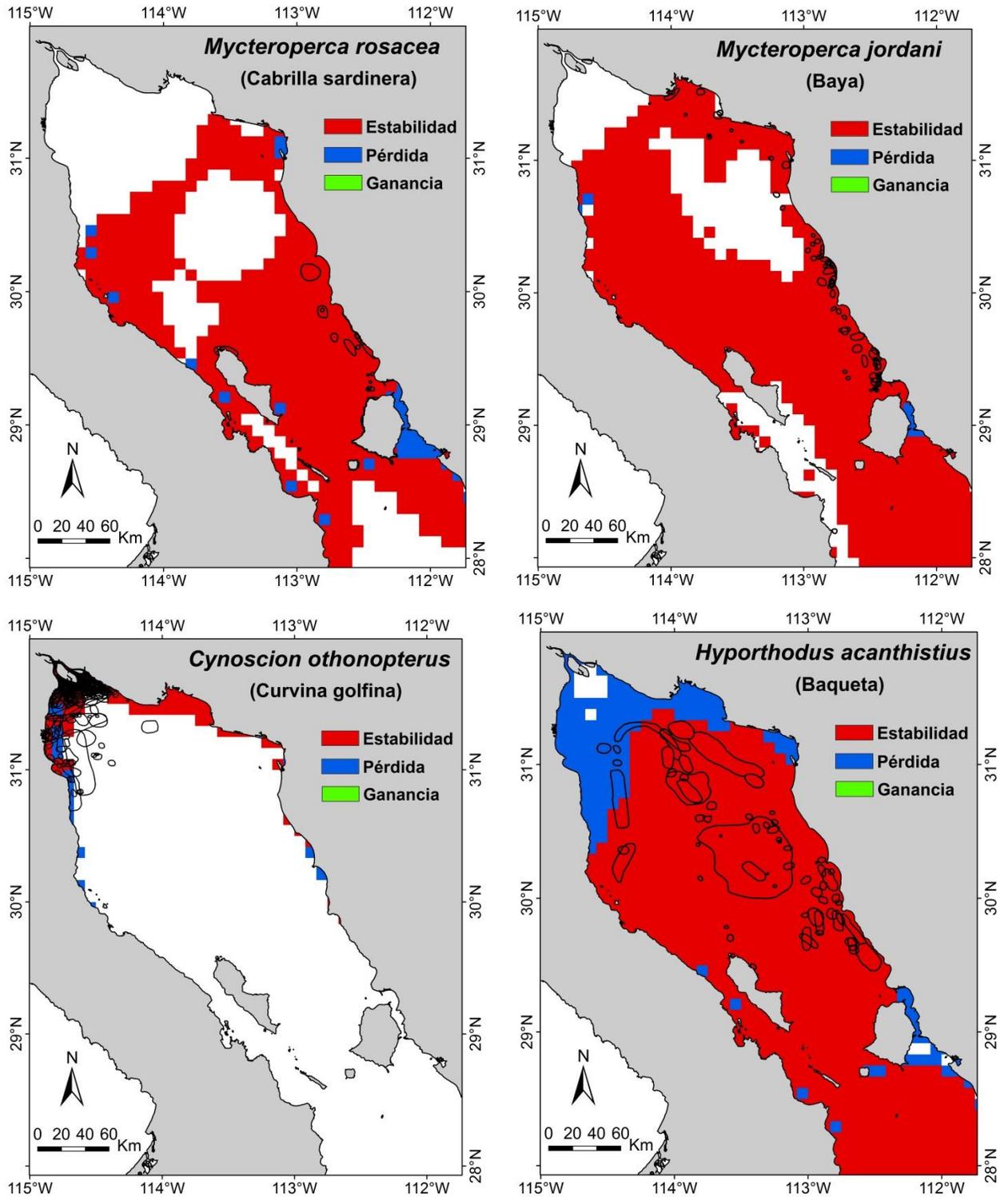


Figura 6. Mapas de distribución potencial para las especies que tendrán estabilidad y una posible pérdida en sus zonas de distribución. Los polígonos de pesca de la cabrilla sardinera, la baqueta y la curvina golfina se muestran en color negro; para la baya están señalados con un círculo negro.

Finalmente, los resultados indican que la cabrilla chiruda tendrá pocas zonas estables, sólo al sur de la Isla Ángel de la Guarda, y una posible pérdida en su distribución a lo largo del norte del Golfo desde El Socorro hasta El Barril. Además, esta especie muestra posibilidades de colonización en el área del Canal de Ballenas (Figura 7).

De manera similar, los resultados de la totoaba muestran pocas zonas de estabilidad que abarcan del Desemboque a Puerto Libertad en Sonora, una posible pérdida en la zona del Alto Golfo y al Norte de Isla Tiburón, y una posible colonización de nuevas áreas alrededor de la Isla Ángel de la Guarda, San Lorenzo, y en el Canal de Ballenas (Figura 7).

Por último, el chano norteño se mantendrá estable en la zona del Alto Golfo, de Puerto Peñasco a El Desemboque, en las costas de Sonora, y de San Felipe a Puertecitos en Baja California. Además, los resultados muestran una posible colonización de áreas nuevas, ubicada al sur de las zonas estables y expandiéndose hasta el sur del área de estudio (Figura 7).

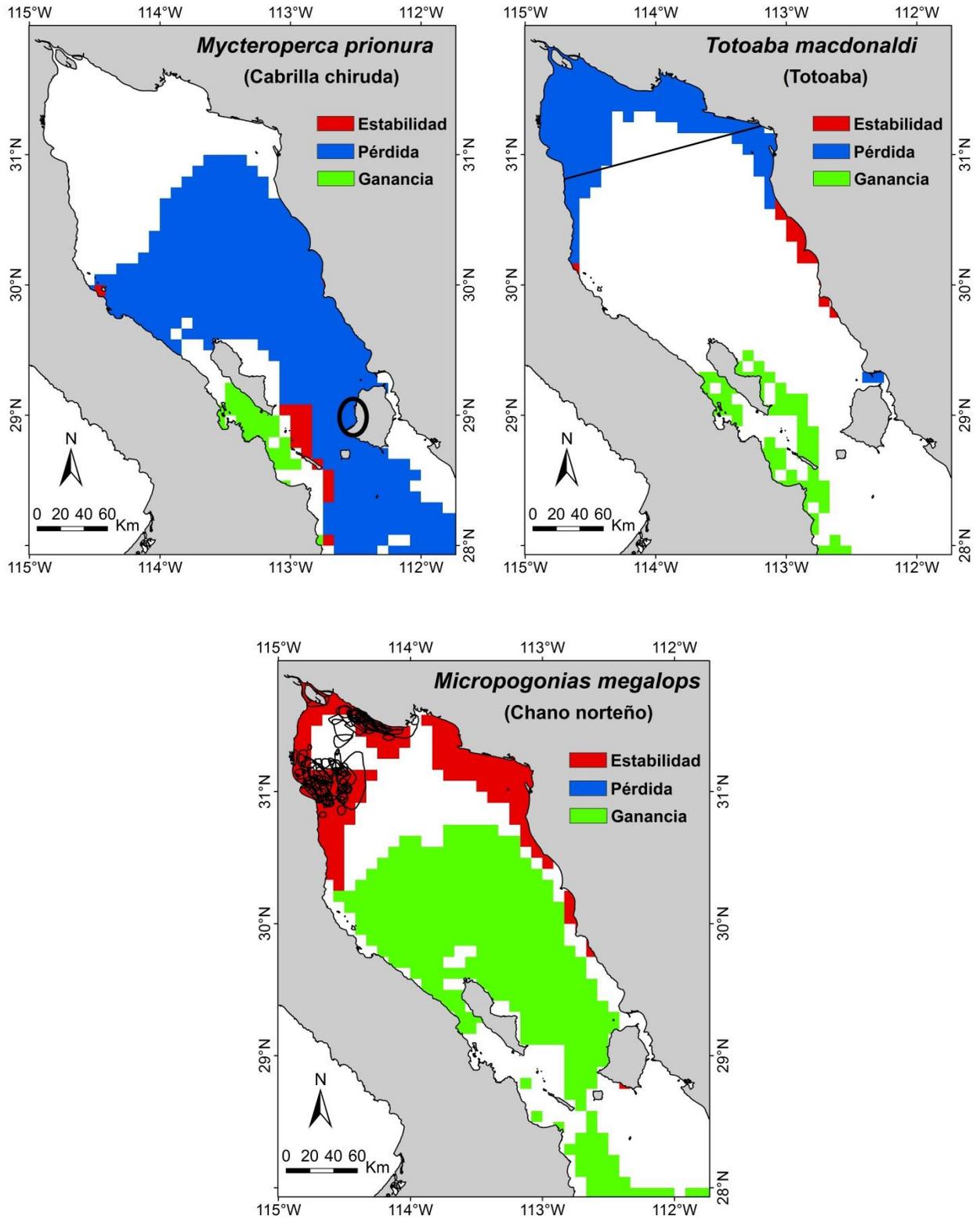


Figura 7. Mapas de distribución potencial para las especies que tendrán estabilidad, y una posible pérdida y ganancia en sus zonas de distribución. Se muestran los polígonos de pesca en color negro para la curvina golfina y el chano norteño. Para la totoaba el límite de la zona de pesca se señala con una línea negra.

4.2 Estimaciones de los cambios en las áreas de pesca del NGC

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos sobre las estimaciones de la estabilidad, pérdida y ganancia en las áreas de pesca referentes a cada una de las especies del presente trabajo bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5. En general, las especies de las tres familias de peces no presentaron un patrón común. El pronóstico para seis de las especies es que sus áreas de pesca se mantendrán estables a pesar del cambio climático. Por otro lado, para cinco especies se estimaron pérdidas. Cabe mencionar que en ningún caso se obtuvo un pronóstico de ganancia en las áreas de pesca (Tabla 4).

Para la familia Serranidae, tres especies mantendrán estables en un 100% sus áreas de pesca a lo largo del tiempo (la baya, la cabrilla de roca y la cabrilla pinta). Contrariamente, la cabrilla chiruda muestra una pérdida de superficie de captura equivalente al 100% en la costa oeste de Isla Tiburón. La baqueta y la cabrilla sardinera mantendrán estables la mayoría de sus áreas de pesca, y tienen un bajo porcentaje de pérdida en la zona del Alto Golfo y en la costa sureste de Isla Tiburón, respectivamente (Tabla 4; Figuras 5, 6 y 7).

En cuanto a las especies de la familia Sciaenidae únicamente la curvina de aleta corta muestra un 100% de estabilidad en sus áreas de pesca, mientras que para el chano norteño la mayoría se mantendrán estables. En cuanto a la curvina golfina, se estimó un bajo porcentaje de pérdida cerca de San Felipe. Finalmente, el pronóstico para la totoaba es que se perderá la mayor parte de su área de pesca en el Alto Golfo de California (Tabla 4; Figuras 5, 6 y 7).

Las dos especies pertenecientes a la familia Lutjanidae (el pargo coconaco y el pargo amarillo) presentan estabilidad total en sus zonas de pesca (Tabla 4; Figura 5).

Tabla 4. Porcentaje de estabilidad, pérdida y ganancia para cada especie respecto a sus respectivas áreas de pesca bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.

Especie	Estabilidad (%)	Pérdida (%)	Ganancia (%)
¹ <i>Mycteroperca jordani</i>	100	0	0
¹ <i>Paralabrax maculatofasciatus</i>	100	0	0
¹ <i>Epinephelus analogus</i>	100	0	0
¹ <i>Mycteroperca prionura</i>	0	100	0
¹ <i>Hyporthodus acanthistius</i>	94.2	5.8	0
¹ <i>Mycteroperca rosacea</i>	98.7	1.3	0
² <i>Cynoscion othonopterus</i>	76.5	5.8	0
² <i>Micropogonias megalops</i>	75	0	0
² <i>Cynoscion parvipinnis</i>	100	0	0
² <i>Totoaba macdonaldi</i>	0	85.5	0
³ <i>Hoplopagrus guentherii</i>	100	0	0
³ <i>Lutjanus argentiventris</i>	100	0	0

¹ Especies de la familia Serranidae. ² Especies de la familia Scianidae. ³ Especies de la familia Lutjanidae.

4.2.1 Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca

Las estimaciones sobre la posible pérdida económica anual se realizaron únicamente para aquellas especies en las que se estimó un cambio (pérdida) en las áreas de pesca. Para la localidad del Golfo de Santa Clara se estimó una posible pérdida económica anual de 126,995 USD, monto que equivale sólo al 1.2% del ingreso total que las capturas generan anualmente. De la pérdida económica estimada, el 99.9% equivale a la curvina golfina y el resto a la baqueta. Por otro lado, en San Felipe se estimó una posible pérdida anual de los ingresos de 35,950 USD, lo que equivale al 0.5% del ingreso de las capturas totales en el año. Respecto a la pérdida económica estimada, el 83.3% corresponde a la curvina golfina, el 15.8% a la baqueta y el 0.9% a la cabrilla chiruda. Finalmente, para la localidad de Bahía de los Ángeles se estimó una posible pérdida anual de los ingresos de solo 1,972 USD, que representa únicamente al 0.03% del total de los ingresos que generan las capturas anualmente. De esta pérdida el 81% corresponde a la cabrilla chiruda, el 18% a la baqueta y el 1% a la cabrilla sardinera; la curvina golfina no presenta pérdida.

5 Discusión

5.1 Alcances y limitaciones del modelado de nicho ecológico

Brander, Neuheimer, Andersen, y Hartvig (2013) plantearon la pregunta sobre qué son los modelos en general y qué es lo que hacen. Éstos son representaciones simples (o simplificadas) de sistemas complejos que al hacerlos manejables, permiten generar hipótesis sobre las propiedades del sistema y, en algunos casos, proporcionan aproximaciones relacionadas con el tiempo futuro. Por lo tanto, no son una réplica de todos los componentes de esos sistemas y nunca pueden estar completos.

Dentro de los diferentes métodos existentes para realizar modelos de nicho ecológico, el algoritmo de MaxEnt es considerado uno de los mejores en cuanto a su desempeño y precisión (Pearson et al., 2007; Phillips et al., 2006). Además, este algoritmo ha demostrado ser muy efectivo en aquellos casos en dónde el número total de registros georreferenciados utilizados durante la modelación es bajo (<20; Pearson et al., 2007), una situación que se presentó en este trabajo para algunas especies.

Los modelos de nicho ecológico han sido utilizados para tratar las relaciones entre las variables ambientales y la riqueza de especies (Mac Nally y Fleishman, 2004), la propagación de especies invasoras (Peterson y Vieglais, 2001) y las alteraciones en el rango de distribución de las especies debido al cambio climático (Martínez-Meyer, Peterson, y Hargrove, 2004). En relación a este último tema, el presente trabajo es de los pocos en donde se incorporaron datos proyectados de la TSM provenientes de ensambles de salidas de modelos de circulación general, e incluyen datos actualizados. Con base en esto, fue posible generar predicciones sobre los patrones de distribución de peces de importancia comercial en el NGC y generar una primera aproximación sobre los posibles cambios en las áreas de pesca, y una aproximación sobre las posibles consecuencias económicas derivadas en algunas localidades del área de estudio.

Otra de las bondades de este trabajo, es que los modelos de nicho se realizaron bajo una metodología rigurosa y exhaustiva, tanto en la preparación de los registros de ocurrencia que se utilizaron, como en las variables ambientales. Estos modelos son sensibles al área de modelación seleccionada (M) (Barve et al., 2011; Owens et al., 2013; Saupe et al., 2012), a la cantidad de registros georreferenciados que son utilizados para generar los modelos (Barry y Elith, 2006) y al número, tipo y correlación que puede existir entre las variables ambientales (Peterson et al., 2011). Para evitar esas complicaciones, se hizo una revisión de los mapas de distribución geográfica de las 12 especies, y se vio que seguían tres patrones (Pacífico oriental y zonas adyacentes, Pacífico Mexicano y endémicas del Golfo de California). Posteriormente, se filtraron los factores ambientales autocorrelacionados, evitando de esta manera algunos de los errores más comunes que se cometen día a día al hacer modelos de nicho ecológico.

Es importante recalcar que la herramienta utilizada en el presente trabajo, es aparentemente la única forma de generar aproximaciones sobre la distribución geográfica que podrían tener las especies en el futuro, siendo esta información esencial hoy en día para la comunidad científica y para el manejo de recursos.

Por otro lado, como muchos otros modelos, en el caso de MaxEnt se han mencionado varios puntos con potencial para mejorar (Merow, Smith, y Silander, 2013). Inicialmente, éste y todos los métodos de distribución potencial no toman en cuenta las interacciones biológicas, ni incluyen datos particulares sobre la capacidad de dispersión de las especies, ya que suponen que ésta es ilimitada (Barve et al., 2011; Mateo, Felicísimo, y Muñoz, 2011).

Por otra parte, para las especies marinas se tiene el problema que no existe suficiente información detallada sobre los factores ambientales, y eso obliga a emplear interpolaciones o extrapolaciones que dejan la duda al ser poco precisas (Molinós et al., 2015). Esto limita las posibilidades de hacer un modelo de nicho más preciso, sin embargo en el futuro inmediato no se ve cómo se puede mejorar esto, dado el elevado costo que presenta obtener los datos de nutrientes y tipo de fondo, entre otros.

Una tercera crítica es que se parte de la suposición que el nicho de una especie es estático aun cuando el ambiente puede cambiar; esta idea implica entonces que no existe adaptación de las especies. En este caso, la problemática es perfectamente aplicable a especies de ciclos de vida cortos (insectos, etc.) o aquellas de estrategias “r”. Sin embargo, para los peces comerciales del Golfo de California esto no funciona mucho porque son longevos, y eso indica que su tasa evolutiva es lenta (por ende, su nicho tiende a ser estable como especie). La longevidad típica de las especies supera los 10 años (Allen, 1985; Chao, 1995; Heemstra y Randall, 1993), de manera que entre 2015 y 2050 se tendrán a lo más 6 o 7 generaciones, cuando los modelos evolutivos hablan que para una modificación de nicho se requieren más de 20, y para especiarse al menos 100, y eso si la presión selectiva es constante y en una misma dirección.

Finalmente, es importante mencionar que Barry y Elith (2006) han comprobado que al utilizar pocas variables ambientales al hacer modelos de nicho, éstos pueden carecer de factores importantes y resultar en una baja caracterización del nicho de la especie; en estos casos los resultados suelen producir áreas de distribución amplias. Por esto, los modelos generados para el tiempo futuro en este trabajo podrían estar extrapolando las predicciones de distribución potencial de las especies y se sugiere que los resultados se interpreten con cautela.

5.2 Modelos de distribución potencial de las especies (MDP)

En el presente estudio se muestran MDP para diferentes especies de peces de importancia comercial en el NGC bajo un escenario de cambio climático (RCP 4.5). Además, se analizan los posibles efectos que la elevación de temperatura esperada podría tener sobre la localización geográfica de las principales áreas de pesca de la zona. De manera general y como recordatorio, los MDP muestran que la mayoría de las especies mantendrán una distribución estable, aunque para la cabrilla chiruda y la totoaba se observa una pérdida notoria en su distribución geográfica en el área de estudio, y por ende en sus áreas de pesca locales. Finalmente, para tres especies se

denotó el potencial de colonizar áreas nuevas dentro de la región (cabrilla chiruda, chano norteño y totoaba; Figuras 5, 6 y 7).

Los patrones observados en la distribución potencial de las especies y en las áreas de pesca se pueden atribuir a tres razones principales según el caso.

El rango geográfico de las especies varía en escala, siendo tan pequeños como una bahía y tan grandes como todos los océanos. Las variaciones en los rangos de distribución de diferentes especies se relacionan con los requerimientos ecológicos que presentan. Aquellas con un rango de distribución pequeño están limitadas por la reducida tolerancia que tienen ante algunas condiciones bióticas o abióticas, y el caso contrario sucede para las especies con rangos de distribución extensos (Brown, 1995; Brown y Lomolino, 1998; Gaines et al., 2009).

Uno de los factores ambientales principales que afectan a los organismos es la temperatura (Clarke, 2009; Pörtner y Peck, 2010). Las variaciones estacionales en la temperatura superficial del mar son mayores en latitudes templadas intermedias y menores en zonas tropicales, siendo prácticamente nulas en el ecuador (Clarke, 2009). Por esto, las especies tropicales presentan una mayor tolerancia a las temperaturas altas y las especies de zonas templadas tienen mayor tolerancia a las temperaturas bajas. La mayoría de las especies del presente estudio son euritermas, es decir, que tienen un amplio rango de tolerancia a la temperatura. Por esta razón, según las proyecciones generadas en el presente estudio, el incremento estimado en la TSM para el año 2050 (aproximadamente 1.5 °C en promedio en la región; Anexo 9) no afectaría mucho su distribución, lo que implica que permanecerían en el mismo sitio de pesca durante las próximas décadas. Por otra parte, como el Golfo de California es un mar semicerrado, aun las especies euritermas no tienen la opción de ampliar su rango de distribución hacia latitudes más altas. Así, la combinación de estos factores puede explicar por qué los resultados señalan estabilidad en las zonas de distribución de cinco especies en el NGC (y por ende en sus áreas de pesca), y cambios mínimos para tres especies (Tabla 4).

Otra razón por la que según el análisis la mayoría de las especies mantendrán una distribución estable en el NGC se puede atribuir también al tamaño del área de estudio. Para comparar, la mayoría de los trabajos que se han realizado con la finalidad de analizar las modificaciones que el cambio climático podría provocar en la riqueza (Cheung et al., 2009; Hiddink y Ter-Hofstede, 2008), la distribución latitudinal de peces (Perry et al., 2005) y en el potencial de captura de peces comerciales (Cheung et al., 2010; MacNeil et al., 2010) se han llevado a cabo a escala global y en mares extensos (por ejemplo, el Mar del Norte). En estos trabajos una de las tendencias generales observadas es que las especies de zonas tropicales se desplazarán a zonas subtropicales y templadas, incrementando su riqueza.

Los resultados de esta tesis se centran en la parte norte del Golfo de California, la cual es una zona pequeña comparada a la de otros estudios y por lo mismo se dificulta observar modificaciones. Sin embargo, esto no implica que no habrían cambios en otras partes de rango de distribución geográfica de las especies. En la Figura 8 se presentan tres ejemplos de los MDP obtenidos para tres especies (la cabrilla sardinera, la baya y la curvina de aleta corta) en toda su zona de distribución geográfica; se observa una tendencia de éstas a modificar su distribución hacia zonas con temperaturas más frías. Si se analizan los resultados en un área más extensa, y no sólo en el NGC, se observa que las tendencias presentadas por las especies coinciden con lo mencionado anteriormente, en donde las especies se desplazarán de una zona tropical a una templada (considerando que la transición entre estas dos zonas se produce a la altura de Bahía Magdalena; Hastings, 2000).

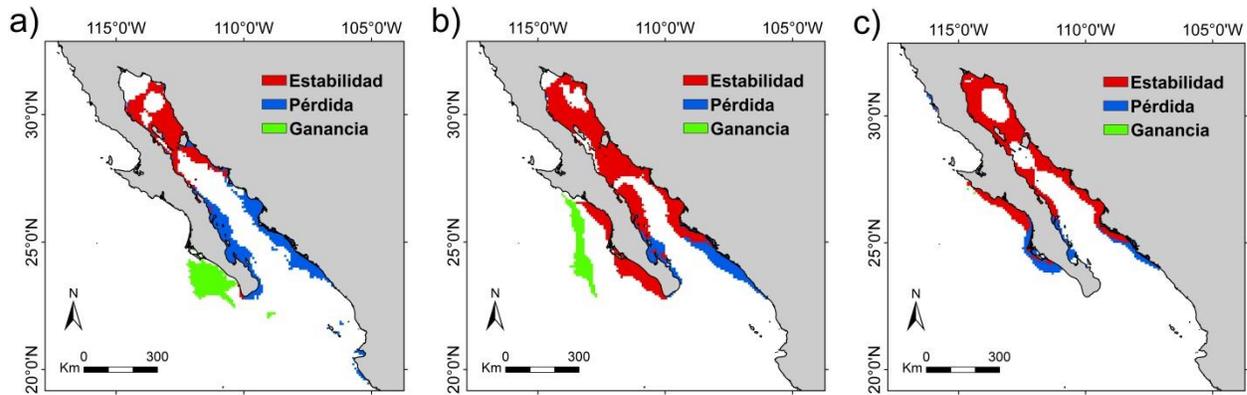


Figura 8. Ejemplo de los modelos de distribución potencial obtenidos en toda el área de distribución geográfica para: a) *Mycteroperca rosacea* (cabrilla sardinera), b) *Mycteroperca jordani* (baya) y c) *Cynoscion parvipinnis* (curvina de aleta corta). Se muestran las zonas en donde las especies permanecerán estables, y aquellas en donde podría haber una pérdida o ganancia en la distribución potencial.

Dentro de las especies consideradas euritermas en el presente estudio se encuentra la cabrilla chiruda, que se distribuye en el Golfo de California y en las Rocas Alijos en el Pacífico Oriental (Robertson y Allen, 2015), y se asocia a fondos rocosos (Sala et al., 2003). A diferencia de otras aquí consideradas como euritermas, el MDP obtenido para la cabrilla chiruda muestra pérdida en su distribución dentro de la zona de estudio, aunque una posible colonización hacia el área del Canal de Ballenas, e incluso hacia las costas del Pacífico de la Península (Figura 9). Este patrón obtenido podría indicar que la cabrilla chiruda tiene una preferencia por zonas con temperaturas frías (Sala et al., 2003). La presencia de esta especie ha sido reportada anteriormente en las costas de Bahía de los Ángeles (Mascarenas-Osorio, Erisman, Moxley, Balart, y Aburto-Oropeza, 2011; Viesca-Lobatón et al., 2008).

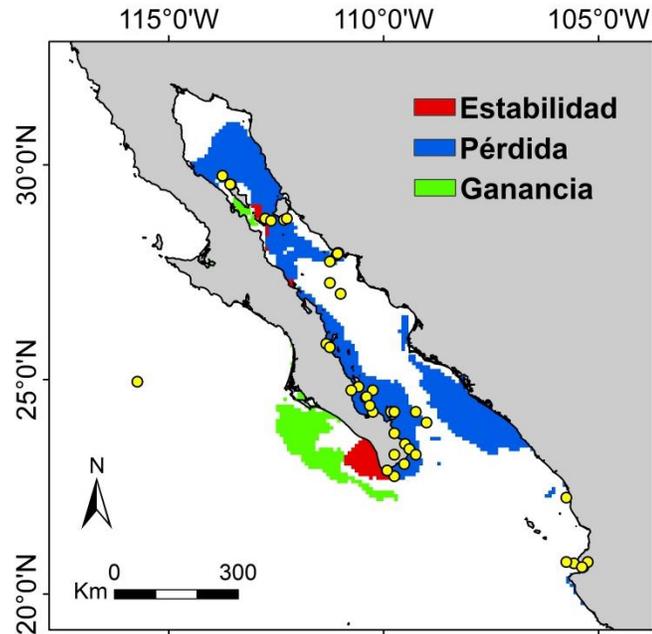


Figura 9. Modelo de la distribución potencial obtenido en toda el área de distribución geográfica para *Mycteroperca prionura* (cabrilla chiruda). Los puntos de color amarillo son los registros de ocurrencia utilizados para la modelación. Se muestran las zonas en donde la especie permanecerá estable, y aquellas en donde podría haber una pérdida o ganancia en la distribución potencial.

Las especies consideradas como endémicas (la totoaba, el chano norteño y la curvina golfina) se distribuyen principalmente en la parte central y norte del Golfo de California (Robertson y Allen, 2015). En este caso en particular, el hecho de que el Golfo de California sea un mar semicerrado complica que las especies puedan modificar su distribución hacia latitudes altas. Por lo tanto, se mantendrán ahí aún bajo el escenario de cambio climático, o bien ampliarán su distribución hacia el sur.

Las tablas de contribución proporcionadas por el programa MaxEnt clasifican a la temperatura mínima como la variable con mayor contribución al realizar los modelos futuros para la totoaba, el chano norteño y la curvina golfina, lo que indica que el incremento de la temperatura podría afectarlas principalmente durante los meses más fríos. Ante esta modificación, aparentemente la totoaba ya no podrá mantener poblaciones reproductivas en el Alto Golfo de California, sino solo en la zona de las Grandes Islas y el Canal de Ballenas, donde por efecto de surgencias constantes existen las temperaturas promedio más bajas de todo el Golfo de California, y se espera que así siga siendo en el año 2050.

La distribución geográfica de la totoaba solía ser desde el Delta del Río Colorado hasta Bahía Concepción (Cisneros-Mata et al., 1995), aunque los registros de ocurrencia en bases de datos internacionales, están concentrados en el Alto Golfo de California, donde aún se llevan a cabo las agregaciones reproductivas de la especie en invierno. Aquí se hipotetiza que si la especie modifica su distribución hacia la zona de las Grandes Islas ello podría afectar fuertemente su ciclo reproductivo ya que los adultos migran al Delta del Río Colorado para desovar y lo utilizan como zona de crianza (Cisneros-Mata et al., 1995).

Por otro lado, el chano norteño muestra la posibilidad de ampliar su rango de distribución hacia la zona de las grandes islas y al mismo tiempo mantener su presencia en el Alto Golfo. Esta estabilidad sugiere que el ciclo reproductivo de la especie no se verá afectado por el incremento de la temperatura, ya que utiliza el Delta del Río Colorado como zona de crianza (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; Román-Rodríguez, 2000).

A pesar de que actualmente el chano norteño se considera endémico del Golfo de California (López-Martínez, Acevedo-Cervantes, Herrera-Valdivia, Rodríguez-Romero, y Palacios-Salgado, 2012), se ha reportado que su distribución abarca desde el Delta del Río Colorado hasta las costas de Oaxaca (Robertson y Allen, 2015). Por esto, este pez debe tener capacidad de lidiar con variaciones en la temperatura, lo que explica que el modelo indique la permanencia de sus actuales zonas de distribución, y la posibilidad de extender su rango hacia el sur del Golfo de California, teniendo un posible beneficio en las pesquerías de otras partes de esta zona.

Finalmente, la curvina golfina se mantendrá en el Alto Golfo y en el Delta del Río Colorado, restringiendo su distribución prácticamente a esta última zona; debido a este patrón, la pérdida estimada en sus áreas de pesca sería pequeña (<10%). La causa de esta condición podría deberse a que la especie está en su límite de tolerancia a la temperatura mínima y no es capaz de abandonar su área actual de residencia. De ser esto así, la especie probablemente seguirá utilizando la zona del Delta del Río Colorado para llevar a cabo el desove y crianza de los juveniles, por lo que la captura no se vería interrumpida. Esto beneficiaría a las comunidades que capturan este recurso en la

actualidad y el futuro, ya que ese pez tiene alto valor pesquero por el volumen que representa y debido a que se pesca durante el periodo de cuaresma, el beneficio económico para los pescadores es significativo en poco tiempo (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; Erisman et al., 2015). Por último, la estabilidad observada en la distribución también puede estar ligada a la salinidad promedio, la batimetría y el promedio de nitratos, que presentan alta contribución para determinar el resultado del modelo. Esto concuerda con las condiciones particulares del Delta del Río Colorado: salinidad elevada, zona somera con fondo arenoso-fangoso y alta en nutrientes (CONANP, 2007).

5.3 Posibles consecuencias económicas en las áreas de pesca

Las actividades pesqueras del NGC representan uno de los ingresos económicos importantes para los pobladores de la región (Erisman et al., 2010a; Erisman et al., 2015), lo que ha propiciado llevar a cabo diversos estudios sobre el manejo (Aragón-Noriega, Valenzuela-Quiñones, Esparza-Leal, Ortega-Rubio, y Rodríguez-Quiroz, 2009; Erisman et al., 2010a; Moreno-Báez et al., 2010; Moreno-Báez et al., 2012) y la biología reproductiva (Erisman et al., 2012; Erisman et al., 2010b; Erisman, 2007; Román-Rodríguez, 2000) de peces de importancia comercial en la zona. Moreno-Báez et al. (2012) mencionan a 21 especies de peces óseos como objetivo de pesca para las localidades de la zona de estudio, de las cuales 11 están incluidas en el presente trabajo (la totoaba se excluyó de la lista de esa publicación porque se estableció en veda desde 1975; DOF, 1975). Cada una de estas especies tiene un precio al público diferente en el NGC, según la localidad donde es capturada (Erisman et al., 2015). Por esta razón, es importante hacer una aproximación sobre el posible impacto económico que podrían tener las pérdidas estimadas en las áreas de pesca bajo el escenario de cambio climático.

Como se mencionó anteriormente, la baya, la cabrilla de roca, la cabrilla pinta, la curvina de aleta corta, el pargo coconaco y el pargo amarillo no presentarán cambios en

su distribución potencial para el año 2050 y por lo tanto, tampoco habrían modificaciones en los sitios donde son extraídas actualmente. Sin embargo, la cabrilla chiruda, la baqueta, la cabrilla sardinera, la curvina golfina y la totoaba mostraron cambio en su distribución y consecuentemente porcentajes de pérdida de superficie de sus áreas de pesca, los cuales corresponden a distintas cantidades de dinero como déficit económico anual para las comunidades, según en donde se entrega la captura. Es importante recordar que ninguna especie aumentó de manera neta su zona de distribución dentro de los polígonos de captura, de modo que no se espera que ante escenarios de cambio climático existan posibles beneficios económicos para los pescadores ribereños de Sonora y Baja California, relacionados con estos recursos.

Las estimaciones realizadas sobre la posible pérdida económica anual en las tres localidades analizadas (Golfo de Santa Clara, San Felipe y Bahía de los Ángeles) corresponden a porcentajes muy bajos respecto al total de los ingresos que genera la pesca (1.2%, 0.5% y 0.03% respectivamente, del monto total de los ingresos anuales). En las primeras dos localidades mencionadas, esto se debe a la gran importancia de la pesquería de camarón azul, que representa el 53% del ingreso anual en el Golfo de Santa Clara y en San Felipe el 58.3% (Erisman et al., 2015). En ambos sitios la curvina golfina es una de las especies prioritarias de pesca, aportando el 21.1% de los ingresos anuales en el Golfo de Santa Clara y el 2.4% en San Felipe (Erisman et al., 2015) (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; Erisman et al., 2012). Sin embargo, la pérdida estimada en las áreas de pesca para esta especie fue muy baja (<6%) y por lo tanto, no se refleja una disminución importante en los ingresos.

Por otro lado, en el Golfo de Santa Clara, Erisman et al. (2015) no reportan captura de serránidos y la baqueta contribuye con menos del 0.05% del total del ingreso anual, por lo que la baja en la superficie apta para la pesca que sufrieron los serránidos según el modelo, no tendrán impacto relevante en los ingresos que genera la pesca. En San Felipe se presenta una situación similar, ya que la captura de serránidos corresponde al 0.1%, por lo que el porcentaje de la pérdida económica anual estimado es muy bajo y aparentemente no tendrá repercusiones importantes en el ingreso que se genera con base en las capturas.

A diferencia de las localidades anteriores, en Bahía de los Ángeles no se reporta pesca del camarón azul (Valdez-Ornelas, Aburto-Oropeza, Torreblanca-Ramirez, Danemann, y Vidal-Talamantes, 2008), ya que se distribuye sólo en la zona del Alto Golfo, utilizando el Delta del Rio Colorado como zona de crianza (Aragón-Noriega y Calderón-Aguilera, 2000; Rodríguez-Quiroz, Aragón-Noriega, y Ortega-Rubio, 2009). Por otro lado, la captura de los serránidos representa el 9.2% del total de las capturas de la zona y en menor proporción se encuentran las capturas de la curvina golfina y la baqueta con 1.4% y 0.2%, respectivamente (Valdez-Ornelas et al., 2008).

En esta localidad, las cabrillas tienen mayor contribución en las capturas en comparación al Golfo de Santa Clara y San Felipe, mientras que la baqueta y la curvina golfina no forman parte de las especies principales de captura. Sin embargo, aun cuando se estimaron pérdidas altas en las áreas de pesca de algunas especies, por ejemplo para la cabrilla chiruda (100%), es difícil hacer una evaluación precisa debido a que los avisos de arribo incluyen a todos los serránidos en una sola categoría y se desconoce con exactitud el valor de las capturas y de los ingresos de cada especie. Adicionalmente, las pérdidas estimadas en las áreas de pesca para la curvina golfina, la baqueta y la cabrilla sardinera son bajas (<6%), por lo que no se esperaría que afecten de manera importante los ingresos de la zona.

6 Conclusiones

- ❖ Bajo un escenario de cambio climático que representa concentraciones de radiación de calor medianas (RCP 4.5), los MDP obtenidos indican que seis especies mantendrán la mayoría de sus actuales zonas de distribución, seis tendrán una posible pérdida y tres podrían colonizar nuevas áreas. Los patrones observados se deben a los diferentes rangos de distribución geográfica que presentan las especies, al poco incremento estimado en la TSM para el año 2050 en el Golfo de California (sólo 1.5 °C, bajo el RCP 4.5) y al hecho de que el área de estudio es un mar semicerrado y algunas especies, como las endémicas, no tendrán posibilidad de modificar su actual rango de distribución.
- ❖ De las 12 especies analizadas en este trabajo, bajo un escenario de cambio climático con concentraciones de radiación de calor medianas (RCP 4.5), seis mantendrán sus actuales áreas de pesca, tres podrían tener un bajo porcentaje de pérdida (<6%) y dos una posible pérdida alta (>85%). En ningún caso se obtendría una ganancia neta en las áreas de pesca.
- ❖ Las posibles pérdidas económicas anuales estimadas para tres localidades en el área de estudio (Golfo de Santa Clara, San Felipe y Bahía de los Ángeles) corresponden a porcentajes muy bajos respecto al total de los ingresos que genera la pesca. Esto podría deberse a la gran importancia que representa la pesquería de camarón en el Golfo de Santa Clara y en San Felipe, y al hecho de que algunas de las especies seleccionadas en el presente estudio no son prioritarias como recursos pesqueros, ya que la pesca de escama es multiespecífica.
- ❖ La hipótesis planteada en el presente estudio se rechazó, ya que las especies endémicas (totoaba, chano norteño y curvina golfina) presentaron modificaciones potenciales en sus distribuciones geográficas y por lo tanto en sus áreas de pesca bajo el escenario de cambio climático (RCP 4.5), y para el resto de las especies, no se observó un desplazamiento en su distribución hacia el norte del Golfo de California y por ende, no se obtuvo ganancias en sus áreas de pesca.

7 Recomendaciones

Para poder hacer estimaciones más precisas sobre el posible impacto que podrían tener las pérdidas económicas estimadas en cada localidad, es necesario hacer un análisis desde el punto de vista social. Para esto, se recomendaría realizar encuestas con la finalidad de saber cuántas personas dependen directamente de la pesquería y a qué recursos en particular. Además, sería importante conocer la proporción del ingreso familiar que depende de las actividades pesqueras. Con esta información, se podrían hacer aproximaciones más precisas sobre lo que representan las pérdidas económicas estimadas en el presente estudio.

Al realizar MDP con la finalidad de analizar las posibles modificaciones que diferentes especies pueden presentar ante el cambio climático, se recomienda realizar las evaluaciones de manera individual para tener aproximaciones más precisas, especialmente si se trabaja en áreas espaciales pequeñas (por ejemplo, el NGC).

Lista de referencias bibliográficas

- Aburto-Oropeza, O., Erisman, B., Valdez-Ornelas, V., and Danemann, G. D. (2008). Serránidos de importancia comercial del Golfo de California. *Ciencia y Conservación*, 2008(1), 1-44.
- Alvarez-Borrego, S. (2003). Physical and Biological Linkages between the Upper and Lower Colorado Delta. In D. J. Rapport, L. L. William, E. R. N. Dennis, N. O. Nielsen, O. Calvin and A. B. D. Qualset (Eds.), *Managing for Healthy Ecosystems* (pp. 1077-1089). Washington: Lewis Publishers.
- Alvarez-Borrego, S. (2008). Oceanografía de la región de las grandes islas. En: D. G. Danemann y E. Exequiel (Eds.), *Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea Base 2007*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (pp. 45-66).
- Alvarez-Borrego, S. (2010). Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. In R. C. Brusca (Ed.), *The Gulf of California: biodiversity and conservation*. University of Arizona Press. (pp. 24-48).
- Álvarez-Borrego, S. (2002). Physical oceanography. In T. J. Case, M. L. Cody and E. Ezcurra (Eds.), *Island Biogeography of the Sea of Cortés* (pp. 41-59). Oxford University Press.
- Allen, G. R. (1985). *FAO species catalogue vol. 6 snappers of the world: An annotated and illustrated catalogue of Lutjanid species known to date* (Vol. 6). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, G. R., and Robertson, D. R. (1994). *Peces del Pacífico Oriental Tropical* (112-230). CONABIO, Agrupación Sierra Madre y CEMEX.
- Anderson, R. P., Lew, D., and Peterson, A. T. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162(3), 211-232.
- Aragón-Noriega, E. A., and Calderón-Aguilera, L. E. (2000). Does damming of the Colorado River affect the nursery area of blue shrimp (*Litopenaeus stylirostris*) (Decapoda: Penaeidae) in the Upper Gulf of California?. *Biología Tropical*, 48(4), 867-871.

- Aragón-Noriega, E. A., Valenzuela-Quiñones, W., Esparza-Leal, H., Ortega-Rubio, A., and Rodríguez-Quiroz, G. (2009). Analysis of management options for artisanal fishing of the Bigeye Croaker *Micropogonias megalops* (Gilbert, 1890) in the Upper Gulf of California. *International Journal of Biodiversity Science & Management*, 5(4), 208–214.
- Auliz-Ortiz, D. M. (2014). *Cambios potenciales de la distribución de los clados de zooxantelas (symbiodinium sp.) en el Pacífico Oriental y el Atlántico Occidental, como respuesta al cambio climático global*. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 170 p.
- Barry, S., and Elith, J. (2006). Error and uncertainty in habitat models. *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 413-423.
- Barve, N., V. Barve, A. Jiménez-Valverde, A. Lira-Noriega, S. P. Maher, A. T. Peterson, J. Soberón, and Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222, 1810-1819.
- Brander, K., Blom, G., Borges, M., Erzini, K., Henderson, G., MacKenzie, B., Mendes, H., Ribeiro, J., Santos, A., and Toresen, R. (2003). *Changes in fish distribution in the eastern North Atlantic: are we seeing a coherent response to changing temperature?*. Paper presented at the ICES Marine Science Symposia. Int. Council Explor, Sea 219, 261-270.
- Brander, K., Neuheimer, A., Andersen, K. H., and Hartvig, M. (2013). Overconfidence in model projections. *ICES Journal of Marine Science*, 70(6), 1065-1068.
- Brander, K. M. (2007). Global fish production and climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(50), 19709-19714.
- Brown, J. H. (1995). *Macroecology* (pp. 25-30). Chicago: The Chicago University Press.
- Brown, J. H., and Lomolino, M. V. (1998). *Biogeography*. (2th ed.) Massachusetts: Sinauer Associates, INC (pp. 243-320).
- Cisneros-Mata, M. A. (2010). The importance of fisheries in the Gulf of California and ecosystem-based sustainable co-management for conservation. In R. Brusca (Ed.), *The Gulf of California: biodiversity and conservation* (pp. 119-134). The University of Arizona Press.
- Cisneros-Mata, M. A., Montemayor-López, G., and Román-Rodríguez, M. J. (1995). Life history and conservation of Totoaba macdonaldi. *Conservation Biology*, 9(4), 806-814.

- Clarke, A. (2009). Temperature and marine macroecology. In J. D. Witman and K. Roy (Eds.), *Marine macroecology* (pp. 250-278). The University of Chicago Press.
- CONANP. (2007). *Programa de conservación y manejo: Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado*. México (pp. 323).
- Crain, C. M., Halpern, B. S., Beck, M. W., and Kappel, C. V. (2009). Understanding and managing human threats to the coastal marine environment. *The Year in Ecology and Conservation Biology*, 1162, 39-62.
- Cudney-Bueno, R., and Turk-Boyer, P. (1998). *Pescando entre mareas del Alto Golfo de California: Una guía sobre la pesca artesanal, su gente y sus propuestas de manejo*. Puerto Peñasco, Sonora: Centro intercultural de estudio de desiertos y océanos.
- Chao, L. N. (1995). Sciaenidae. Corvinas, barbiches, bombaches, corvinatas, corvinetas, corvinillas, lambes, pescadillas, roncachos, verrugatos. In W. Fischer, F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K. E. Carpenter and V. Niem (Eds.), *Guía FAO para identificación de especies para los fines de la pesca: Pacífico Centro-oriental, 3 volumes*. (pp. 1427-1518). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Cheung, W. W., Watson, R., Morato, T., Pitcher, T. J., and Pauly, D. (2007). Intrinsic vulnerability in the global fish catch. *Marine Ecology Progress Series*, 333, 1-12.
- Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R. E. G., Zeller, D., and Pauly, D. (2010). Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, 16(1), 24-35.
- Cheung, W. W. L., Pauly, D., and Sarmiento, J. L. (2013). How to make progress in projecting climate change impacts. *Journal of Marine Science*, 70(6), 1069-1107.
- Cheung, W. W. L., Vicky W.Y. Lam, J. L. Sarmiento, Kelly Kearney, Watson, R., and Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 1-17.
- DOF. (1975). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 01 de julio del 2015 de, http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4786520&fecha=01/08/1975.
- DOF. (2004). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Recuperado el 25 de mayo del 2015 de, <http://dof.gob.mx/index.php?year=2004&month=12&day=01>

- Elith, J., Graham, H. C., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC. Overton, J., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., and Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., En-Chee, Y., and Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17, 43-57.
- Erismán, B., Aburto-Oropeza, O., Gonzalez-Abraham, C., Mascareñas-Osorio, I., Moreno-Báez, M., and Hastings, P. A. (2012). Spatio-temporal dynamics of a fish spawning aggregation and its fishery in the Gulf of California. *Nature*, 2, 1-11.
- Erismán, B., Mascareñas, I., Paredes, G., Sadovy-de-Mitcheson, Y., Aburto-Oropeza, O., and Hastings, P. (2010a). Seasonal, annual, and long-term trends in commercial fisheries for aggregating reef fishes in the Gulf of California, Mexico. *Fisheries Research*, 106, 279-288.
- Erismán, B., Mascareñas-Osorio, I., López-Sagástegui, C., Moreno-Báez, M., Jiménez-Esquivel, V., and Aburto-Oropeza, O. (2015). A comparison of fishing activities between two coastal communities within a biosphere reserve in the Upper Gulf of California. *Fisheries Research*, 164, 254-265.
- Erismán, B., Moreno-Báez, M., Mascareñas-Osorio, I., and Aburto-Oropeza, O. (2010b). Resultados sobre la biología reproductiva y pesquerías de la curvina golfina (*Cynoscion otrhonopterus*): Temporadas 2009 y 2010. *Centro para la biodiversidad marina y la conservación del Golfo de California* (pp. 1-10).
- Erismán, B. E., Bruckhorn, M. L. y Hastings, P.A. . (2007). Spawning patterns in the leopard grouper, *Mycteroperca rosacea*, in comparison with other aggregating groupers. *Marine Biology*, 151, 1-13.
- Franklin, J., and Miller, J. A. (2010). *Mapping species distributions*. (pp. 320). Cambridge University Press.
- Gaines, S. D., Lester, S. E., Eckert, G., Kinlan, B. P., Sagarin, R., and Gaylord, B. (2009). Dispersal and geographic ranges in the sea. In J.D., Witman and K., Roy (Eds.), *Marine macroecology* (pp. 227-249). The University of Chicago Press.
- Gardiner, M. G., Munday, P. L., and Nilsson, G. E. (2010). Counter-Gradient Variation in Respiratory Performance of Coral Reef Fishes at Elevated Temperatures. *PLoS ONE*, 5(10), 1-13.

- Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., y Schwartzlose, R. A. (1978). Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5(21), 25-40.
- Gutiérrez, G., y González, J. I. (1989). Predicciones de mareas de 1990: Estaciones mareográficas del CICESE. *Informe Técnico OC-89-01*. CICESE, Ensenada, México.
- Hastings, P. A. (2000). Biogeography of the Tropical Eastern Pacific: distribution and phylogeny of chaenopsid fishes. *Zoological journal of the Linnean Society* 128, 319-335.
- Heemstra, P. C., and Randall, J. E. (1993). *FAO species catalogue vol. 16 groupers of the world (family serranidae, subfamily epinephelinae): An annotated and illustrated catalogue of the grouper, rockcod, hind, coral grouper, and lyretail species known to date*: Food and Agriculture Organization of the United Nations (pp. 382).
- Hiddink, J. G., and Ter-Hofstede, R. (2008). Climate induced increases in species richness of marine fishes. *Global Change Biology*, 14(3), 453-460.
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposium of Quantitative Biology*, 22(2), 415-427.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In R. K. Pachauri and L. A. Meyer (Eds.), *IPCC* (pp. 151). Geneva.
- Kaplan, I. C., Gray, I. A., and Levin, P. S. (2013). Cumulative impacts of fisheries in the California Current. *Fish and Fisheries*, 14(4), 515-527.
- Lavín, M. F., Beier, E., and Badan, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional e interanual. En M. F. Lavín (Ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía #3*: Unión Geofísica Mexicana (pp. 139-169)
- Lavín, M. F., and Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In O. U. Fuentes-Velasco, J. Sheinbaum and J. Ochoa (Eds.), *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics* (pp. 173-204). Kluwer Academic Publishers.
- Lindsay, G. E., and Engstrand, I. H. W. (2002). History of scientific exploration in the Sea of Cortés. In T. J. Case, M. L. Cody and E. Ezcurra (Eds.), *A new Island Biogeography of the Sea of Cortés* (pp. 671). Oxford University Press.

- López-Martínez, J., Acevedo-Cervantes, A., Herrera-Valdivia, E., Rodríguez-Romero, J., y Palacios-Salgado, D. S. (2012). Composición taxonómica y aspectos zoogeográficos de peces de profundidad (90-540m) del Golfo de California, México. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 60(1), 347-360.
- Love, M. S., Mecklenburg, C. W., Mecklenburg, T. A., and Thorsteinson, L. K. (2005). *Resource Inventory of Marine and Estuarine Fishes of the West Coast and Alaska*. U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, Biological Resources Division. Seattle (pp. 224).
- Lluch-Cota, S. E., Aragón-Noriega, E. A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Jesús Bautista-Romero, J., Brusca, R. C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M. E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D. B., López-Martínez, J., Marinone, S. G., Nevárez-Martínez, M. O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C. A., Schwartzlose, R. A., and Sierra-Beltrán, A. P. (2007). The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73(1), 1-26.
- Lluch-Cota, S. E., Parés-Sierra, A., Magaña-Rueda, V. O., Arreguín-Sánchez, F., Bazzino, G., Herrera-Cervantes, H., and Lluch-Belda, D. (2010). Changing climate in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 87(1), 114-126.
- Mac Nally, R., and Fleishman, E. (2004). A successful predictive model of species richness based on indicator species. *Conservation biology*, 18(3), 646-654.
- MacNeil, M. A., Graham, N. A., Cinner, J. E., Dulvy, N. K., Loring, P. A., Jennings, S., Polunin, N. V., Fisk, A. T., and McClanahan, T. R. (2010). Transitional states in marine fisheries: adapting to predicted global change. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 365(1558), 3753-3763.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A. T., and Hargrove, W. W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 13(4), 305-314.
- Martínez-Arroyo, A., Manzanilla-Naim, S., and Zavala-Hidalgo, J. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera*, 24(1), 103-123.
- Mascarenas-Osorio, I., Erisman, B., Moxley, J., Balart, E., and Aburto-Oropeza, O. (2011). Checklist of conspicuous reef fishes of the Bahía de los Ángeles region,

Baja California Norte, Mexico, with comments on abundance and ecological biogeography. *Zootaxa*, 2922, 60-68.

Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., and Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240.

Melo-Merino, S. M. (2013). *Cambios potenciales en la distribución de corales arrecifales (Scleractinia) del Pacífico Oriental y Atlántico Occidental, como consecuencia del cambio climático*. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 197 p.

Merow, C., Smith, M. J., and Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.

Molinos, J. G., Halpern, B. S., Schoeman, D. S., Brown, C. J., Kiessling, W., Moore, P. J., Pandolfi, J. M., Poloczanska, E. S., Richardson, A. J., and Burrows, M. T. (2015). Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. *Nature Climate Change*, 1-6.

Morales-Castilla, I., Matias, M., G., Gravel, D., and Araújo, M. B. (2015). Inferring biotic interactions from proxies. *Trends in ecology and evolution*, 30(6), 347-356.

Moreno-Báez, M., Cudney-Bueno, R., Orr, B. J., Shaw, W. W., Pfister, T., Torre-Cosío, J., Loaiza, R., and Rojo, M. (2012). Integrating the spatial and temporal dimensions of fishing activities for management in the Northern Gulf of California, Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 55, 111-127.

Moreno-Báez, M., Barron, J. O., Cudney-Bueno, R., and Shaw, W. W. (2010). Using Fishers' Local Knowledge to Aid Management at Regional Scales Spatial Distribution of Small-scale Fisheries in the Northern Gulf of California. *Bulletin of Marine Science*, 86(2), 339-353.

Morzaria-Luna, H., Reyes-Bonilla, H., Auliz-Ortiz, D. M., and Cruz-Piñón, G. (en prep.). Effect of projected sea surface temperature on the distribution of endemic fish species in the Northern Gulf of California. *Biological Conservation*.

Morzaria-Luna, H. N., Turk-Boyer, P., and Moreno-Báez, M. (2014). Social indicators of vulnerability for fishing communities in the Northern Gulf of California, Mexico: Implications for climate change. *Marine Policy*, 45, 182-193.

- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., and Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E., and Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10-18.
- Paden, C. A., Abbott, M. R., and Winant, C. D. (1991). Tidal and atmospheric forcing upper ocean in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96(C10), 18337-18359.
- Page, L. M., Espinosa-Pérez, H., Findley, L. T., Gilbert, C. R., Lea, R. N., Mandrak, N. E., and Mayden, R. L. (2013). New Seventh Edition of Common and Scientific Names of Fishes: Changes include capitalization of common names. *Fisheries*, 38(4), 188-189.
- Pankhurst, N. W., and Munday, P. L. (2011). Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Marine and Freshwater Research*, 62(9), 1015-1026.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., and Peterson, A. T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117.
- Perry, A. L., Low, P. J., Ellis, J. R., and Reynolds, J. D. (2005). Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. *Science*, 308(5730), 1912-1915.
- Petatán-Ramírez, D. (2015). *Propuesta de zonación del Golfo de California con base en variables oceanográficas y distribución de macroinvertebrados*. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 106 p.
- Peterson, A. T., Navarro-Sigüenza, A. G., Martínez-Meyer, E., Cuervo-Robayo, A. P., Berlanga, H., and Soberón, J. (2015). Twentieth century turnover of Mexican endemic avifaunas: Landscape change versus climate drivers. *Society advances*, 1, 1-5.
- Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., and Stockwell, D. R. B. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416, 626-629.

- Peterson, A. T., Papeş, M., and Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72.
- Peterson, A. T., and Vieglais, D. A. (2001). Predicting Species Invasions Using Ecological Niche Modeling: New Approaches from Bioinformatics Attack a Pressing Problem. *BioScience*, 51(5), 363-371.
- Peterson, T. A., Papeş, M., and Eaton, M. (2007). Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt. *Ecography*, 30(4), 550-560.
- Peterson, T. A., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., and Araújo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions* (pp. 314). New Jersey, Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., and Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Phillips, S. J., and Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.
- Pörtner, H. O., and Peck, M. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *Journal of Fish Biology*, 77(8), 1745-1779.
- Pörtner, H. O., and Knust, R. (2007). Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315(5808), 95-97.
- Robertson, D. R., and Allen, G. R. (2015). Peces Costeros del Pacífico Oriental Tropical: sistema de información en línea. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Recuperado el 15 de junio del 2015 de, <http://biogeodb.stri.si.edu/sftep/es/pages>
- Rodríguez-Quiroz, G., Aragón-Noriega, E. A., and Ortega-Rubio, A. (2009). Artisanal Shrimp Fishing in the Biosphere Reserve of the Upper Gulf of California. *Crustaceana*, 82(12), 1481-1493.
- Roessig, J. M., Woodley, C. M., Cech Jr, J. J., and Hansen, L. J. (2004). Effects of global climate change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14(2), 251-275.

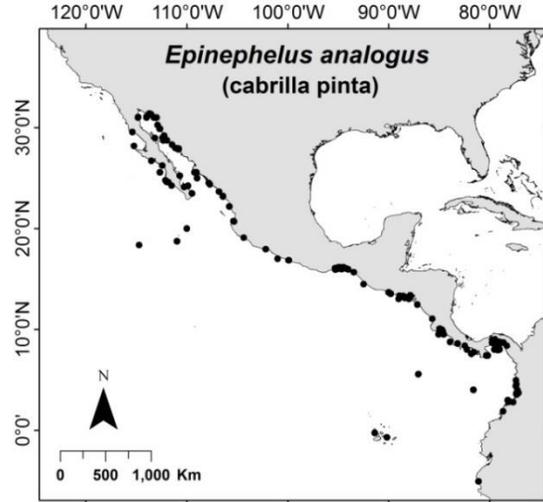
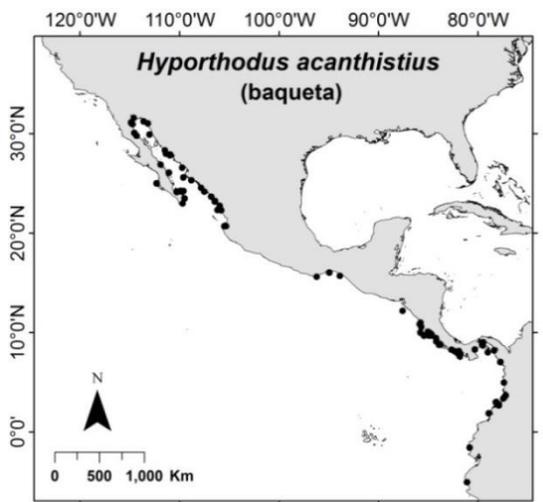
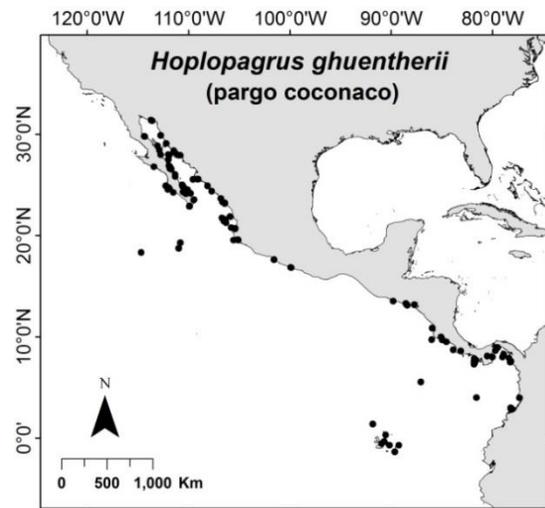
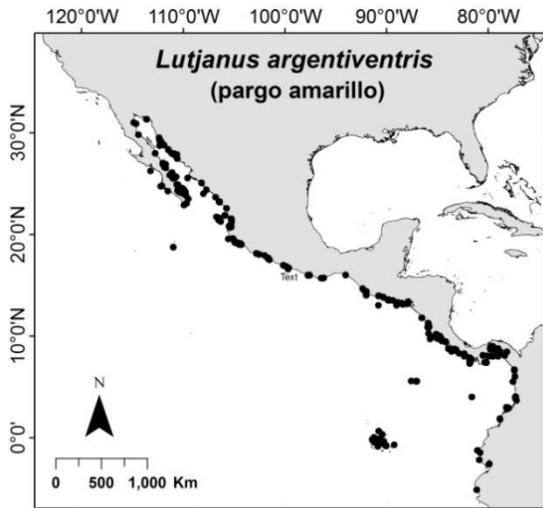
- Román-Rodríguez, M. J. (2000). Estudio poblacional del chano norteño, *Micropogonias megalops* y la curvina Golfina *Cynoscion othonopterus* (Gilbert) (Pisces: Sciaenidae), especies endémicas del Alto Golfo de California, México. Instituto del Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora. *Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. L298*. México D. F. (pp. 154).
- Saavedra-Sotelo, N. C., Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., Paz-García, D. A., López-Pérez, R. A., Cupul-Magana, A., Cruz-Barraza, J. A., and Rocha-Olivares, A. (2013). Testing the genetic predictions of a biogeographical model in a dominant endemic Eastern Pacific coral (*Porites panamensis*) using a genetic seascape approach. *Ecology and Evolution*, 3(12), 4070-4091.
- SAGARPA-INAPESCA. (2012). *Carta Nacional Pesquera*. Recuperado el 20 de diciembre del 2014 de, <http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/carta-nacional-pesquera/Carta-Nacional-Pesquera-2012.pdf>
- Sala, E., Aburto-Oropeza, O., and Paredes, G. (2003). Spawning aggregations and reproductive behaviour of reef fishes in the Gulf of California. *Bulletin of Marine Science*, 72(1), 103-121.
- Sala, E., Aburto-Oropeza, O., Reza, M., Paredes, G., and López-Lemus, L. G. (2004). Fishing Down Coastal Food Webs in the Gulf of California. *Fisheries*, 29(3), 19-25.
- Saupe, E. E., Barve, V., Myers, C. E., Soberón, J., Barve, N., Hensz, C. M., Peterson, A. T., Owens, H. L., and Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 237-238, 11-22.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27, 379-423, 623-656.
- Soberón, J., and Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.
- Suárez-Moo, P., Calderon-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., Díaz-Erales, G., Castañeda-Fernandez-de-Lara, V., Aragón-Noriega, E. A., and Rocha-Olivares, A. (2012). Integrating genetic, phenotypic and ecological analyses to assess the variation and clarify the distribution of the Cortes geoduck (*Panopea globosa*). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 93(03), 809-816.

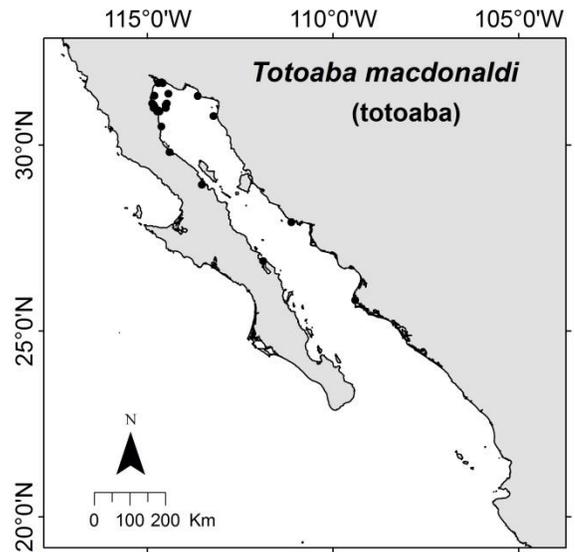
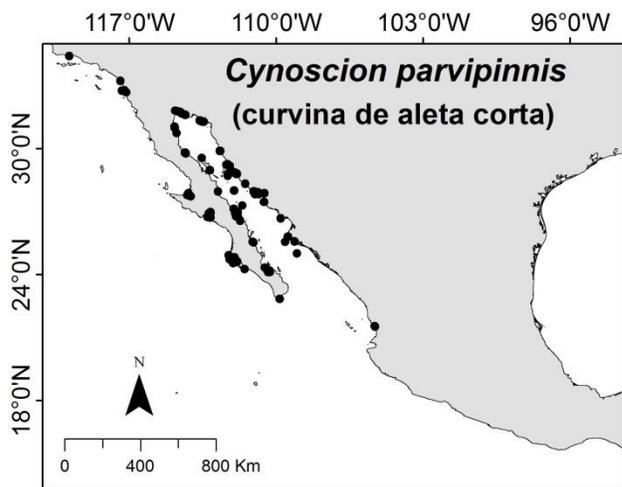
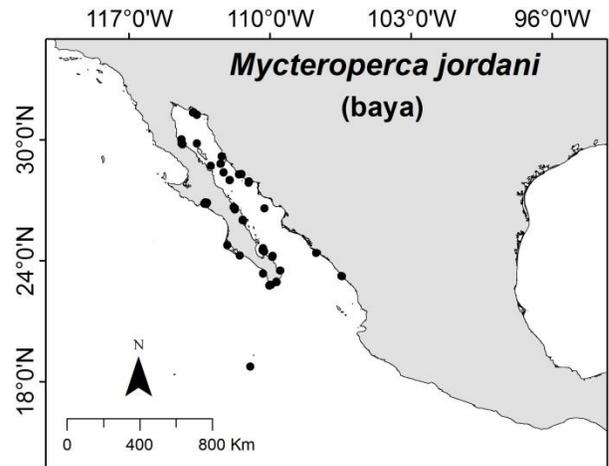
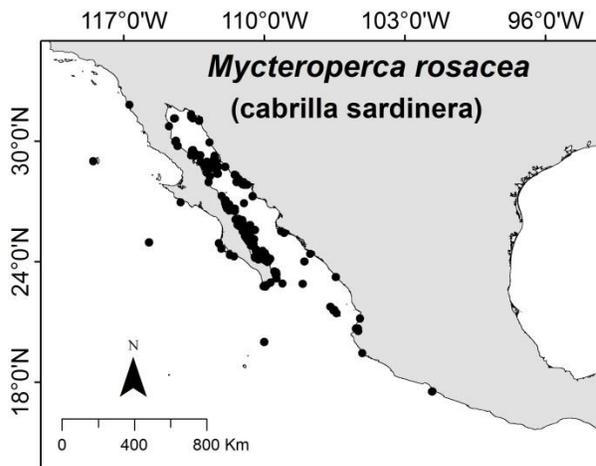
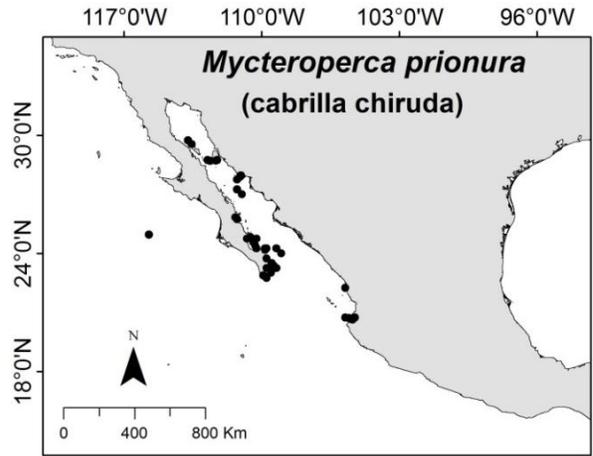
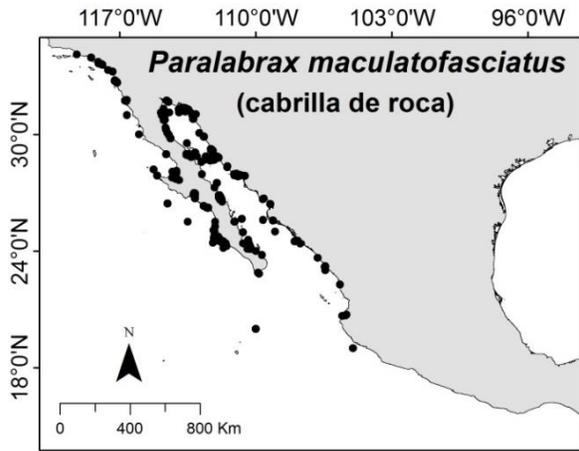
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293.
- Team, R. D. C. (2010). R: A language and environment for statistical computing: R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Torres, L. G., Read, A. J., and Halpin, P. (2008). Fine-scale habitat modeling of a top marine predator: do prey data improve predictive capacity. *Ecological Applications*, 18(7), 1702-1717.
- Ulloa, R., Torre, J., Bourillón, L., and Alcantar, N. (2006). Planeación Ecorregional para la Conservación Marina: Golfo de California y costa occidental de Baja California Sur. *Comunidad y Biodiversidad*, A.C. (pp. 153).
- Valdez-Ornelas, V. M., Aburto-Oropeza, O., Torreblanca-Ramirez, E., Danemann, G. D., and Vidal-Talamantes, R. (2008). Recursos pesqueros. En: D. G. Danemann y E. Exequiel (Eds.), *Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea Base 2007*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (pp. 429-456).
- Van der Heiden, A. M. (1985). Taxonomía, biología y evaluación de la ictiofauna demersal del Golfo de California. En: A. Yáñez-Arancibia (Ed.). *Recursos pesquero potenciales de México: La pesca acompañante del camarón* (pp. 149-199). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Instituto Nacional de Pesca, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., and Jean-Francois, L. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Viesca-Lobatón, C., Balart, E. F., González-Cabello, A., Mascareñas-Osorio, I., Aburto-Oropeza, O., Reyes-Bonilla, H., and Torreblanca, E. (2008). Peces arrecifales. En: D. G. Danemann y E. Exequiel (Eds.), *Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea Base 2007*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (pp. 385-427).
- Wiens, J. J., and Graham, C. H. (2005). Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 519-539.
- Zar, J. H. (1999). *Biostatistical Analysis* (4th ed.). (pp. 663). New Jersey: Prentice-Hall.

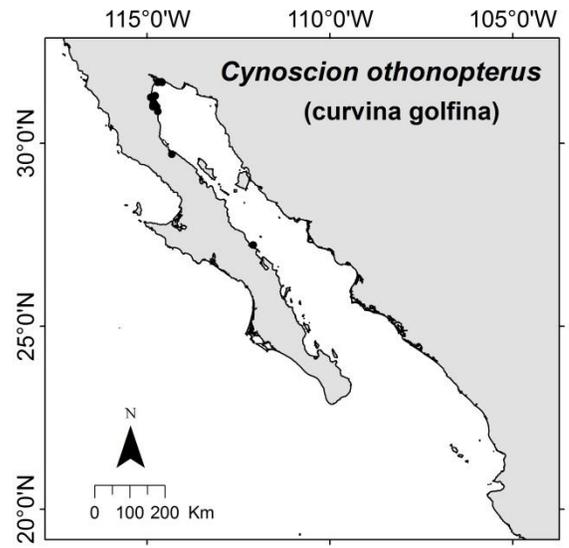
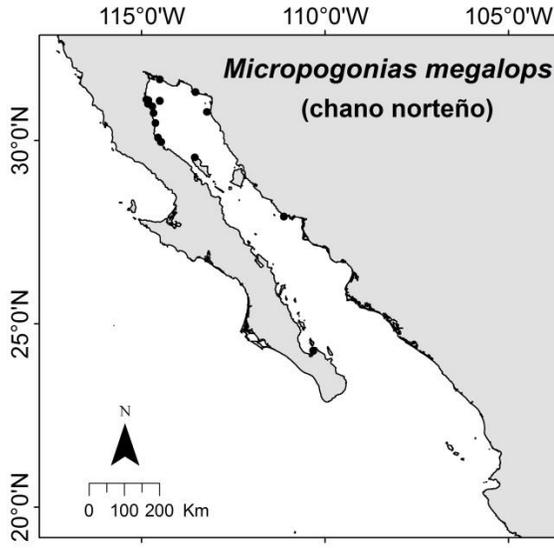
Anexos

Anexo 1.

Registros de ocurrencia depurados para cada una de las especies de presente estudio.

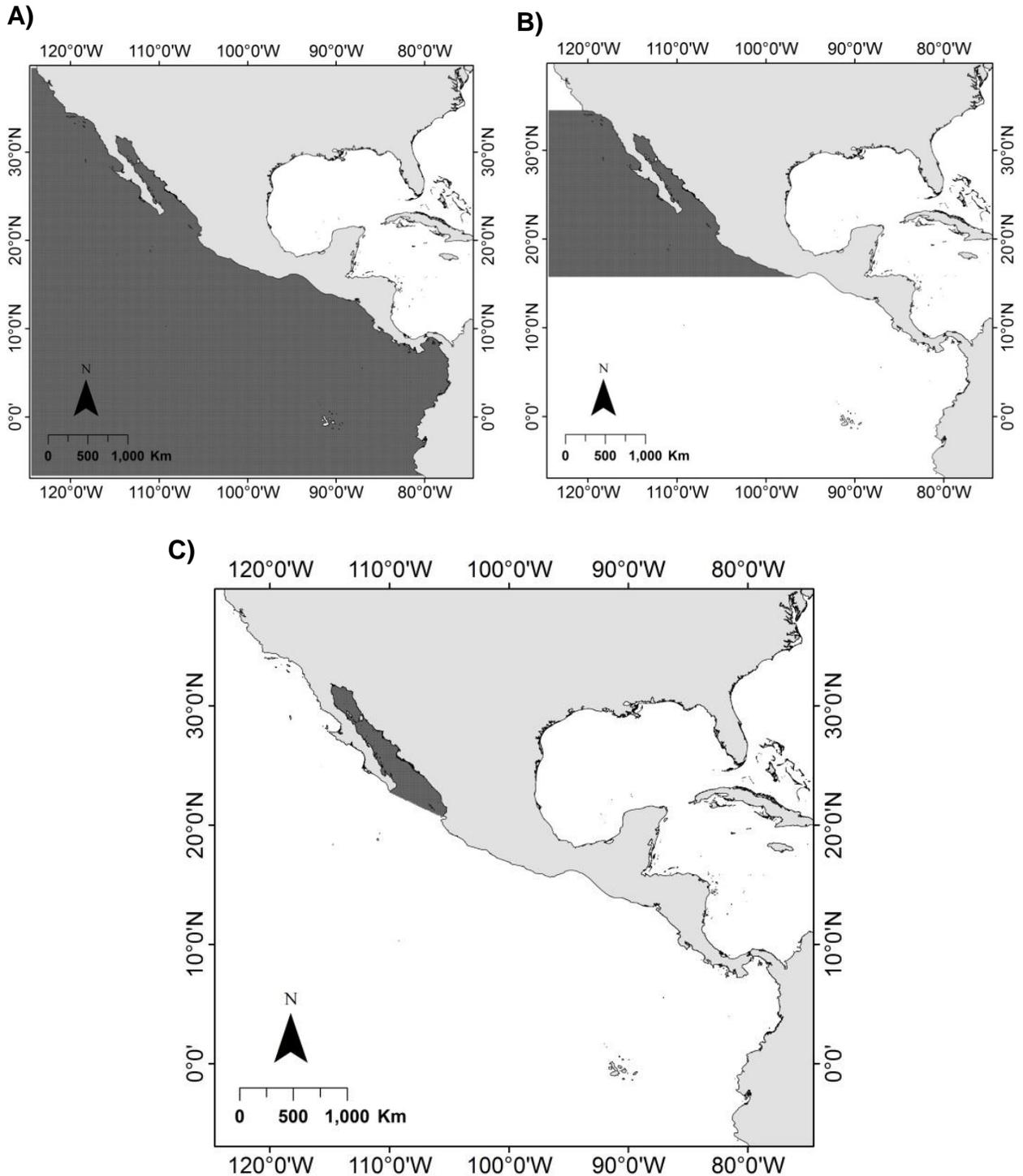


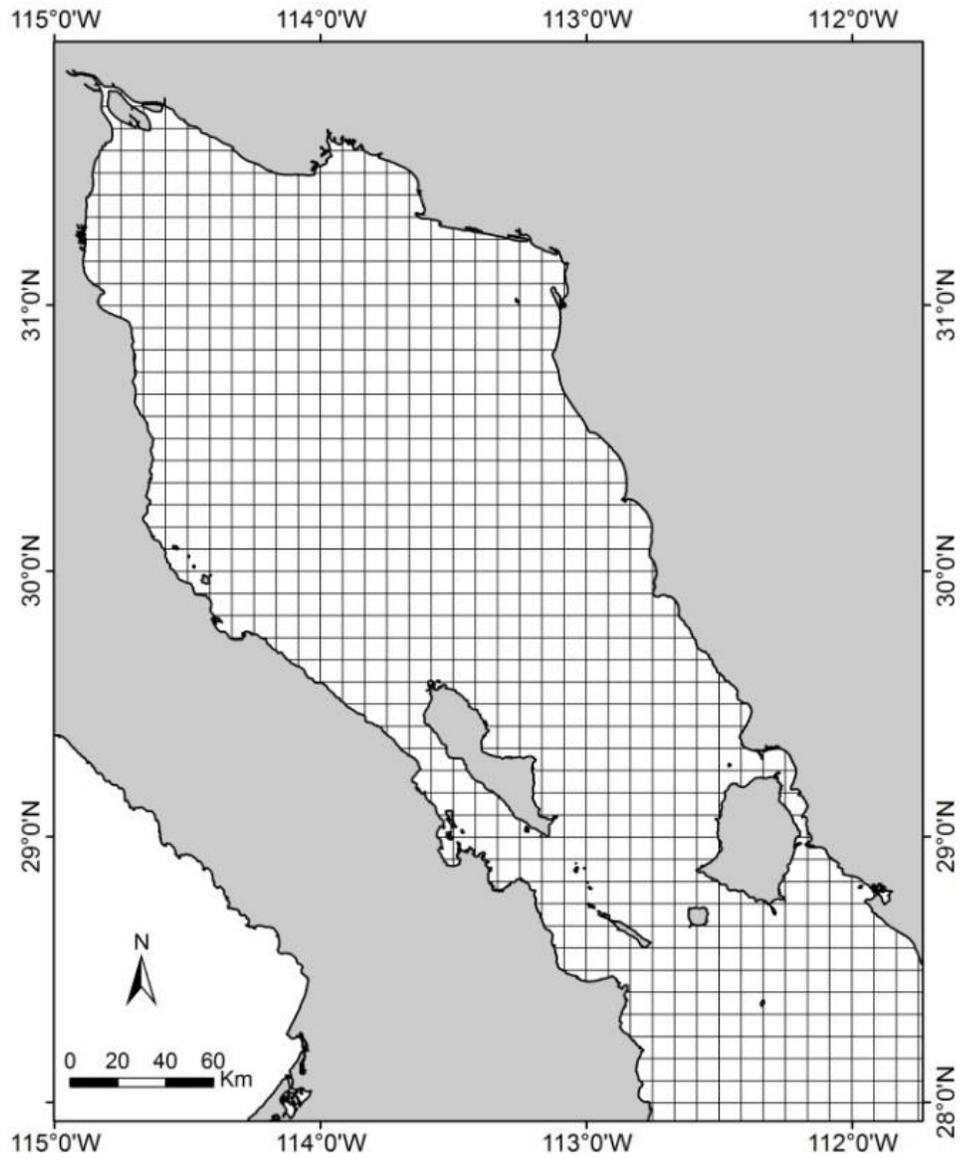




Anexo 2.

Mapas señalando el área de modelación seleccionada para las especies del presente estudio: A) Pacífico Oriental, B) Pacífico Mexicano y C) Golfo de California.



Anexo 3.**Ejemplo de la rejilla utilizada con una resolución de 9 x 9 km.**

Anexo 4.

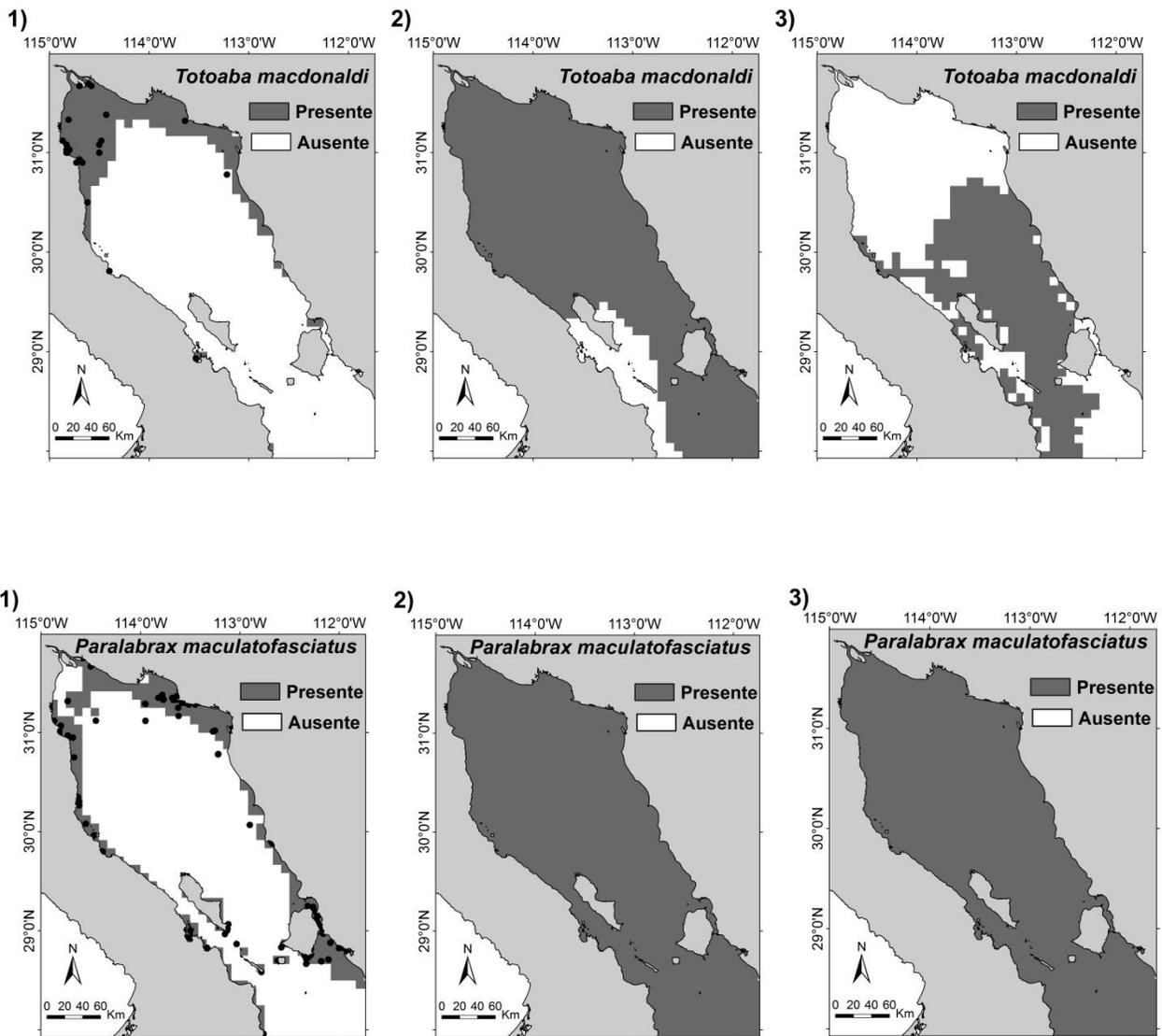
Variables oceanográficas que fueron seleccionados con base en la relevancia biológica para las especies del presente estudio.

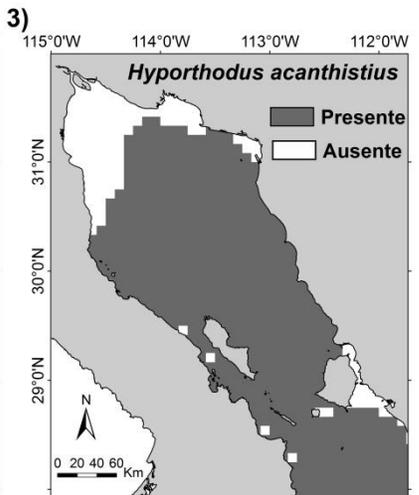
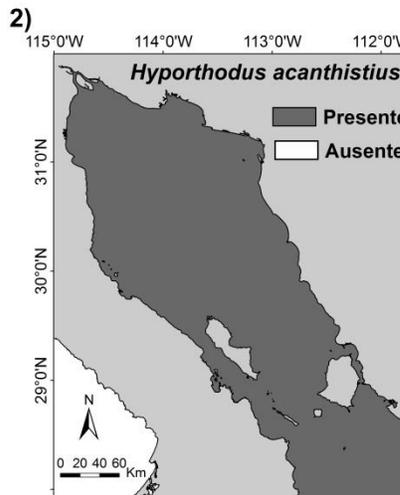
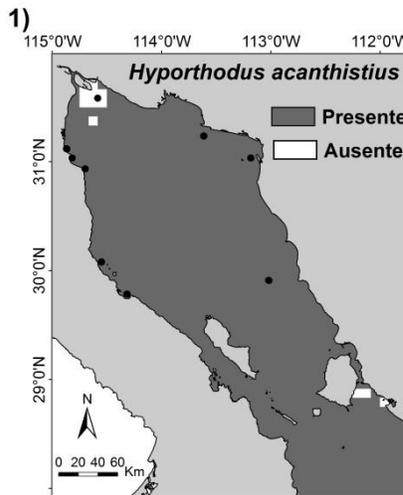
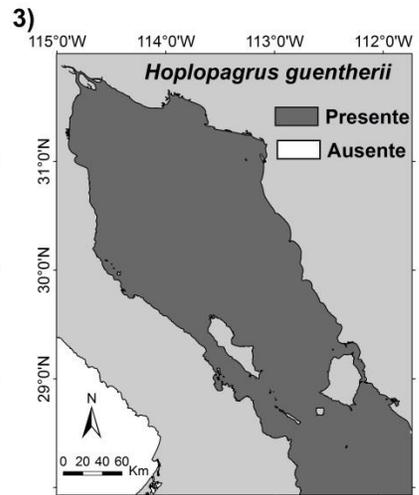
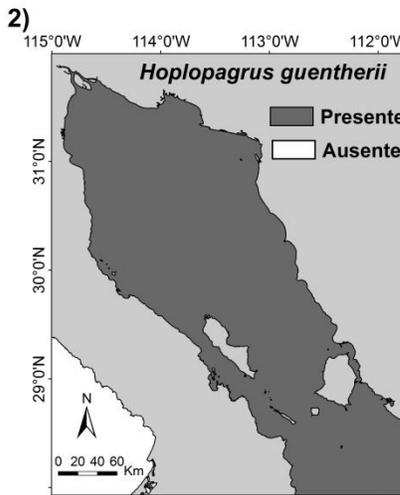
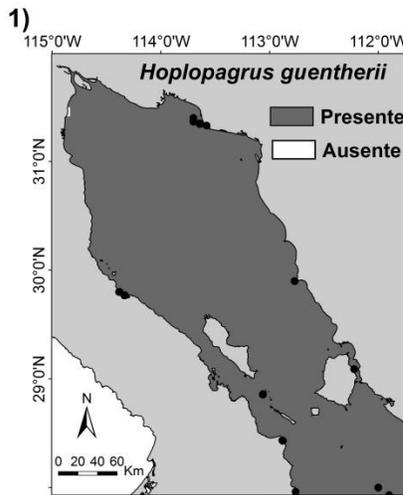
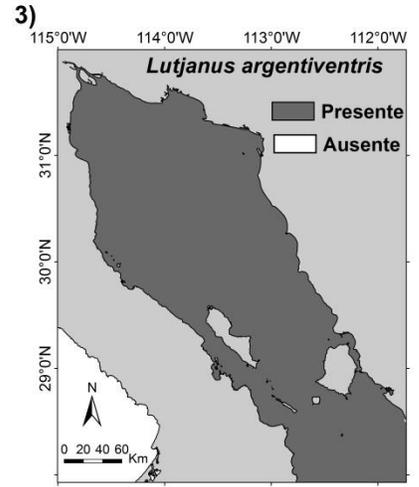
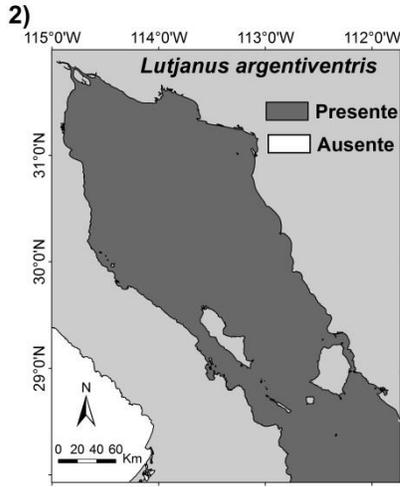
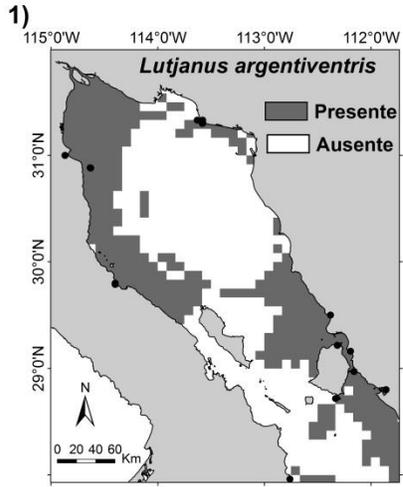
Variable oceanográfica	Unidad	Resolución original	Fuente	Serie de tiempo utilizada
Salinidad	UPS	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Nitratos	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Silicatos	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Fosfatos	µmol	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Oxígeno disuelto	mg/ml	* 1° (111 km)	NODC	1939 – 2007
Temperatura	°C	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2012
PAR	E/m ² /día	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2015
Clorofila a	mg/m ³	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2015
Kd	m ⁻¹	5' (9 km)	MODIS-Aqua	2002 – 2015
Batimetría	m	30'' (0.93 km)	GEBCO	2010
Pp	mgC/m ² /día	1080x2160 (9 km)	PPO-UEO	2010

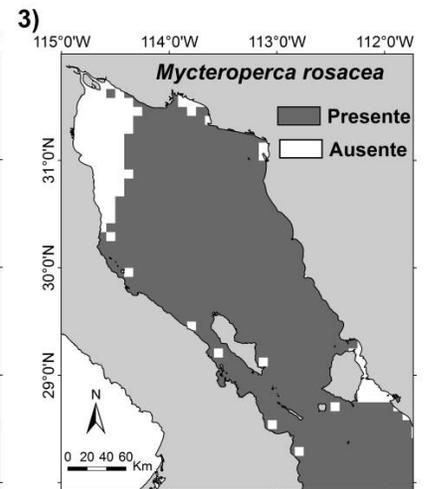
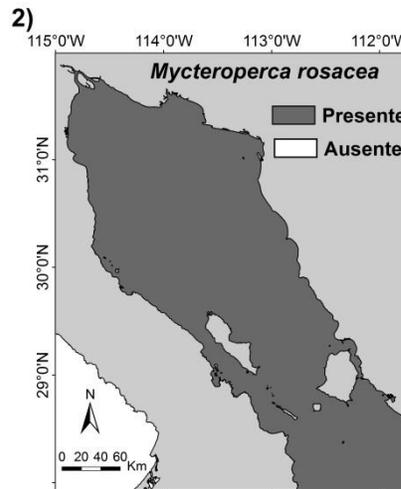
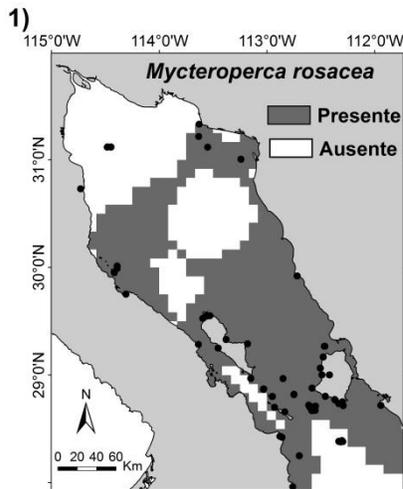
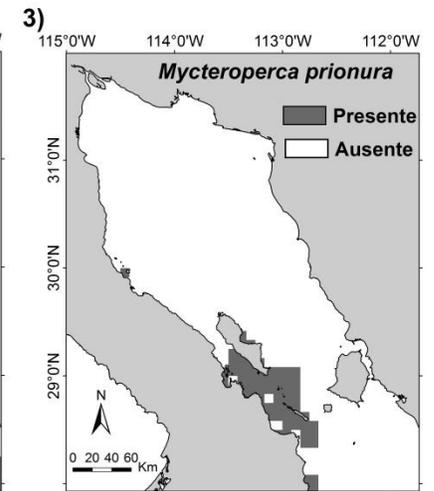
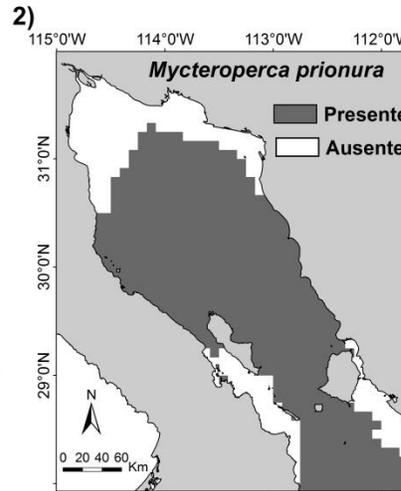
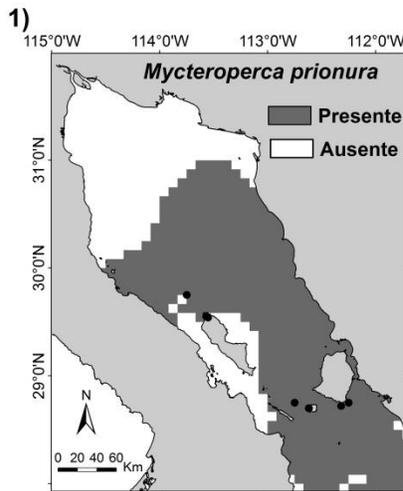
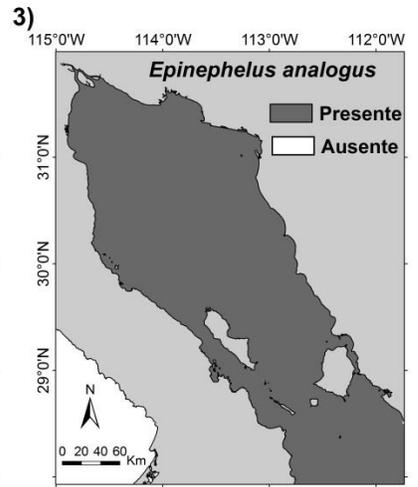
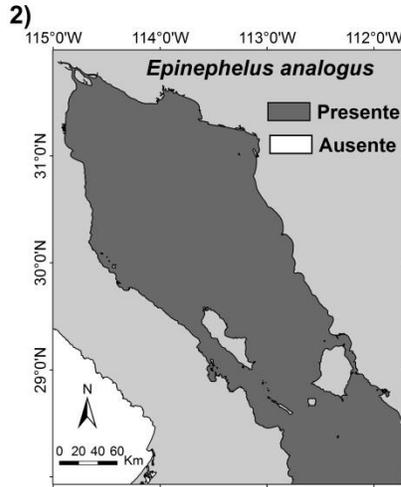
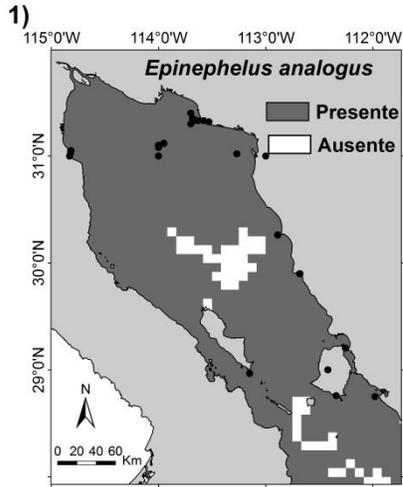
*Datos *in situ* para el área de modelación del Golfo de California.

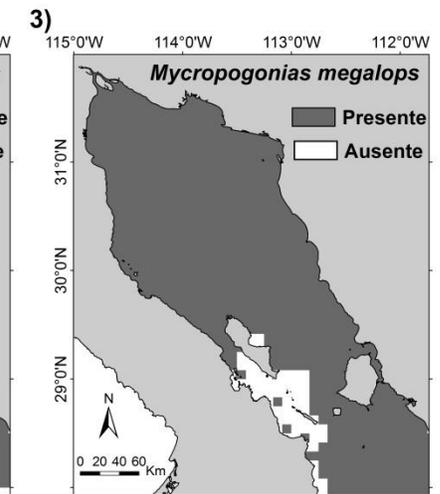
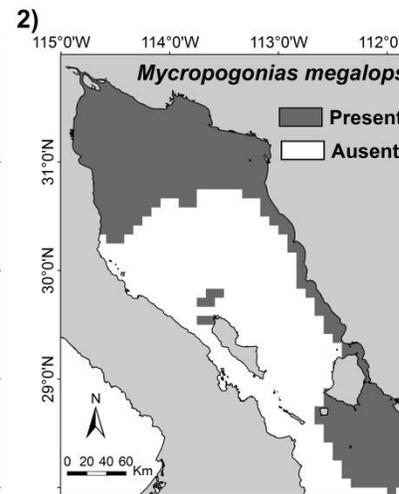
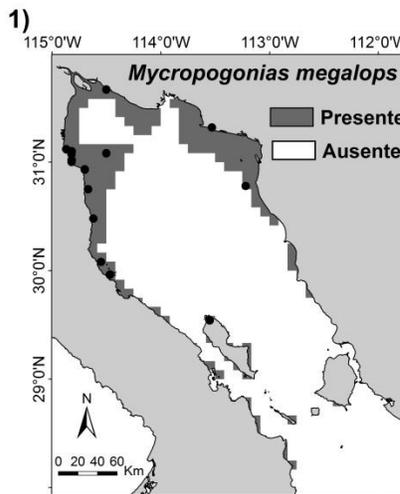
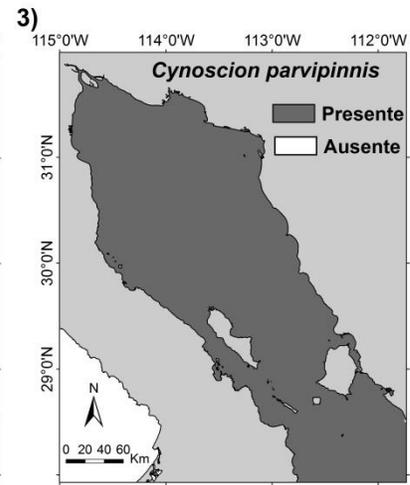
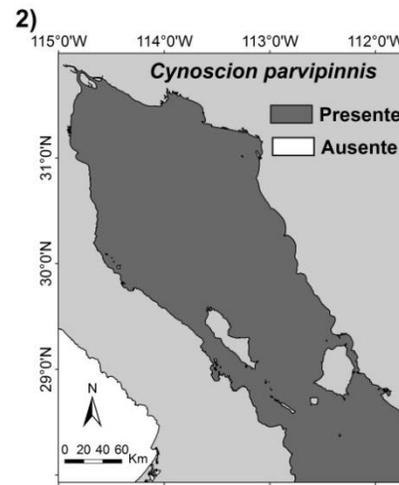
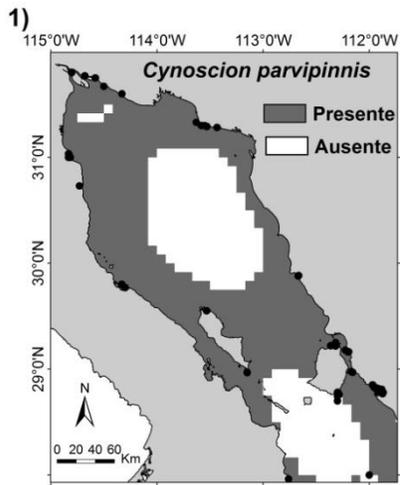
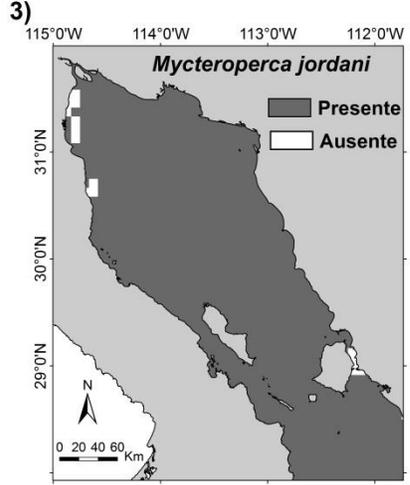
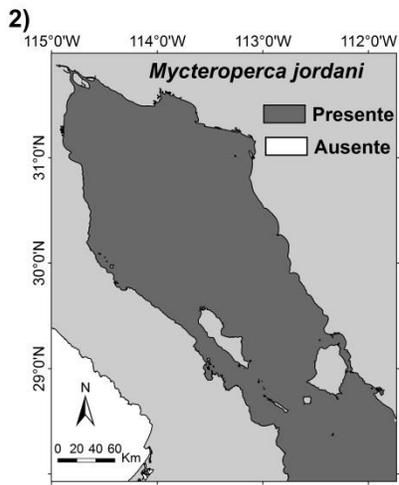
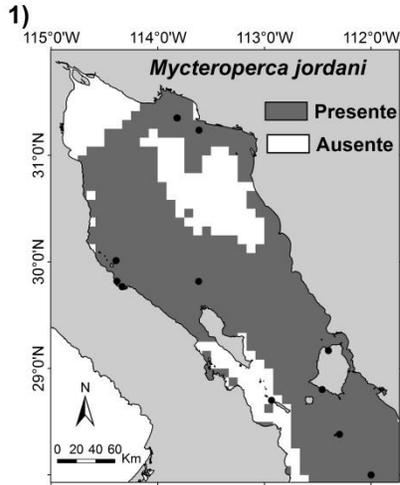
Anexo 5.

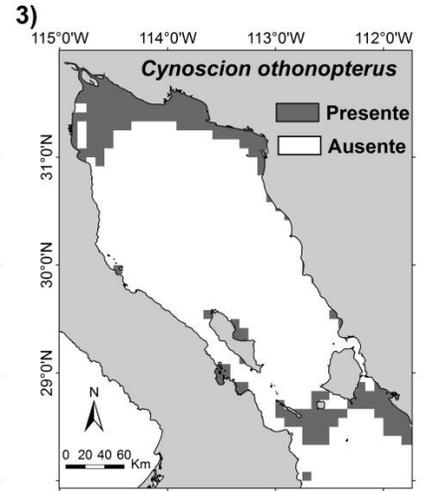
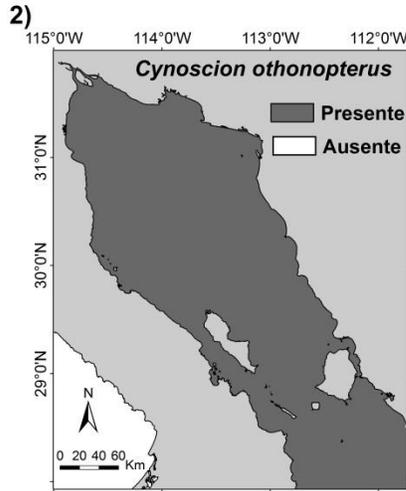
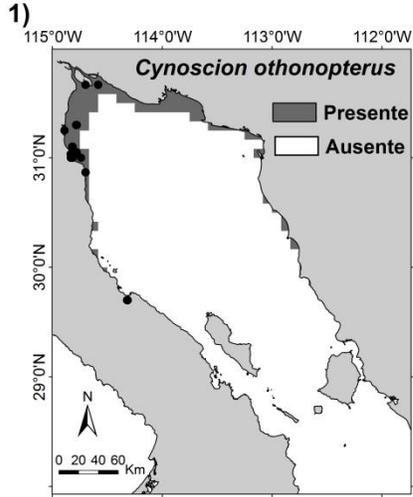
Mapas mostrando los tres modelos de distribución potencial para cada una de las 12 especies del presente estudio en formato binario (presencia/ausencia). Se muestra: 1) El modelo detallado para el tiempo presente, 2) Modelo simple para el tiempo presente y 3) Modelo simple para el tiempo futuro. Los puntos representan los registros de ocurrencia de cada especie; se puede observar que éstos coinciden con los modelos detallados para el tiempo presente.











Anexo 6.

Valores del área bajo la curva (AUC) resultantes de los modelos detallados para el tiempo presente para los datos de entrenamiento y de prueba.

Especie	Valores de AUC para los datos de entrenamiento	Valores de AUC para los datos de prueba
<i>Mycteroperca jordani</i>	0.98	0.97
<i>Mycteroperca rosacea</i>	0.98	0.98
<i>Mycteroperca prionura</i>	0.98	0.97
<i>Paralabrax maculatofasciatus</i>	0.98	0.98
<i>Hyporthodus acanthistius</i>	0.98	0.98
<i>Epinephelus analogus</i>	0.98	0.97
<i>Totoaba macdonaldi</i>	0.97	0.90
<i>Cynoscion othonopterus</i>	0.98	0.98
<i>Cynoscion parvipinnis</i>	0.98	0.98
<i>Micropogonias megalops</i>	0.97	0.82
<i>Hoplopagrus guentherii</i>	0.98	0.96
<i>Lutjanus argentiventris</i>	0.98	0.97

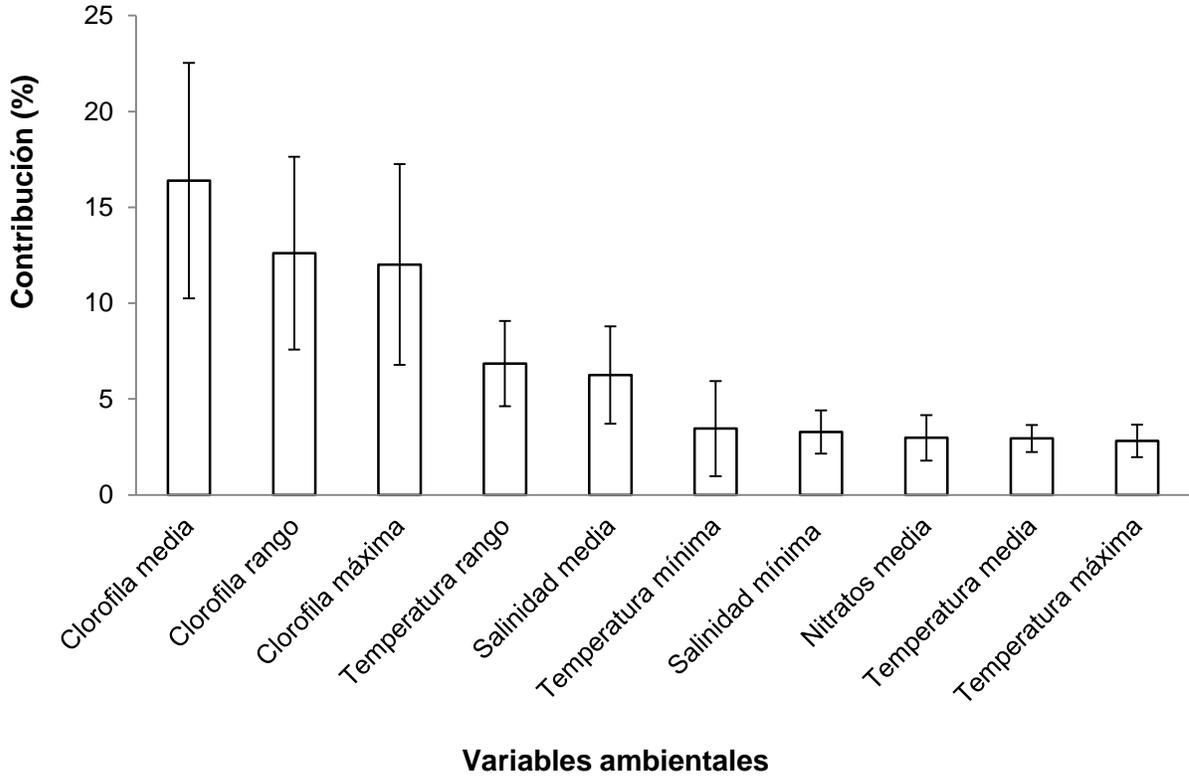
Anexo 7.

Valores del área bajo la curva (AUC) resultantes de los modelos simples para el tiempo presente para los datos de entrenamiento y de prueba.

Especie	Valores de AUC para los datos de entrenamiento	Valores de AUC para los datos de prueba
<i>Mycteroperca jordani</i>	0.95	0.94
<i>Mycteroperca rosacea</i>	0.96	0.97
<i>Mycteroperca prionura</i>	0.96	0.96
<i>Paralabrax maculatofasciatus</i>	0.95	0.92
<i>Hyporthodus acanthistius</i>	0.84	0.85
<i>Epinephelus analogus</i>	0.90	0.87
<i>Totoaba macdonaldi</i>	0.91	0.87
<i>Cynoscion othonopterus</i>	0.93	0.98
<i>Cynoscion parvipinnis</i>	0.97	0.93
<i>Micropogonias megalops</i>	0.90	0.84
<i>Hoplopagrus guentherii</i>	0.88	0.90
<i>Lutjanus argentiventris</i>	0.88	0.87

Anexo 8.

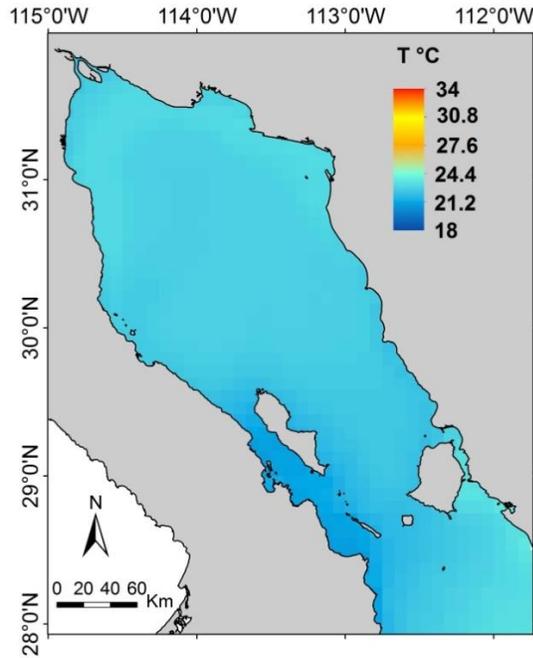
Porcentaje de contribución de las variables ambientales que contribuyeron mayormente (>90%) en los modelos de distribución potencial detallados para el tiempo presente.



Anexo 9.

Valores de la temperatura media superficial del mar para el tiempo presente y para el año 2050.

Temperatura media para el tiempo presente



Temperatura media estimada para el año 2050 bajo el escenario RCP 4.5

