



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio  
de las personas  
y las naciones

# Evaluación de impactos del cambio climático sobre las islas de México y su área de influencia

## Informe final

2017

Documento generado a  
partir de los resultados  
de la consultoría  
realizada por:

Alfonso Aguirre Muñoz

Serie

**2**

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad  
y los riesgos climáticos

Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: Alfonso Aguirre Muñoz.

Citar como:

PNUD México-INECC. 2017. *Evaluación de impactos del cambio climático sobre las islas de México y su área de influencia*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, 119 pp. Alfonso Aguirre Muñoz. México

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México” del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Agradecimiento:

Al gobierno de Canadá a través de Environment Canada por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, durante 2014-2018. Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

## Contenido

<b>2</b>	<b>Análisis de impactos del cambio climático en función de las características geomorfológicas, oceánicas y atmosféricas de las islas y del mar en el que se encuentran.....</b>	<b>9</b>
2.1	Introducción.....	9
2.1.1	Océano Pacífico Norte .....	10
2.1.2	Golfo de California .....	11
2.1.3	Océano Pacífico Tropical.....	11
2.1.4	Mar Caribe y Golfo de México .....	12
2.2	Objetivo.....	13
2.3	Método.....	13
2.3.1	Geomorfología.....	13
2.3.2	Elevación del Nivel del Mar .....	14
2.3.3	VARIABLES Oceanográficas.....	15
2.3.4	VARIABLES Atmosféricas.....	17
2.4	Resultados.....	17
2.4.1	Geomorfología.....	17
2.4.2	Elevación del nivel del mar .....	19
2.4.3	VARIABLES oceanográficas .....	21
2.4.4	VARIABLES atmosféricas.....	29
2.5	Discusión.....	32
2.5.1	Elevación del nivel del mar .....	32
2.5.2	Geomorfología marina.....	33
2.5.3	VARIABLES oceanográficas .....	34
2.5.4	VARIABLES atmosféricas.....	35
2.6	Literatura citada .....	36
2.7	Glosario de características geomorfológicas .....	39
<b>3</b>	<b>Evaluación de impactos del cambio climático sobre los hábitats asociados a las islas de México .....</b>	<b>40</b>
3.1	Introducción.....	40

3.1.1	Efectos del cambio climático sobre hábitats de pinnípedos, aves marinas y pesquerías.....	40
3.2	Metodología .....	48
3.2.1	Proyecciones de los efectos de cambio climático .....	48
3.2.2	Especies en islas .....	48
3.2.3	Hábitat.....	48
3.3	Resultados.....	50
3.3.1	Proyecciones de variables ambientales.....	50
3.4	Discusión .....	55
3.4.1	Vulnerabilidad de los Pinnípedos ante los efectos del Cambio Climático .....	55
3.4.2	Vulnerabilidad de Aves Marinas ante los efectos del Cambio Climático.....	56
3.4.3	Vulnerabilidad de las especies de importancia pesquera ante los efectos pronosticados de cambio climático .....	57
3.5	Literatura citada .....	61
<b>4</b>	<b>Evaluación de impactos del cambio climático sobre la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México: estado del arte de la perspectiva jurídica relacionada con las islas, delimitación del área de influencia, y variables a ser consideradas desde el derecho internacional público .....</b>	<b>64</b>
4.1	Introducción.....	64
4.1.1	Zona Económica Exclusiva y las islas de México.....	64
4.1.2	Impactos del aumento del nivel del mar en las islas de México .....	70
4.2	Zona Económica Exclusiva: contexto jurídico nacional e internacional .....	74
4.2.1	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos .....	74
4.2.2	Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.....	74
4.2.3	Ley Federal del Mar .....	76
4.2.4	Ley General de Bienes Nacionales .....	76
4.2.5	Tratados y acuerdos con Estados vecinos .....	77
4.3	Resultados.....	78
4.4	Literatura Citada .....	80
<b>5</b>	<b>Bases para formular un Programa Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático para el Territorio Insular Mexicano .....</b>	<b>82</b>
5.1	Bases.....	82

5.1.1	Instrumentos .....	84
5.1.2	Actores.....	86
5.1.3	Instrumentos en los PACC.....	87
5.2	Colaboración internacional .....	88
5.2.1	Aves marinas.....	90
5.2.2	Pinnípedos .....	92
5.2.3	Pesquerías artesanales .....	94
5.3	Política y Sociedad.....	96
5.3.1	Derechos humanos.....	96
5.3.2	Política de población insular específica y deliberada.....	97
5.4	Ecosistemas insulares .....	99
5.4.1	Ecosistemas insulares de relevancia para la conservación.....	99
5.5	Impactos y vulnerabilidad .....	100
5.5.1	Factores de presión asociados al cambio climático .....	100
5.6	Sistemas insulares ante el cambio climático .....	101
5.6.1	Cambios de la productividad primaria marina.....	101
5.6.2	Fragmentación de hábitat y cambios en la distribución de especies .....	103
5.6.3	Blanqueo de coral .....	104
5.7	Mitigación y adaptación.....	105
5.7.1	Restauración.....	105
5.7.2	Actividades y términos .....	106
5.7.3	Resiliencia.....	107
5.7.4	Prevención.....	108
5.7.5	Casos prioritarios.....	109
5.8	Referencias .....	112

## Lista de Cuadros

Cuadro 3-1. Superficie insular perdida (en hectáreas) para cada una de las islas estudiadas ante un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m. Los números en paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie original de cada una de las islas. ....	71
Cuadro 3-2. Resumen de los Tratados y Acuerdos internacionales firmados por México relacionados con los objetivos de la CONVEMAR.....	77

## Lista de Figuras

Figura 1-1. Mapa de los dominios estudiados. El recuadro azul representa el Pacífico Norte, el morado el Golfo de California, el verde el Pacífico Tropical y el café el Mar Caribe y Golfo de México. ....	16
Figura 1-2. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Pacífico Norte (der.).....	21
Figura 1-3. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Pacífico Tropical (der.).....	21
Figura 1-4. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Mar Caribe y Golfo de México (der.).....	22
Figura 1-5. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).....	24
Figura 1-6. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).....	25
Figura 1-7. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Tropical durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).....	26
Figura 1-8. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Golfo de México y Mar Caribe durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).....	27
Figura 1-9. Año típico de la temperatura superficial del mar en Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.) y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.).....	28
Figura 1-10. Años típicos de la temperatura ambiental (°C), con barras de desviación estándar, según el mar: Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.), y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.).....	30

Figura 1-11. Años típicos de la precipitación mensual (mm), con barras de desviación estándar, según el mar: Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.), y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.). .....	32
Figura 2-1 Cambios en la temperatura ambiental ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).....	51
Figura 2-2. Cambios en la precipitación ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.). .....	51
Figura 2-3. Cambios en la temperatura superficial del mar ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.). .....	52
Figura 2-4. Cambios en el oxígeno disuelto ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).....	52
Figura 2-5. Cambios en el pH superficial del mar ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).....	53
Figura 3-1 Evolución en el marco legal, sobre la implementación de la figura ZEE. ....	66
Figura 3-2. Sección de la primera página del Decreto que fija el límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de México, publicado en el Diario Oficial de la Federación el lunes 7 de junio de 1976.....	67
Figura 3-3. Representación gráfica que muestra la contribución de las islas Guadalupe, Clarión y Socorro, así como de los arrecifes Cayo Arenas y Alacranes, a la Zona Económica Exclusiva de México (elaboración propia), con base en el método de arcos de circunferencia (Kastrisos 2014 y Gómez-Robledo Verduzco 2016, presentan información sobre el método). .....	68
Figura 3-4. Zona Económica Exclusiva de México, en verde, y Zona Económica Exclusiva de Francia alrededor de la isla Clipperton, en azul. La pérdida de esta isla representó para México una superficie de 435,657 km <sup>2</sup> de superficie marina. ....	69
Figura 3-5. Porcentaje de la superficie insular perdida debido a un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m tomado de Aguirre Muñoz et al. (en revisión).....	72
Figura 3-6. Superficie insular perdida en hectáreas debido a un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m tomado de Aguirre Muñoz et al. (En revisión). .....	73
Figura 2-1. Representación gráfica de la pérdida de superficie de Zona Económica Exclusiva en el Golfo de México, ante la pérdida de Arrecife Alacranes y Cayo Arenas debido a una elevación del nivel del mar de 5 metros. El color verde claro representa la ZEE original, mientras que el color verde oscuro muestra la configuración de la ZEE tras el impacto del cambio climático. ....	78

## Lista de Tablas

Tabla 1-1. Caracterización geomorfológica y pendiente del fondo marino para cada isla.....	17
Tabla 1-2. Pendiente promedio por cada mar.....	18
Tabla 1-3. Superficie insular (ha) y línea de costa (km) perdidas para cada isla ante escenarios de aumento del nivel del mar de 1, 3 y 5 m. Los números entre paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie y línea de costa original de cada una de las islas.....	19
Tabla 1-4. Superficie insular (ha) perdida para cada conjunto de isla según el mar en el que se encuentran ante escenarios de aumento del nivel del mar de 1, 3 y 5 m. Los números entre paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie original... 20	
Tabla 1-5. Porcentaje de áreas potencialmente productivas en función del promedio de la vorticidad relativa y la topografía superficial del océano en los cuatro mares.....	22
Tabla 1-6. Intervalos de confianza de la temperatura superficial del mar, con un nivel de confianza 95%, por temporada en cada mar.....	28
Tabla 1-7. Intervalos de confianza de la temperatura ambiental estacional (°C), con un nivel de confianza 95%, para cada mar.....	31
Tabla 1-8. Intervalos de confianza de la precipitación mensual (mm), con un nivel de confianza 95%, para cada mar.....	31
Tabla 2-1. Hábitats asociados a tres diferentes grupos de especies marinas, evaluados en diferentes mares de México. Cada celda dentro de la tabla representa el hábitat evaluado en el mar al que pertenecen. En los casos donde la celda se encuentra marcado con un guión (-) es porque el hábitat para ese grupo no pertenecía a ninguno de los mares estudiados.....	49
Tabla 2-2. Intervalos de las diferencias entre variables fisicoquímicas proyectadas y un periodo histórico. Las variables fueron seleccionadas según su impacto sobre los hábitats evaluados con el RVA.....	54
Tabla 2-3. Número total de especies y número total de especies endémicas (compartidas, estrictas y totales) por mar.....	55



# 1 Análisis de impactos del cambio climático en función de las características geomorfológicas, oceánicas y atmosféricas de las islas y del mar en el que se encuentran



Imagen 1-1 Pareja de albatros de Laysan en Isla Guadalupe, frente al Islote Zapato. © Archivo GECI / J.A. Soriano

## 1.1 Introducción

El aumento del nivel del mar es una de las principales consecuencias del cambio climático (Nicholls y Cazenave, 2010). Se reconoce que sus efectos son identificables con claridad (Nicholls et al., 2007; Nicholls, 2015): inmersión total o un incremento en las inundaciones de la costa; pérdida o cambios en hábitats como humedales o manglares (incluso islas); erosión costera; e intrusión de agua salina sobre las aguas superficiales y los mantos acuíferos. Todos estos efectos contundentes tienen impactos socioeconómicos directos e indirectos, en su mayoría negativos. Las inundaciones, por ejemplo, pueden dañar la infraestructura costera o, en casos extremos, provocar pérdidas humanas (Nicholls, 2015). El aumento del nivel del mar tiene un efecto negativo mayor, en algunos casos incluso catastrófico, para las islas del mundo, especialmente para aquellas que tienen un área reducida, son de baja elevación y con una topografía homogénea (Harter et al., 2015). Tal es el caso de las islas del Pacífico Sur, el Océano Índico y el Caribe

(Nurse et al., 2014). Estudios recientes en diferentes regiones del mundo reconocen los impactos negativos del aumento del nivel del mar sobre las islas, incluyendo efectos tanto en sus hábitats y especies de flora y fauna (Bellard et al., 2014, Courchamp et al., 2014, Wetzel et al., 2013, Wetzel et al., 2012, Harter et al., 2015, Reynolds et al., 2015), como en la población e infraestructura insular (Wetzel et al., 2012, Fakhruddin et al., 2015).

### 1.1.1 Océano Pacífico Norte

**Geomorfología.** El Pacífico Norte se caracteriza por contener una plataforma continental muy angosta hacia la parte Norte; esta plataforma se ensancha ligeramente hacia el Sur. A partir del quiebre de la plataforma continental, el fondo marino cae abruptamente a profundidades de 1000 y 3000 metros. El Pacífico Norte también abarca islas que emergen de la planicie abisal, como Isla Guadalupe, Los Alijos y el Archipiélago del Norte, que incluye las islas San Clemente, Santa Catalina, Santa Cruz, Santa Rosa y San Miguel (Wilkinson, 2009).

**Variables oceanográficas.** El dominio que en este trabajo se considera como Pacífico Norte, desde la perspectiva de los océanos globales representa una fracción del Pacífico Nororiental. Dentro de esta fracción del Pacífico Nororiental, el sistema que domina la dinámica oceánica es el Sistema de la Corriente de California (SCC). El SCC es una corriente oceánica superficial (0-200 m) de tipo frontera oriental que viaja del Norte hacia el ecuador desde las costas del estado de Oregon en Estados Unidos hasta la parte Sur de la Península de Baja California. En la región de interés, las costas de Baja California, las condiciones hidrográficas del agua están asociadas a bajas temperaturas superficiales del mar (10-20 °C), bajas salinidades (32.5-33.8), aguas bien oxigenadas y alta disponibilidad de nutrientes (Durazo, 2015; Gaxiola-Castro y Durazo, 2010). Esto lleva a una elevada productividad que se encuentra entre 150-300 g C/m<sup>2</sup>/año (Wilkinson et al., 2009).

**Variables atmosféricas.** Dentro del dominio considerado como el Pacífico Norte, el clima varía entre árido, semiárido y mediterráneo (Wilkinson et al., 2009). La costa de la Península de Baja California cuenta con una transición de Norte a Sur entre un clima mediterráneo y desértico o árido. Las islas mexicanas dentro de este dominio cuentan con una posición geográfica cercana a la costa peninsular, por lo que son consideradas islas costeras, con la excepción de Isla Guadalupe que es oceánica. Ésta e Isla Cedros cuentan con una posición latitudinal similar, aproximadamente a la mitad de la Península de Baja California, aunque su posición longitudinal difiere drásticamente. Sin embargo, el clima oceánico en esta zona es similar. La temperatura promedio anual a nivel del mar es de 19.9°C y 17.7°C en Cedros y Guadalupe, respectivamente; ambas presentan lluvia escasa, principalmente durante invierno-primavera (González-Abraham et al., 2010).

### 1.1.2 Golfo de California

**Geomorfología.** El Golfo de California se caracteriza por sus cuencas profundas (de más de 3000 metros a la entrada del golfo), sus pendientes y sus plataformas son tanto angostas como anchas (Wilkinson et al., 2009).

**Variables oceanográficas.** El Golfo de California (GC), también conocido como Mar de Cortés, es un mar semicerrado ubicado al Noreste del Océano Pacífico, de aproximadamente 100-150 km de ancho, que colinda con la costa Este de la Península de Baja California y la costa Oeste del resto de México (López-Mariscal et al., 2006; Lonsdale, 1989). En cuanto a sus características oceanográficas, este mar se encuentra dominado por tres sistemas, las surgencias generadas por el viento, la marea y la circulación termohalina (Álvarez Borrego, 2002 en Wilkinson et al., 2009). De manera general, el GC presenta una temperatura de la superficie marina de entre 13 y 21°C en invierno y de 28 a 31°C en verano. Tiene una productividad elevada, por encima de los 300 g C/m<sup>2</sup>/año, figurando entre los ecosistemas marinos más productivos del mundo (Wilkinson et al., 2009).

**Variables atmosféricas.** El Golfo de California, a pesar de ser mar, cuenta con un clima continental y es considerado una cuenca de evaporación debido a su alta temperatura ambiental y baja precipitación anual. Existe un alto gradiente de temperatura, con condiciones desérticas en la zona Norte. Durante el verano, el Golfo de California presenta un clima más tropical y subtropical, mientras que en el invierno es templado (Wilkinson et al., 2009). En general, cuenta con una temporada de huracanes entre agosto y noviembre, mientras que hacia el Sur del golfo se llegan a registrar tormentas tropicales, ciclones y huracanes desde abril hasta noviembre (Espinosa, 2004). En cuanto a la precipitación, ésta suele ser mayor en la zona este del golfo que en el oeste. (Wilkinson et al., 2009).

### 1.1.3 Océano Pacífico Tropical

**Geomorfología.** El Pacífico Tropical se caracteriza por tener una plataforma continental angosta, que en general mide de 10 a 15 kilómetros de ancho. La trinchera mesoamericana tiene una profundidad de entre 4000 y 5000 metros y se localiza a unos 100 kilómetros mar adentro. Del lado marítimo de la trinchera, la planicie abisal tiene una profundidad de 3500 a 4000 metros y está marcada por numerosos montes submarinos con elevaciones de hasta 1000 metros sobre el fondo marino. Esta región comprende además un sistema de dorsales en el que los bordes de las placas tectónicas, en expansión, están creando nuevo suelo marino, como el Archipiélago de Revillagigedo (Wilkinson et al., 2009).

**Variables oceanográficas.** En este trabajo se denominó como Pacífico Tropical al mar también conocido como el Pacífico transicional mexicano. En esta región del océano Pacífico es donde la porción más sureña de la Corriente de California se encuentra con la Corriente Nor-Ecuatorial. La zona de transición entre estas dos corrientes se encuentra a una distancia de 200 a 300 km de

la costa (Aguirre-Gómez, 2002). La temperatura superficial del mar en esta región oscila entre los 25 y 28°C con un promedio de 29°C en verano. La productividad en esta zona es elevada y cuenta con una alta diversidad de especies, influenciada por la presencia de las diferentes corrientes que se encuentran en la región (Wilkinson et al., 2009).

**Variables atmosféricas.** El clima en el Pacífico Tropical, como lo dice su nombre, es de tipo tropical debido a que la temperatura ambiental a lo largo del año siempre se encuentra por arriba de los 18°C. Esto permite que en las costas de este mar se encuentre una gran extensión de selva seca, la cual se da por una temporada de lluvia seguida de periodos de sequía (Balvanera et al., 2000). Por otro lado, en la zona oceánica del Pacífico Tropical donde se encuentran las islas del Archipiélago de Revillagigedo, por lo general existe un clima cálido subhúmedo y templado subhúmedo. Las lluvias se dan principalmente durante el verano, con los valores máximos en el mes de septiembre. En general, la temperatura ambiental promedio anual en el archipiélago supera los 22°C y el mes más frío supera los 18°C. En Isla Socorro, la temperatura ambiental se encuentra entre 22 y 27.5°C, con una oscilación térmica entre 5 y 7°C. (CONANP, 2004).

### 1.1.4 Mar Caribe y Golfo de México

**Geomorfología.** El Mar Caribe y Golfo de México tienen una topografía diversa. La porción mexicana del Mar Caribe exhibe una plataforma continental angosta de 20 kilómetros de ancho alrededor de Cancún y de entre uno y tres kilómetros en la región de Sian Ka'an. También abarca Cozumel, Isla Mujeres e Isla Contoy, así como Banco Chinchorro frente a las costas continentales. El margen continental frente a la parte mexicana es extremadamente complejo, pues comienza con una suave pendiente que se convierte en una empinada escarpa antes de alcanzar la profunda cuenca de Yucatán (más de 4500 m). La región del Golfo de México incluye pendientes suaves en el talud, escarpes, lomas, cuencas y cañones submarinos. La costa Sur del golfo tiene una plataforma considerablemente ancha hacia la parte más oriental, que alcanza una amplitud de hasta 170 kilómetros frente a Campeche y hasta 220 kilómetros en la costa Norte de Yucatán; esta plataforma se estrecha hacia el Oeste, de manera que mide entre 6 y 16 kilómetros en su parte más angosta, frente a San Andrés Tuxtla. El talud adyacente es más pronunciado en el Este (frente a la península de Yucatán), y más suave en el Oeste. Una gran parte de la cuenca del Golfo de México también se encuentra dentro del golfo Sur. La planicie abisal de Sigsbee es la parte más profunda de la región con 3600 metros (Wilkinson et al., 2009).

**Variables oceanográficas.** El Golfo de México es una cuenca o sistema semicerrado dominado por la Corriente de Lazo que llega al Golfo a través del Canal de Yucatán y deja el Golfo a través del estrecho de Florida (Aguirre-Gómez, 2002). La temperatura superficial promedio en esta región oscila entre 24 y 25°C en invierno y entre 28 y 28.5°C en verano. Como parte de su dinámica, presenta surgencias de la plataforma continental impulsadas por el viento, así como frentes fríos conocidos como “Nortes” durante el otoño, invierno y primavera. La productividad

va de condiciones eutróficas en aguas costeras a oligotróficas en las profundidades del océano (Wilkinson et al., 2009).

Esta región situada al Sur del Golfo de México está influenciada principalmente por la Corriente del Caribe. Tiene una temperatura superficial promedio de 25.5°C en invierno y 28°C en verano. La dinámica del Mar Caribe se encuentra principalmente influenciada por la radiación neta absorbida, procesos de evaporación, la conducción turbulenta y el intercambio de calor entre diferentes capas de la columna de agua (Aguirre-Gómez, 2002). Aunque la surgencia que se registra a lo largo de la costa Norte de Colombia contribuye a una productividad relativamente alta en pequeñas zonas del Sur de Caribe, el resto de la región se compone principalmente de aguas claras pobres en nutrientes (Wilkinson et al., 2009).

**Variables atmosféricas.** El clima del Mar Caribe y Golfo de México varía entre tropical seco y tropical húmedo, con frentes meteorológicos estacionales capaces de ocasionar efectos negativos sobre procesos oceanográficas, como la producción primaria (Wilkinson et al., 2009). De octubre a abril se presentan estos frentes, donde se intercambian masas de aire frío y seco del continente con masas de aire marítimo tropical del mismo golfo. Los patrones de lluvia son muy marcados, con los máximos en septiembre, lo cual coincide con la época de mayor frecuencia de los ciclones provenientes de las Antillas (García-Amaro, 2003). En el verano, la interacción océano-atmósfera durante tormentas tropicales produce grandes flujos de vapor de agua, lo cual finalmente al condensarse es transformado en lluvia (Monreal Gómez et al., 2004).

## 1.2 Objetivo

En el presente estudio (que consta de cinco documentos) se evaluaron los impactos del cambio climático en 36 islas prioritarias y representativas de diferente tamaño, elevación, complejidad topográfica, origen geológico, distancia al continente y población, distribuidas en todos los mares de México. En este documento, se planteó como objetivo realizar un análisis diferenciando los impactos en función de las características geomorfológicas de las islas, así como por las características oceanográficas y atmosféricas del mar en el que éstas se encuentran.

## 1.3 Método

### 1.3.1 Geomorfología

Se utilizaron datos de Geomorfología Marina del Geoportal de información de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), los cuales están disponibles en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Estos datos representan las distintas formas del relieve submarino, dentro de la zona económica exclusiva en la República Mexicana (CONABIO, 2002). La base de datos descargada cuenta con 354 polígonos con la caracterización del fondo marino.

Se utilizaron también datos bidimensionales de un modelo de terreno continuo para el océano y el continente, obtenidos en el portal GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans); estos datos contienen la elevación del continente y el océano, cubren la totalidad del territorio mexicano, y consisten en una malla con un intervalo de 30 segundos de arco. Los datos están disponibles en [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

Se caracterizó el suelo marino adyacente a cada isla haciendo una comparación entre cada uno de los geopólignos con la ubicación geográfica de cada isla. De esta manera se determinó la característica geomorfológica del relieve marino asociada a cada isla.

Con los datos de elevación del modelo de terreno continuo se determinaron pendientes ( $m$ ), asociadas con el fondo marino cercano a cada isla. Para determinar las diferentes pendientes se calculó un parámetro  $l$  de longitud para cada isla; este parámetro está en función del área  $A$  de cada isla

$$l = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}$$

Usando el parámetro  $l$  se definió un cuadro, de dimensiones  $2l$  metros en cada lado, alrededor de cada isla o grupo de islas. La posición del centro del cuadro definido coincide con las coordenadas del punto medio de cada isla o conjunto de islas. Dentro de este cuadrado se encontró la profundidad máxima  $P_{max}$ . Las pendientes,  $m$ , están definidas, entonces, como la razón de la profundidad máxima  $P_{max}$  entre  $l$ , correspondiente con la fórmula:

$$m = \frac{P_{max}}{l}$$

### 1.3.2 Elevación del Nivel del Mar

Se utilizaron datos de elevación topográfica del STRM (Shuttle Radar Topography Mission) parte del Jet Propulsion Laboratory de NASA. El STRM es un proyecto en común entre National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) y National Aeronautics and Space Administration (NASA). En conjunto estas agencias estadounidenses producen los datos de topografía digital utilizados en este trabajo y disponibles en: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Los datos de elevaciones cuentan con una resolución de aproximadamente 30 metros dentro de una malla de longitud/latitud con una precisión vertical de 16 metros (<http://srtm.usgs.gov/mission.php>, 2008).

A partir de mallas de elevación topográfica de diferentes islas de México se calcularon los contornos de 0, 1, 3 y 5 metros de elevación. Esto con el fin de estimar el porcentaje y total de área y línea de costa perdida de diferentes islas de México en escenarios de incremento del nivel del mar de 1, 3 y 5 metros. Finalmente se agruparon los resultados según el mar en el que se encuentra cada isla para analizar los impactos por región. Para calcular la longitud de línea de costa correspondiente a cada escenario de inundación, se calculó una constante de compacidad  $C$  para cada isla, definida como la razón de longitud de la línea de costa  $L_0$  entre la raíz cuadrada del área  $A_0$  en el escenario original, es decir:

$$C = \frac{L_0}{\sqrt{A_0}}$$

Después, para cada escenario de inundación (1, 3 y 5 m) se calculó la longitud de la línea de costa L a partir del área A correspondiente, con la fórmula:

$$L = C \cdot \sqrt{A}$$

### 1.3.3 Variables Oceanográficas

Para el análisis climático se utilizaron los mapas de temperatura superficial del mar MUR-SST (por sus siglas en inglés, Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature), producto de una combinación de datos de satélite y observaciones in situ creados por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA (<http://mur.jpl.nasa.gov>), disponibles en: <http://podaac-opensap.jpl.nasa.gov>, con una resolución espacial de 0.01° de latitud y longitud. Por otra parte, se utilizaron los promedios mensuales de las corrientes superficiales del océano y la topografía superficial del océano del GODAS (por sus siglas en inglés, Global Ocean Data Assimilation) producido por el NCEP (por sus siglas en inglés, National Centers for Environmental Prediction), disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>, con una resolución espacial de 1° en longitud y 0.33° en latitud.

Para evaluar las variables en los diferentes mares mexicanos, se utilizaron cuatro diferentes dominios. El rectángulo que cubre el Pacífico Norte va de 117.20°W a 107.80°W y de 17.00°N a 30.00°N con 35° de inclinación, con el fin de simular la pendiente de la Península de Baja California. El dominio que cubre el Golfo de California va desde los 107.50°W a los 103.95°W y desde los 19.25°N a los 33.80°N, con la misma inclinación de 35°. En el Pacífico Tropical se utilizó un rectángulo que va desde 121°W hasta 104°W y de los 17.50°N a los 22.5°W. Por último, el dominio que cubre el Golfo de México y Mar Caribe va de los 98°W hasta los 84°W y desde los 16.50°N hasta los 26°N (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



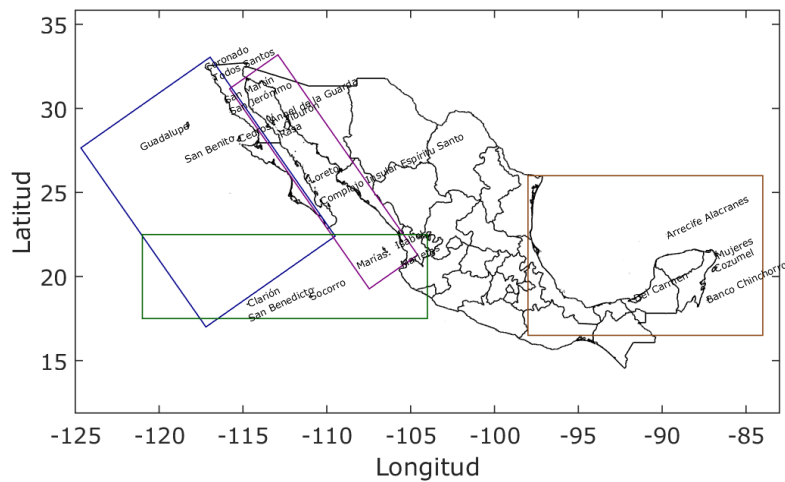


Figura 1-1. Mapa de los dominios estudiados. El recuadro azul representa el Pacífico Norte, el morado el Golfo de California, el verde el Pacífico Tropical y el naranja el Mar Caribe y Golfo de México.

Para el análisis espacial de las variables oceanográficas se calculó la vorticidad relativa de los promedios mensuales de las corrientes superficiales en cada uno de los mares. Ésta está dada por la rotación local de las corrientes superficiales ( $u$  y  $v$ ):

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

También se calcularon las anomalías de la topografía superficial del mar ( $\eta$ ), como la diferencia entre la topografía de la superficie del océano (ssh) y su promedio:

$$\eta = \text{ssh} - \overline{\text{ssh}}$$

Una vez calculadas la vorticidad relativa y las anomalías de la topografía superficial del mar se crearon mapas promedios y se realizó una intersección de dominios. Esto con el fin de evaluar zonas potencialmente productivas que, para este trabajo se definieron como, aquellos puntos dentro del dominio que coinciden con valores positivos de la vorticidad relativa y valores negativos de las anomalías de la topografía superficial del mar ( $\xi > 0$  y  $\eta < 0$ ).

Para el análisis temporal de la temperatura superficial del mar se calculó el año típico y los intervalos de confianza de los promedios estacionales en los cuatro dominios de interés. Por otra parte, para el análisis espacial de la temperatura superficial del mar, se calcularon los promedios estacionales de los cuatro mares estudiados.



### 1.3.4 Variables Atmosféricas

Los datos de las variables atmosféricas se obtuvieron del proyecto de reanálisis ERA-Interim de la organización intergubernamental ECMWF (por sus siglas en inglés, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Estos datos representan información diaria a lo largo de 30 años, de 1981 al 2010, y cuentan con una resolución espacial de aproximadamente 13×13 km. Los datos de la temperatura del aire además cuentan con una precisión vertical de 2 metros. Esta información se encuentra disponible en: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.

Así como con las variables oceanográficas, las variables ambientales se analizaron dentro de los mismos cuatro dominios que cubren los diferentes mares de México: el Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Tropical y el Mar Caribe y Golfo de México.

Los datos del reanálisis ERA-Interim se utilizaron para calcular los años típicos mensuales e intervalos de confianza estacionales (con un nivel de confianza de 95%) de la temperatura ambiental y precipitación. Para los intervalos de confianza estacionales, el invierno se definió como los meses de diciembre a febrero, la primavera de marzo a mayo, el verano de julio a agosto y el otoño de septiembre a noviembre.

## 1.4 Resultados

### 1.4.1 Geomorfología

La caracterización de la geomorfología marina adyacente a cada isla se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se aprecia que la característica de Plataforma Continental y la de Talud Continental son las predominantes. Se muestra también la pendiente del fondo marino alrededor de cada isla.

Tabla 1-1. Caracterización geomorfológica y pendiente del fondo marino para cada isla.

Isla	Geomorfología	Pendiente
Ángel de la Guarda	Talud Continental	0.015
Carmen	Talud Continental	0.053
Banco Chinchorro	Talud Continental	0.052
Cedros	Talud Continental	0.068
Clarión	Planicie Abisal	0.219
Coronado centro	Plataforma Continental	0.224
Coronado Norte	Plataforma Continental	0.224
Coronado Sur	Plataforma Continental	0.224

<b>Coronados</b>	Talud Continental	0.053
<b>Cozumel</b>	Talud Continental	0.060
<b>Danzante</b>	Talud Continental	0.053
<b>Del Carmen</b>	Plataforma Continental	0.001
<b>Arrecife Alacranes</b>	Plataforma Continental	0.014
<b>Espíritu Santo</b>	Talud Continental	0.030
<b>Guadalupe</b>	Planicie Abisal	0.086
<b>Isabel</b>	Talud Continental	0.008
<b>Larga</b>	Plataforma Continental	0.091
<b>Redonda</b>	Plataforma Continental	0.091
<b>María Cleofas</b>	Talud Continental	0.081
<b>María Madre</b>	Talud Continental	0.081
<b>María Magdalena</b>	Talud Continental	0.081
<b>Montserrat</b>	Plataforma Continental	0.053
<b>Mujeres</b>	Plataforma Continental	0.003
<b>Rasa</b>	Talud Continental	0.091
<b>San Benedicto</b>	Crestas	0.261
<b>San Benito de en medio</b>	Plataforma Continental	0.079
<b>San Benito este</b>	Plataforma Continental	0.079
<b>San Benito oeste</b>	Borderland	0.079
<b>San Jerónimo</b>	Plataforma Continental	0.015
<b>San Juanito</b>	Talud Continental	0.081
<b>San Martín</b>	Plataforma Continental	0.057
<b>Santa Catalina</b>	Talud Continental	0.053
<b>Socorro</b>	Crestas	0.092
<b>Tiburón</b>	Talud Continental	0.013
<b>Todos Santos Norte</b>	Borderland	0.090
<b>Todos Santos Sur</b>	Plataforma Continental	0.090

La Tabla 1-2 muestra la pendiente promedio para cada mar. La pendiente en cada mar fue calculada mediante el promedio de las pendientes en cada isla, caracterizando, de esta manera, la pendiente de cada mar en función de las islas que contiene.

Tabla 1-2. Pendiente promedio por cada mar.

Mar	Pendiente
-----	-----------

<b>Pacífico Norte</b>	0.11
<b>Golfo de California</b>	0.06
<b>Pacífico Tropical</b>	0.19
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	0.02

## 1.4.2 Elevación del nivel del mar

Los resultados de la simulación computacional de la inundación de cada isla bajo diferentes escenarios de elevación del nivel del mar se presentan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Superficie insular (ha) y línea de costa (km) perdidas para cada isla ante escenarios de aumento del nivel del mar de 1, 3 y 5 m. Los números entre paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie y línea de costa original de cada una de las islas.

Isla o grupo de islas	Superficie insular perdida (ha)			Línea de costa perdida (km)		
	1 m	3 m	5 m	1 m	3 m	5 m
Arrecife Alacranes	43.5 (39.7)	94.2 (85.9)	109.7 (100.0)	2.4 (22.3)	6.6 (62.4)	10.6 (100.0)
Banco hinchorro	32.4 (5.3)	92.5 (15.1)	292.0 (47.7)	0.4 (2.7)	1.2 (7.9)	4.1 (27.7)
Carmen	519.3 (3.5)	811.4 (5.4)	997.4 (6.7)	1.5 (1.8)	2.4 (2.8)	2.9 (3.4)
Cedros	388.4 (1.1)	789.5 (2.2)	1054.6 (2.9)	0.5 (0.5)	1.1 (1.1)	1.4 (1.5)
Clarión	71.4 (3.4)	136.2 (6.4)	212.7 (10.0)	0.4 (1.7)	0.7 (3.3)	1.2 (5.1)
Complejo Insular Espíritu Santo	155.4 (1.5)	524.7 (5.0)	852.2 (8.0)	0.5 (0.7)	1.6 (2.5)	2.7 (4.1)
Coronado	9.3 (1.2)	26.7 (3.4)	50.8 (6.5)	0.1 (0.6)	0.2 (1.7)	0.5 (3.3)
Coronado Medio	2.0 (15.6)	4.2 (32.1)	6.7 (51.7)	0.1 (8.1)	0.3 (17.6)	0.5 (30.5)
Coronado Norte	7.2 (12.9)	12.4 (22.1)	15.9 (28.4)	0.2 (6.7)	0.4 (11.8)	0.5 (15.4)
Coronado Sur	16.1 (10.4)	24.6 (15.9)	30.4 (19.7)	0.4 (5.4)	0.6 (8.3)	0.8 (10.4)
Cozumel	1279.0 (2.7)	3726.9 (7.8)	7399.0 (15.4)	1.4 (1.3)	4.2 (4.0)	8.4 (8.0)
Danzante	9.8 (2.4)	25.1 (6.2)	37.2 (9.1)	0.2 (1.2)	0.4 (3.1)	0.6 (4.7)

Del Carmen	2615.3 (20.4)	6504.2 (50.8)	10735.8 (83.9)	13.3 (10.8)	36.9 (29.9)	74.0 (59.9)
Guadalupe	191.4 (0.8)	489.8 (1.9)	693.8 (2.8)	0.3 (0.4)	0.9 (1.0)	1.2 (1.4)
Isabel	13.7 (13.0)	25.3 (24.0)	39.7 (37.6)	0.3 (6.7)	0.6 (12.8)	1.1 (21.0)
Larga	16.1 (21.1)	27.2 (35.5)	36.1 (47.2)	0.5 (11.2)	0.8 (19.7)	1.1 (27.3)
María Cleofas	27.4 (1.3)	68.7 (3.3)	121.0 (5.9)	0.1 (0.7)	0.3 (1.7)	0.6 (3.0)
María Madre	63.8 (0.4)	157.9 (1.1)	281.5 (1.9)	0.1 (0.2)	0.3 (0.5)	0.5 (1.0)
María Magdalena	67.8 (1.0)	177.4 (2.5)	280.0 (4.0)	0.2 (0.5)	0.5 (1.3)	0.7 (2.0)
Monserrat	14.0 (0.7)	39.3 (2.1)	63.5 (3.4)	0.1 (0.4)	0.2 (1.1)	0.3 (1.7)
Mujeres	35.2 (6.6)	147.2 (27.5)	322.7 (60.4)	0.6 (3.3)	2.6 (14.9)	6.4 (37.1)
Rasa	12.5 (18.5)	27.2 (40.2)	35.9 (53.1)	0.3 (9.7)	0.7 (22.7)	1.0 (31.5)
Redonda	1.6 (4.5)	4.5 (12.5)	7.1 (19.6)	0.1 (2.3)	0.2 (6.5)	0.3 (10.4)
San Benedicto	19.0 (2.8)	39.7 (5.9)	56.7 (8.4)	0.2 (1.4)	0.4 (3.0)	0.6 (4.3)
San Benito Este	8.4 (4.2)	24.7 (12.5)	39.5 (20.0)	0.1 (2.1)	0.4 (6.5)	0.6 (10.5)
San Benito Medio	7.7 (8.8)	29.8 (33.7)	47.9 (54.3)	0.2 (4.5)	0.8 (18.6)	1.3 (32.4)
San Benito Oeste	10.2 (2.1)	52.9 (11.1)	99.0 (20.7)	0.1 (1.1)	0.5 (5.7)	1.0 (10.9)

El análisis conjunto de pérdida de superficie insular por región oceánica muestra que la zona más afectada es el Mar Caribe y Golfo de México con una pérdida acumulada de 18,859.2 ha para el escenario de 5 m, lo que representa un 30.4% del total de superficie insular en la región (Tabla 1-4). Por otro lado, en términos absolutos, las islas en el Pacífico Tropical son las que presentan menor pérdida de superficie, pero el porcentaje de pérdida de superficie relativo a la poca superficie disponible es el segundo mayor (4.2 % para el escenario de 5 m). El territorio insular en el Pacífico Norte y Golfo de California presenta un porcentaje de pérdida similar entre ellos (3.5% y 3.5% respectivamente; Tabla 1-4).

Tabla 1-4. Superficie insular (ha) perdida para cada conjunto de isla según el mar en el que se encuentran ante escenarios de aumento del nivel del mar de 1, 3 y 5 m. Los números entre paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie original.

Mar	1 m	3 m	5 m
<b>Pacífico Norte</b>	703.0 (1.1)	1,559.5 (2.5)	2,154.1 (3.4)
<b>Golfo de California</b>	1,919.9 (1.1)	4,130.1 (2.3)	6,186.8 (3.5)
<b>Pacífico Tropical</b>	221.1 (1.3)	454.6 (2.8)	693.4 (4.2)
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	4,005.4 (6.5)	10,565.0 (17.0)	18,859.2 (30.4)

### 1.4.3 Variables oceanográficas

A partir de los mapas promedio de vorticidad relativa y la topografía superficial del mar (figuras 2, 3 y 4), se obtuvo el porcentaje de área potencialmente productiva en el Pacífico Norte, Pacífico Tropical y Golfo de México y Mar Caribe. En este análisis no se incluyó el Golfo de California debido a la resolución espacial de la información utilizada.

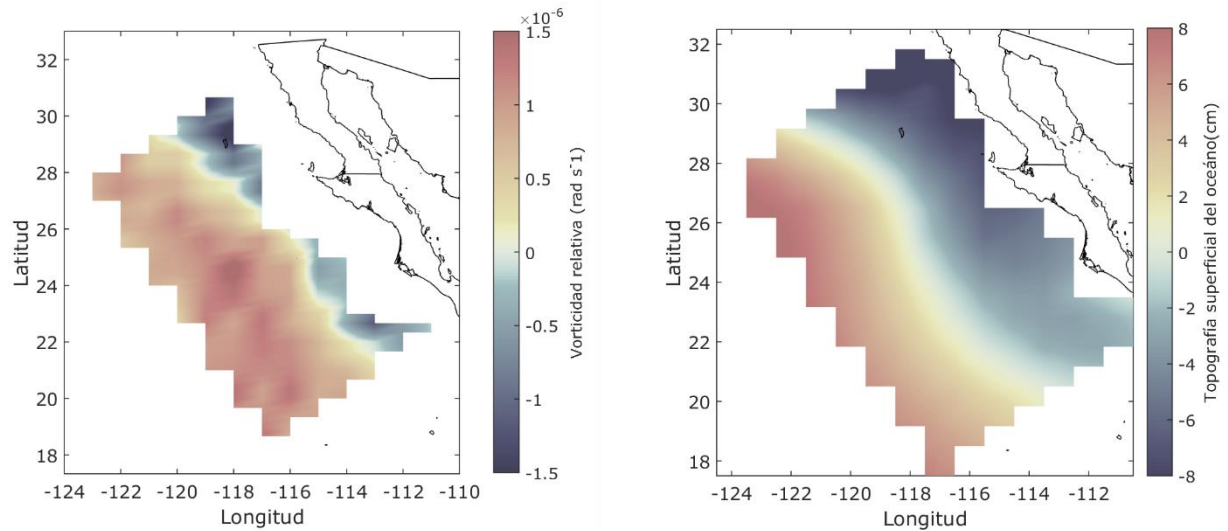


Figura 1-2. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Pacífico Norte (der.).

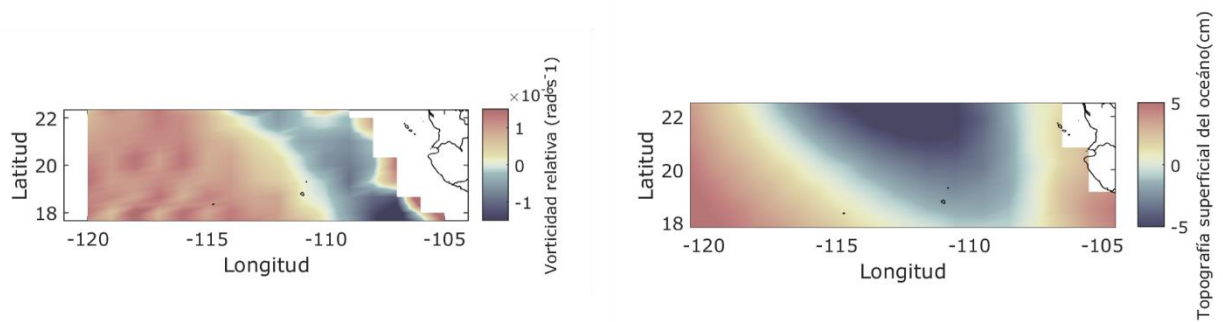


Figura 1-3. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Pacífico Tropical (der.).

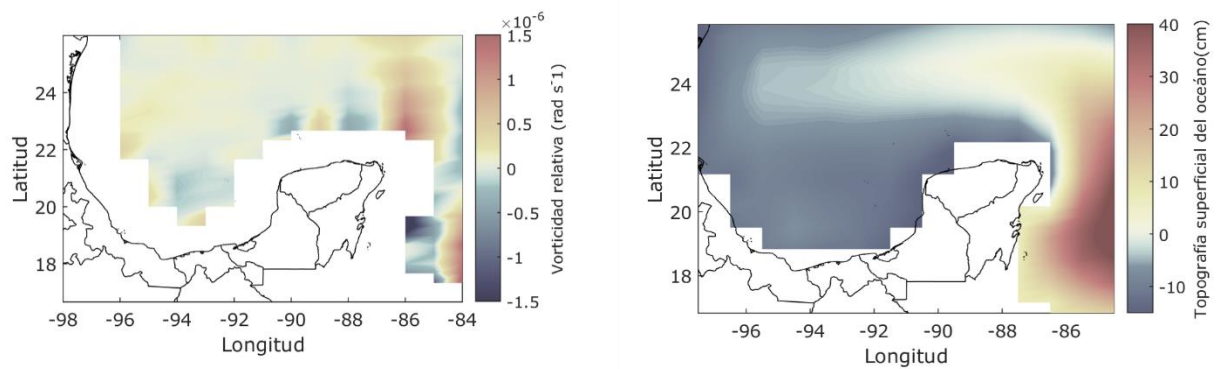


Figura 1-4. Mapa de la vorticidad relativa promedio (izq.) y la topografía superficial del mar en el Mar Caribe y Golfo de México (der.).

En los mapas de la izquierda de las figuras 2, 3 y 4, se muestra en tonos rosados los valores positivos de la vorticidad relativa, los cuales están relacionados con giros en contra de las manecillas del reloj o giros ciclónicos en el Hemisferio Norte. En tonos azules se muestran los valores negativos de la vorticidad relativa asociada a giros a favor de las manecillas del reloj, también conocidos con giros anticiclónicos en el Hemisferio Norte. En los mapas a la derecha de las mismas figuras, se muestra en tonos rosados las anomalías positivas de la topografía superficial del mar, asociadas a domos en la superficie del océano, mientras que los tonos azules representan las anomalías negativas, asociadas a valles o hundimientos en la superficie del océano. En combinación, la vorticidad relativa y la topografía de la superficie del océano nos sirven como indicadores de escala sinóptica de regiones potencialmente productivas (Tabla 1-5).

Tabla 1-5. Porcentaje de áreas potencialmente productivas en función del promedio de la vorticidad relativa y la topografía superficial del océano en los cuatro mares.

Mar	Proporción (%)
<b>Pacífico Norte</b>	15.49
<b>Pacífico Tropical</b>	28.22
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	26.09

En la Tabla 1-5 podemos observar la proporción de áreas potencialmente productivas, con respecto al área del dominio que representa cada mar. De la información obtenida a partir de la vorticidad relativa y la topografía superficial del mar, se encontró que el mar que cuenta con mayor proporción de área productiva es el dominio que contiene al Golfo de México y Mar Caribe, seguido de Pacífico Tropical y el Pacífico Norte. Es importante resaltar que el análisis

obtenido en este trabajo es una primera aproximación que no considera procesos de menor escala a la sinóptica.

Siguiendo con la descripción de cada uno de los mares, se realizó también un análisis espacial de la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar en cada uno de los mares (figuras 5, 6, 7 y 8).

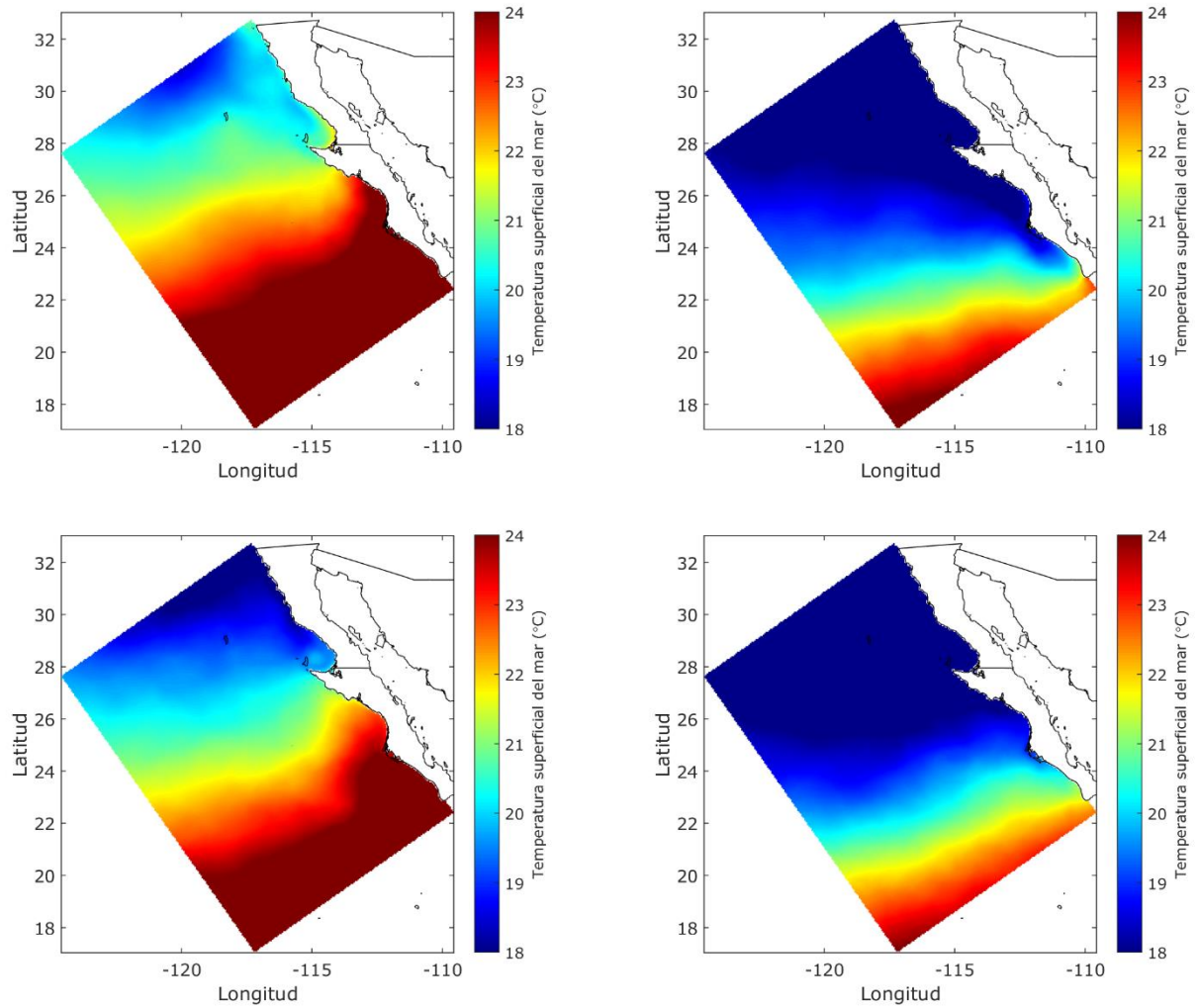


Figura 1-5. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).



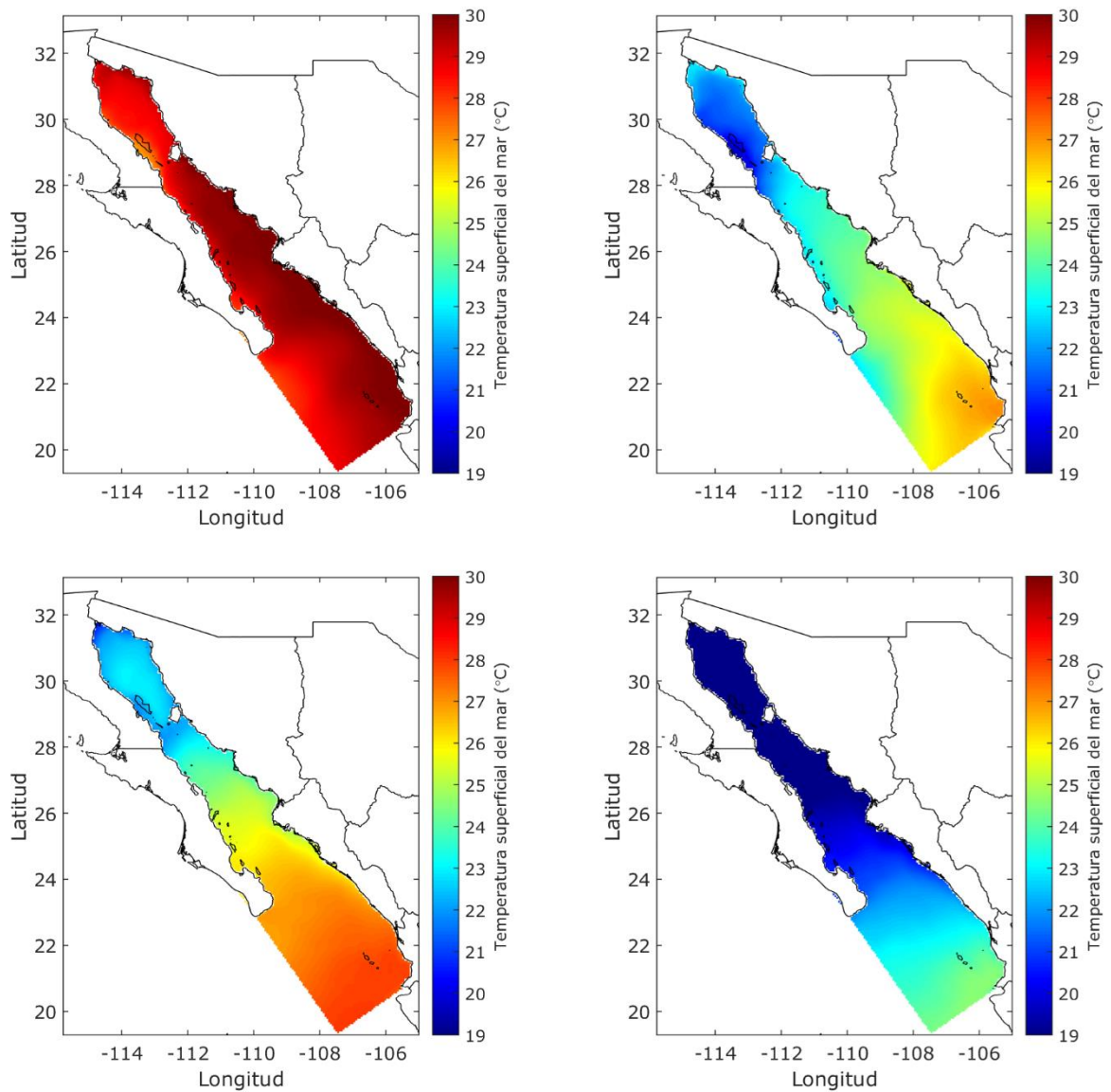


Figura 1-6. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).

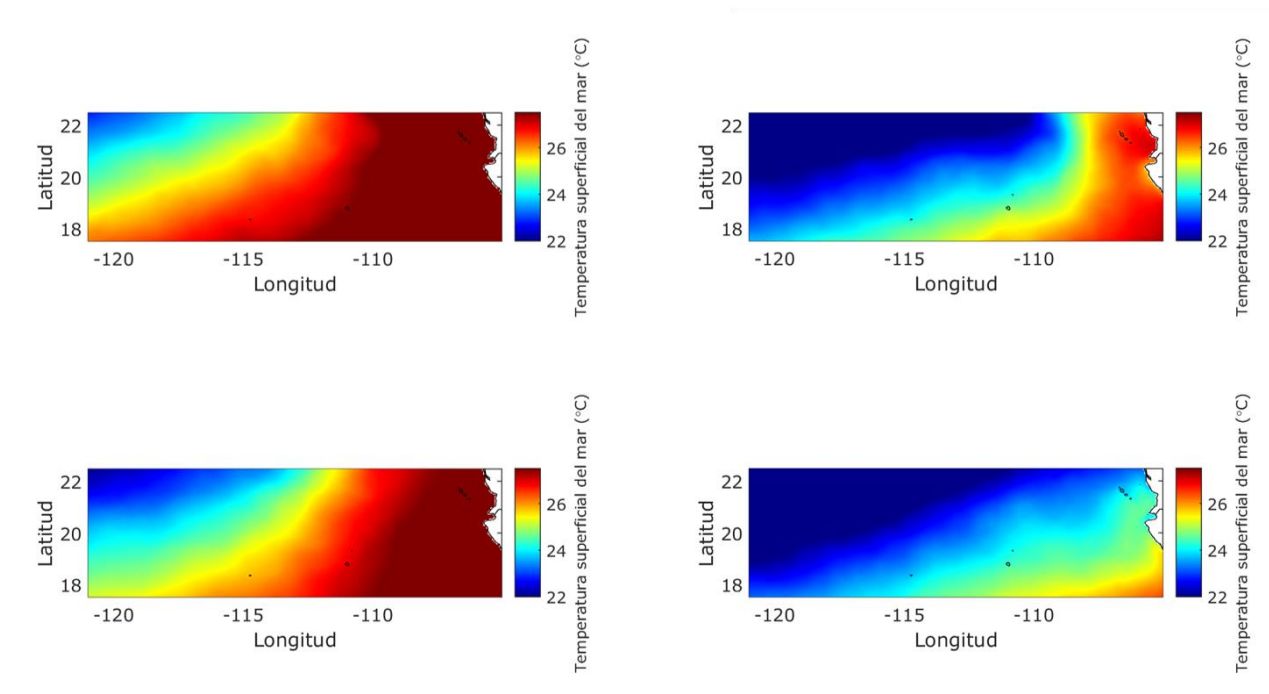


Figura 1-7. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Tropical durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).

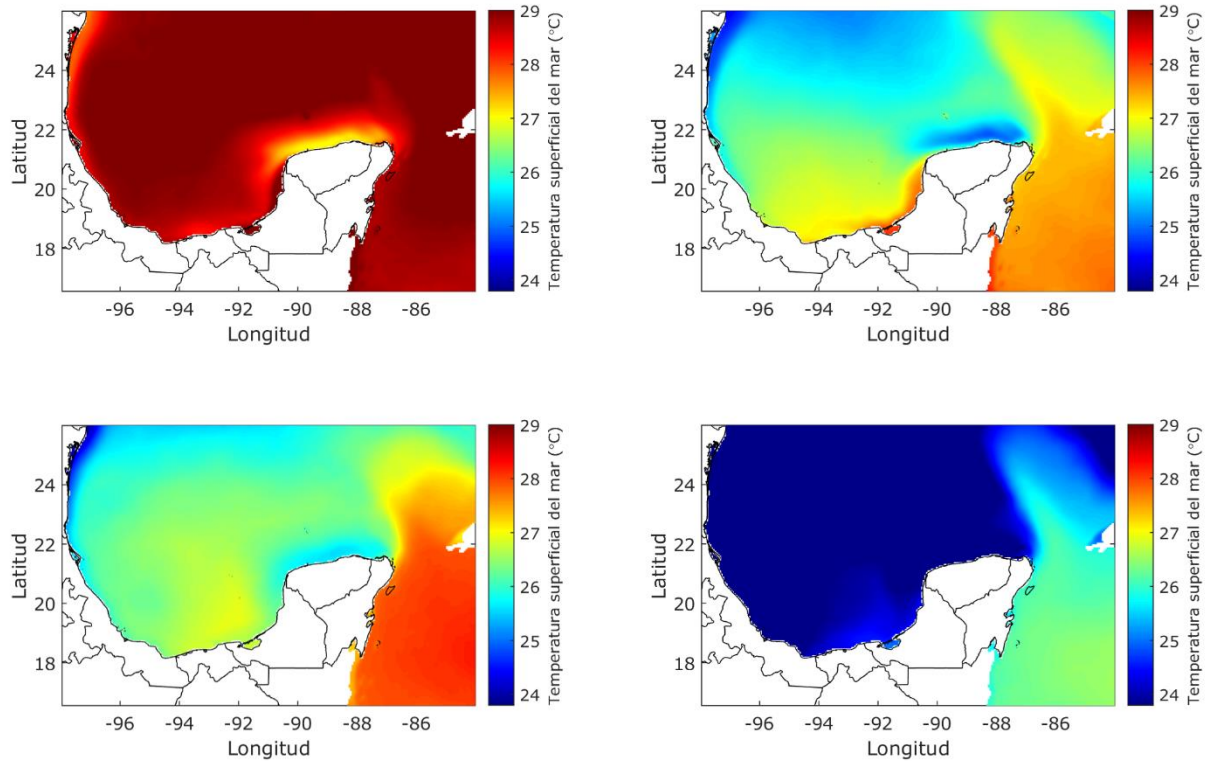


Figura 1-8. Variación estacional de la temperatura superficial del mar en el Golfo de México y Mar Caribe durante verano (sup. izq.), primavera (sup. der.), otoño (inf. izq.) e invierno (inf. der.).

El análisis espacial de la variabilidad estacional de escala sinóptica en el Pacífico Norte nos dice que existe un gradiente de Norte a Sur (Figura 1-5), con temperaturas mayores al Sur de la Península de Baja California, desde Punta Eugenia hasta Los Cabos, y temperaturas menores desde Punta Eugenia hasta Tijuana. En el Golfo de California, se observa también un patrón latitudinal con un gradiente Norte Sur con máximos en la boca del golfo y mínimos en el alto golfo (Figura 1-6). En cambio, el Pacífico Tropical presenta un patrón longitudinal con un gradiente hacia la costa, con temperaturas mayores en las zonas costeras y temperaturas menores hacia las regiones oceánicas. En el Golfo de México y Mar Caribe la distribución espacial de la variabilidad de la temperatura no muestra un patrón definido, pero sí existen diferencias entre el Golfo de México y Mar Caribe, siendo este último más cálido. Dentro del Golfo de México es interesante observar la diferencia de temperaturas entre el canal de Yucatán y la bahía de Campeche, siendo las temperaturas del primero menores a las de este último.

Como parte del análisis de la variabilidad temporal de la temperatura superficial del mar se obtuvieron los años típicos a partir de 14 años (2003-2016) de información (Figura 1-9).

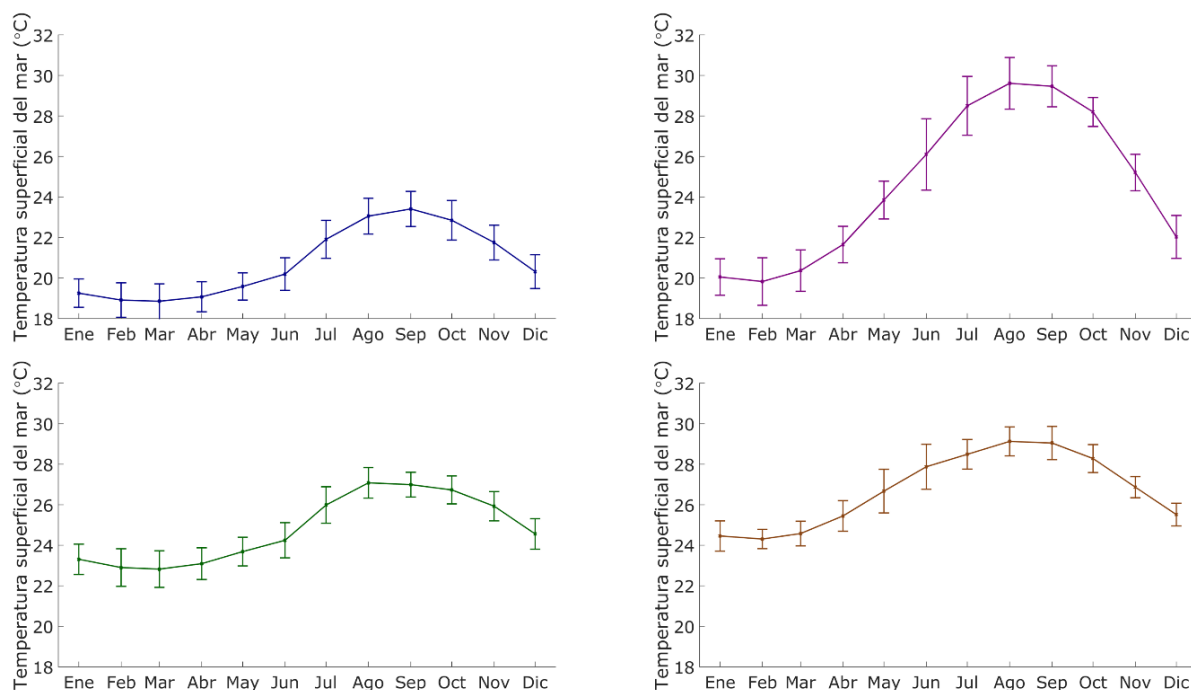


Figura 1-9. Año típico de la temperatura superficial del mar en Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.) y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.).

En la Figura 1-9 se puede observar que para los cuatro mares en cuestión, la temperatura superficial del mar muestra una variabilidad estacional bien marcada. Los máximos dentro de estos años típicos ocurren durante el verano, específicamente durante el mes de septiembre en el Pacífico Norte y agosto en el Golfo de California, Pacífico Tropical y Golfo de México y Mar Caribe. Los mínimos de temperatura se presentan en invierno-primavera, siendo febrero el mes más frío en todos los mares.

Tabla 1-6. Intervalos de confianza de la temperatura superficial del mar, con un nivel de confianza 95%, por temporada en cada mar.

Mar	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>Pacífico Norte</b>	19.19-19.8	18.92-19.42	21.26-22.18	22.32-23.02
<b>Golfo De California</b>	20.19-21.08	21.42-22.49	27.42-28.72	27-28.25
<b>Pacífico Tropical</b>	23.25-23.92	22.93-23.47	25.32-26.22	26.3-26.8
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	24.51-25.01	25.19-25.94	28.19-28.8	27.71-28.42

La Tabla 1-6 resume con intervalos de confianza la variabilidad estacional de todos los mares. En esta tabla se puede observar que, para todas las estaciones, el mar que presenta la mayor variabilidad en la temperatura superficial del mar es el Golfo de California.

#### **1.4.4 Variables atmosféricas**

En la Figura 1-10 se muestran los años típicos de la temperatura ambiental (°C) con barras de desviación estándar, para cada mar. Se puede ver un comportamiento similar a lo largo del año en el Pacífico Norte, Golfo de California y el Pacífico Tropical, con los valores máximos en agosto o septiembre y los valores mínimos a principios del año, de enero a marzo. En el Pacífico Norte la temperatura ambiental se encuentra entre valores promedio de 16.5 y 22.2 °C, en el Golfo de California se encuentran entre 17.9 y 29.4 °C y en el Pacífico Tropical entre 20.9 y 25.9 °C. En el Mar Caribe y Golfo de México, el año típico de esta variable difiere claramente al de los demás mares, con valores promedio entre de 17.8 y 21 °C. Además, cuenta con los valores de desviación estándar más altos durante cada mes del año. Sin embargo, el valor máximo de la temperatura ambiental promedio también se presenta en agosto, así como en los demás mares.

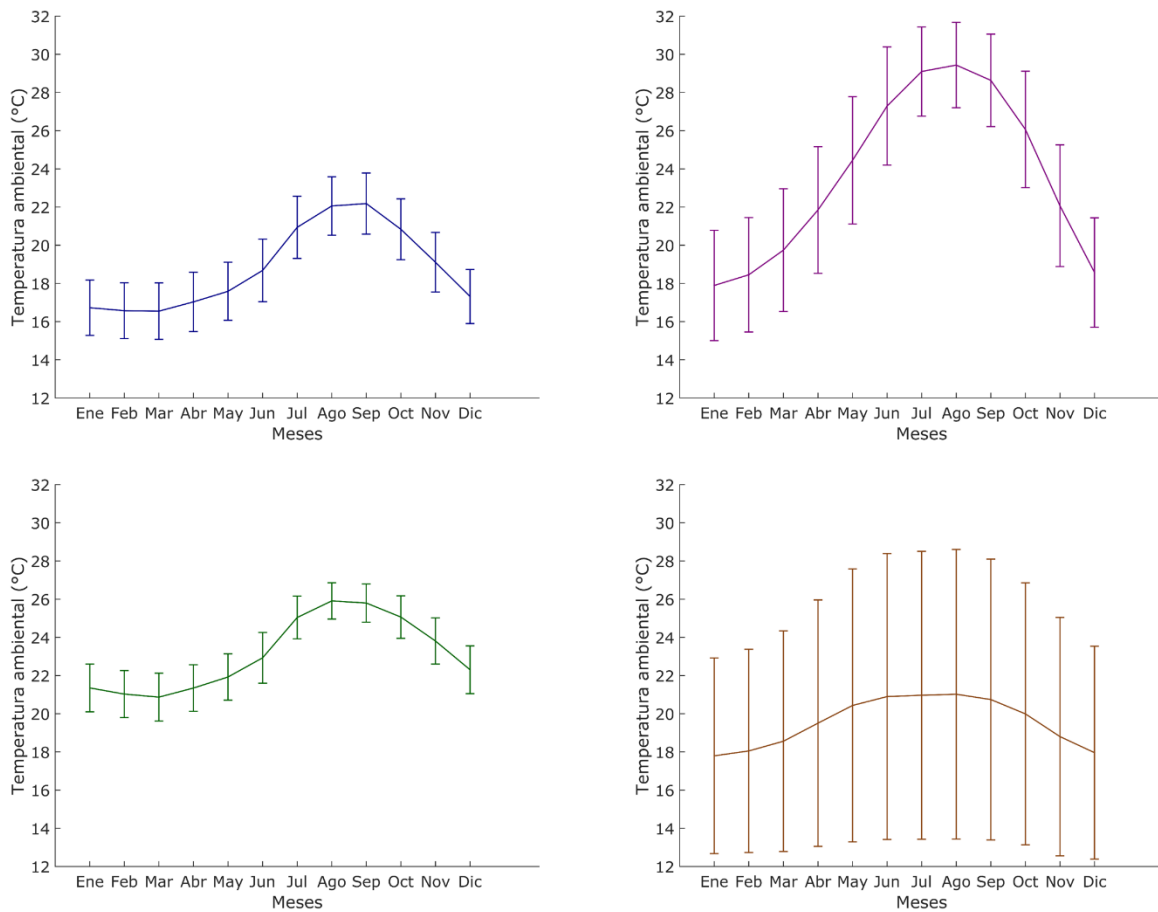


Figura 1-10. Años típicos de la temperatura ambiental (°C), con barras de desviación estándar, según el mar: Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.), y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.).

En la Tabla 1-7 se muestran los intervalos de confianza de la temperatura ambiental estacional (°C), con un nivel de confianza de 95%, para cada mar. Se puede ver que las temperaturas más altas se presentan en el Golfo de California durante el verano y otoño, seguido del Pacífico Tropical durante las mismas temporadas, el Mar Caribe y Golfo de México durante el verano y finalmente el Pacífico Norte durante el otoño. Este último mar también cuenta con las temperaturas más bajas, durante el invierno.

Tabla 1-7. Intervalos de confianza de la temperatura ambiental estacional (°C), con un nivel de confianza 95%, para cada mar.

Mar	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>Pacífico Norte</b>	16.85-16.91	17.03-17.08	20.54-20.62	20.67-20.75
<b>Golfo De California</b>	18.25-18.36	21.94-22.09	28.57-28.68	25.52-25.67
<b>Pacífico Tropical</b>	21.55-21.6	21.36-21.4	24.61-24.68	24.87-24.92
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	17.83-18.03	19.38-19.62	20.82-21.1	19.72-19.98

En la Figura 1-11 se muestran los años típicos de la precipitación mensual (mm), con barras de desviación estándar, para cada mar. En ellas se puede observar que el Mar Caribe y Golfo de México cuentan con la mayor cantidad de precipitación mensual, con promedios entre 7.3 y 49.4 mm, seguido del Pacífico Tropical con promedios entre 0.3 y 21.6 mm, y el Golfo de California con promedios entre 0.2 y 14.9 mm. En estos mares los promedios máximos se presentan en el mes de septiembre, a diferencia del Pacífico Norte donde el promedio máximo se presenta en febrero. Además, este último mar cuenta con la menor cantidad de precipitación mensual, con promedios entre 0.5 y 3.6 mm.

En la Tabla 1-8 se presentan los intervalos de confianza de la precipitación mensual estacional (mm), con un nivel de confianza de 95%, para cada mar. En ella se puede ver que el Mar Caribe y Golfo de México cuentan con la mayor cantidad de precipitación durante cada temporada del año, seguido del Pacífico Tropical y el Golfo de California. En estos mares la mayor cantidad de precipitación se presenta durante el otoño, mientras que en el Pacífico Norte esto sucede durante en invierno.

Tabla 1-8. Intervalos de confianza de la precipitación mensual (mm), con un nivel de confianza 95%, para cada mar.

Mar	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>Pacífico Norte</b>	2.89-4.24	0.87-1.5	1.06-1.48	1.85-2.68
<b>Golfo De California</b>	2.58-4.28	0.38-0.82	5.07-7.45	7.16-10.02
<b>Pacífico Tropical</b>	2.27-3.94	0.31-0.6	9.49-12.51	10.45-14.3
<b>Mar Caribe y Golfo de México</b>	11.71-13.94	8.85-11.35	31.08-34.96	33.07-39.49

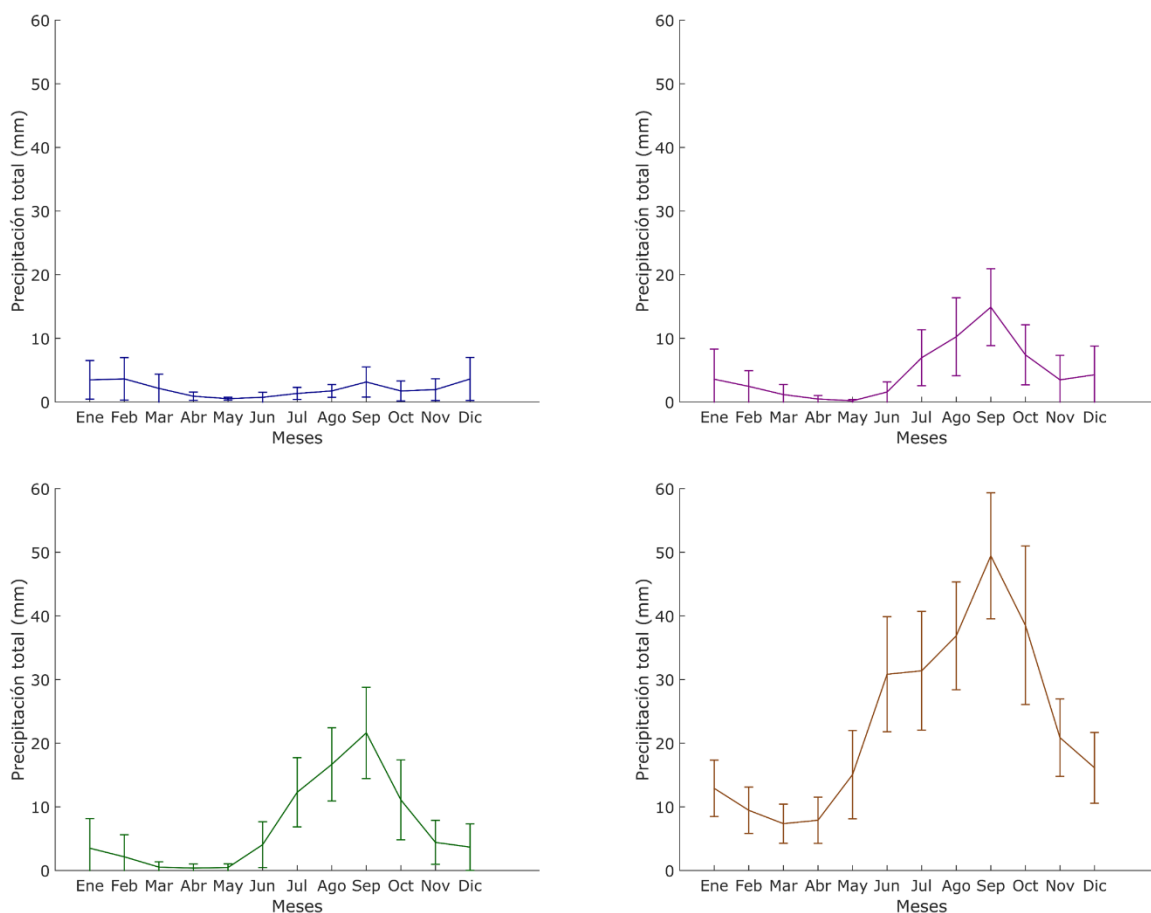


Figura 1-11. Años típicos de la precipitación mensual (mm), con barras de desviación estándar, según el mar: Pacífico Norte (sup. izq.), Golfo de California (sup. der.), Pacífico Tropical (inf. izq.), y Golfo de México y Mar Caribe (inf. der.).

## 1.5 Discusión

### 1.5.1 Elevación del nivel del mar

Las tendencias regionales de elevación del nivel del mar pueden diferir significativamente del promedio global de la tasa de elevación (Marra, J.J., 2012). Aunado a esto, los impactos sobre el territorio insular por la elevación del nivel del mar dependen de la geomorfología de cada isla. Dado que la variabilidad geomorfológica es de escala regional, tiene sentido evaluar los impactos agrupando los elementos insulares según el mar en el que se encuentren. Por lo anterior, en este documento se analizaron de forma conjunta los impactos de la elevación del nivel del mar sobre las islas mexicanas según las características geomorfológicas, oceanográficas y atmosféricas de cuatro regiones: Océano Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Tropical, y Mar Caribe y Golfo de México.



Los métodos y algoritmos utilizados en el presente trabajo para la modelación de los impactos sobre el territorio insular mexicano por inundación asociada al cambio climático representan una mejora sobre aquellos utilizados por Aguirre Muñoz, et al. (2016). El desarrollo de mejores algoritmos y la optimización del código de MATLAB utilizados en su implementación permitió que el presente análisis incluyera todos los elementos insulares con superficie mayor que una hectárea.

## 1.5.2 Geomorfología marina

La alta variabilidad entre profundidad y topografía influye fuertemente la hidrografía del océano, incluyendo la distribución de las corrientes, salinidad, pH y concentración de oxígeno, así como también la penetración de la luz y la fotosíntesis. El terreno y la topografía necesitan considerarse cuando se analizan los cambios en otros procesos físicos y biológicos asociados al cambio climático (Laffoley et al., 2016). El tipo de relieve marino, así como la batimetría, no serían impactados por el cambio climático. Sin embargo, el cambio climático combinado con la característica geomorfológica adyacente a cada isla puede detonar una extensiva reorganización de los suelos marinos cercanos a la costa, resultando en una rápida pérdida de biodiversidad. En este caso, los mares cuya característica geomorfológica sea de Plataforma Continental serán los más afectados, por el hecho de que es el relieve marino más superficial, con una profundidad máxima de 200 metros.

La elevación del nivel del mar produce los menores impactos por pérdida de superficie en las islas pertenecientes al Pacífico Norte. A pesar de que el 66% de las islas de esta región están asociadas a una geomorfología de tipo Plataforma Continental (la característica geomorfológica más cercana a la costa), la pendiente promedio de estas islas es alta, lo cual amortigua los impactos por la elevación del nivel del mar.

La geomorfología marina adyacente al Golfo de California es predominantemente de Talud Continental (75%), teniendo sólo el 17% de Plataforma Continental. En términos relativos, la pérdida de superficie en esta región es similar a la del Pacífico Norte (3.5%, para el escenario de 5 metros de elevación; Tabla 1-4).

La geomorfología adyacente al Pacífico Tropical es predominantemente de Cresta (66%) siendo el resto de Planicie Abisal. La región adyacente a estas islas sería la menos afectada en relación con la modificación del suelo marino. En cuanto a la pérdida de superficie insular, en términos absolutos representa la menor cantidad, lo cual es congruente con el hecho de que las islas en esta región presentan la mayor pendiente (Tabla 1-2). Sin embargo, el porcentaje de pérdida relativa a la poca superficie disponible es el segundo mayor.

El Mar Caribe y Golfo de México tiene el 60% de su geomorfología asociada a Plataforma Continental y el resto a Talud Continental, que corresponden a los dos tipos de relieves marinos más someros. Respecto a la pérdida de superficie por incremento en el nivel del mar, esta región

es la más impactada ya que para el escenario de elevación de 5 metros presenta una pérdida acumulada de 18,859.2 ha, lo que representa un 30.4% del total de la superficie insular en la región. Lo anterior concuerda con el hecho de que las islas en esta región presentan la menor pendiente promedio (Tabla 1-2).

### 1.5.3 Variables oceanográficas

La temperatura y topografía superficial del mar son excelentes indicadores del estado del sistema climático. Esto debido a que están directamente relacionados con el intercambio de energía que existe entre los océanos y la atmósfera (Yang et al, 2013). De la misma manera, ambas variables son de primordial interés en los pronósticos del clima, mismos que nos conducen a una mejor toma de decisiones.

Desde 1970 los cambios en el balance de calor entre los océanos y la atmósfera han contribuido al incremento y decremento de la temperatura superficial del mar. En particular, se pronostica que para el año 2100 la temperatura global de los océanos incremente de 1-4°C, lo que lleva a un incremento en la intensidad y frecuencia de tormentas tropicales, mayor intensidad en los trópicos y todas las consecuencias asociadas a estos procesos, incluyendo una alta evaporación en los océanos, una mayor cantidad de calor latente y una humedad específica (Laffoley y Baxter, 2016).

De manera regional, para los océanos mexicanos el cambio en el balance energético es también una amenaza en contra de la alta biodiversidad que en ellos se alberga. En el caso particular de los dominios descritos en este trabajo, el incremento en la temperatura superficial del mar podría impactar de diferentes maneras los mares mexicanos. En mares como el Pacífico Norte, donde las temperaturas son relativamente más bajas y donde las pesquerías son de gran importancia, el aumento de la temperatura superficial representaría un gran impacto. En el caso de mares como el Golfo de California donde los cambios estacionales de la temperatura son los mayores y donde uno de los principales motores es la circulación termohalina, el aumento en la temperatura superficial del mar podría llegar a afectar directamente la dinámica del océano y cambiar por completo la dirección de las corrientes. El Pacífico Tropical, al ser un mar de transición de corrientes marinas, está constantemente sujeto a cambios. Dicha característica, hace que este sistema cuente con una alta resiliencia. Sin embargo, un aumento en la temperatura superficial del mar en esta región podría llevar a que las condiciones hidrográficas de dicho mar se tornen más uniformes; lo que finalmente conlleva a un fuerte impacto en la alta biodiversidad de especies que en él habitan. En la gran área estudiada como Mar Caribe y Golfo de México, dominada en gran parte por las interacciones océano-atmósfera, un aumento en la temperatura superficial del mar podría llevar a cambios en la circulación de las corrientes y la intensidad de los vientos, lo que conllevaría a un cambio total en la dinámica interna del Golfo de México. En el caso del Mar Caribe, los impactos causados por un incremento en la temperatura superficial del mar podrían llevar a desvanecer la poca entrada de nutrientes, que afectaría directamente a

la baja productividad que en él existe. Por otra parte, un aumento en la temperatura impactaría directamente sistemas vulnerables como los sistemas coralinos existentes en este mar y que son de gran relevancia a nivel global.

#### **1.5.4 Variables atmosféricas**

La zona costera del Pacífico Norte cuenta con un clima templado. El dominio estudiado para este mar cuenta con temperaturas mensuales promedio entre 16.5 y 22.2 °C y los promedios mensuales de precipitación más bajos en comparación con los otros tres dominios de interés. Ante el efecto del cambio climático, la temperatura ambiental promedio podría incrementar en sus valores extremos. Al suceder esto, se observarían veranos más cálidos, lo cual ocasionaría mayor evaporación y por lo tanto mayor sequía en esta temporada y los inviernos serán más fríos, generando mayor condensación de vapor de agua y por lo tanto eventos de precipitación más intensos.

Después de analizar la temperatura ambiental promedio y la precipitación mensual promedio en el Golfo de California, se entiende que su clima es de tipo seco estepario. Por lo tanto, un aumento de temperatura ambiental provocaría mayor evaporación a lo largo del golfo y temporadas más largas de sequía. Sin embargo, la temporada de lluvia podría presentarse con mayor intensidad.

El Pacífico Tropical actualmente cuenta con temperaturas mensuales promedio superior a los 20 °C, pero con un valor máximo de aproximadamente 26 °C, lo cual es un rango bajo en comparación a los demás mares. Por lo tanto, el cambio climático podría ocasionar un aumento en los valores promedio a lo largo del año, aunque manteniendo un rango similar. En cuanto a la precipitación, la interacción océano-atmósfera genera un mayor flujo de vapor de agua lo que conlleva a un incremento en la precipitación. Los eventos de lluvia que se presentan en el Pacífico Tropical durante el verano podrían comenzar a presentarse fuera de temporada. Además, este mar también es altamente afectado por el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur). Actualmente, la cantidad de huracanes en este mar aumenta durante años ENOS. Si la intensidad de los próximos eventos ENOS continúan incrementando, se podría esperar también que más huracanes y de intensidad más alta lleguen a afectar tanto a las islas como las zonas costeras de este mar.

El Mar Caribe y Golfo de México es una región altamente afectada por eventos de tormentas tropicales y huracanes. Si por efectos del cambio climático incrementa la temperatura ambiental, aumentará la cantidad de vapor de agua. Además, con un aumento en la temperatura superficial del mar, los huracanes podrían ser más intensos, lo cual aumentaría la cantidad de precipitación en eventos de tormenta.

## 1.6 Literatura citada

- AGUIRRE MUÑOZ, A., MÉNDEZ SÁNCHEZ, F., ROJAS MAYORAL, E., CÁRDENAS TAPIA, A. G., MUNGUÍA CAJIGAS, D. Y., LORA CABRERA, Y., CASTRO GIRÓN, A. 2016. Impacto de la elevación del nivel del mar en la superficie y línea de costa de 35 islas pobladas y prioritarias de México. Informe Final de la Consultoría “Evaluación de impactos del cambio climático (únicamente por elevación del nivel del mar) sobre línea costera, ecosistemas y especies, así como población en las islas de México”; Producto 2 de 4. Proyecto 00086487 Plataforma de colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México 2013-2016. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Ensenada, Baja California, México. 14 pp. + 2 Anexos
- AGUIRRE-GOMEZ, R. 2002. Los mares mexicanos a través de la percepción remota III. Plaza y Valdéz, S.A de C.V., 78-80 pp.
- BALVANERA, P., A. ISLAS, E. AGUIRRE Y S. QUIJAS. 2000. Las selvas secas. *Ciencias*, 57(enero-marzo): 18-24 pp.
- BELLARD, C., LECLERC, C. & COURCHAMP, F. 2014. Impact of sea level rise on the 10 insular biodiversity hotspots. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 203-212.
- CHIN, T.M. 2017. MUR: Multi-scale-Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature. Obtenido de: <https://mur.jpl.nasa.gov/InformationText.php>
- CONABIO. 2002. Geomorfología Marina. Accesado 19 enero 2016 de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONANP. 2004. Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biósfera Archipiélago de Revillagigedo. Primera edición. Jaras Impresores S.A. de C.V. México D.F. 220 p.
- COURCHAMP, F., HOFFMANN, B. D., RUSSELL, J. C., LECLERC, C. & BELLARD, C. 2014. Climate change, sea-level rise, and conservation: keeping island biodiversity afloat. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 127-130.
- DURAZO, R. 2015. Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Vol. 120(2), 1173–1196 pp.
- ESPINOSA, H. 2004. El Pacífico mexicano. *Ciencias*, 76(octubre-diciembre): 14-21 pp. <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/77-revistas/revista-ciencias-76/621-el-pacifico-mexicano.html>
- FAKHRUDDIN, S. H. M., BABEL, M. S. & KAWASAKI, A. 2015. Assessing the vulnerability of infrastructure to climate change on the Islands of Samoa. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1343-1356.
- GARCÍA-AMARO DE MIRANDA, E. 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones geográficas*, (50), 67-76. Recuperado en 26 de enero de 2017, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112003000100009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100009&lng=es&tlng=es)
- GAXIOLA-CASTRO, G. Y DURAZO, R. 2010. Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997–2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California”. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN, pp. 978–607.

GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS (GEBCO). 2014. Gridded bathymetric data. Accesado 19 enero 2016 de [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)

GONZÁLEZ-ABRAHAM, C.E., P.P. GARCILLÁN, E. EZCURRA Y EL GRUPO DE TRABAJO DE ECORREGIONES. 2010. Ecorregiones de la Península de Baja California: una síntesis. *Bol.Soc.Bot.Méx.* 87: 69-82 pp.

GREENPEACE. 2006. Red de Reservas Marinas del Golfo de California: una compilación de los esfuerzos de conservación. (Disponible en <http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2006/11/red-de-reservas-marinas-del-go.pdf>)

HARTER, D. E. V., SEVERIN, D. H. I., SEO, B., STEINBAUER, M. J., GILLESPIE, R., TRIANTIS, K. A., FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.-M. & BEIERKUHNLEIN, C. 2015. Impacts of global climate change on the floras of oceanic islands – Projections, implications and current knowledge. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17, 160-183.

LAFFOLEY, D. & BAXTER, J. M. (editors). 2016. Explaining ocean warming: Causes, scale, effects and consequences. Full report. Gland, Switzerland: IUCN. 456 pp.

LÓPEZ-MARISCAL, J.M., CANDELA-PÉREZ, J. Y ARGOTE-ESPINOZA, M.L. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophysical Research Letters*. 33: 1-5.

MARRA, J. J., MERRIFIELD, M. A., & SWEET, W. V. 2012. Sea Level and Coastal Inundation on Pacific Islands. In V. W. Keener, J. J. Marra, M. L. Finucane, D. Spooner, & M. H. Smith (Eds.), *Climate Change and Pacific Islands: Indicators and Impacts. Report for the 2012 Pacific Islands Regional Climate Assessment (PIRCA)*. Washington, DC: Island Press.

MONREAL GÓMEZ, M.A., D.A. SALAS DE LEÓN Y A. GRACIA GASCA. 2004. Golfo de México, circulación y productividad. *Ciencias*, 76(octubre-diciembre): 24-33 pp.

NICHOLLS, R. J. & CAZENAVE, A. 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328, 1517-1520.

NICHOLLS, R. J. 2015. Adapting to Sea Level Rise. *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*.

NICHOLLS, R. J., WONG, P. P., BURKET, V. R., CODIGNOTTO, J. O., HAY, J. E., MCLEAN, R. F., RAGOONADEN, S. & WOODROFFE, C. D. 2007. Coastal systems and low-lying areas. In: PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J. & HANSON, C. E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

NURSE, L., MCLEAN, R., AGARD, J., BRIGUGLIO, L. P., DUVAT-MAGNAN, V., PELESIKOTI, N., TOMPKINS, E. & WEBB, A. 2014. Small Islands. In: BARROS, V. R., FIELD, C. B., DOKKEN, D. J., MASTRANDREA, M. D., MACH, K. J., BILIR, T. E., CHATTERJEE, M., EBI, K. L., ESTRADA, Y. O., GENOVA, R. C., GIRMA, B., KISSEL, E. S., LEVY, A. N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P. R. & WHITE, L. L. (eds.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment*

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

PEEL, M.C., B.L. FINLAYSON Y T.A. MCMAHON. 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1633–1644 pp.

PINEDA V. (2004). Morfología del fondo oceánico y características de la línea de costa. En C. Werlinger. (Ed.), *Biología y Oceanografía: Conceptos y Procesos Tomo I.* (pp.135-138). Chile: Consejo Nacional del Libro y la Lectura.

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICA Y NATURALES. (2010). RACEFN Glosario de Geología. Recuperado de [http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm](http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm).

REYNOLDS, M. H., COURTOT, K. N., BERKOWITZ, P., STORLAZZI, C. D., MOORE, J. & FLINT, E. 2015. Will the Effects of Sea-Level Rise Create Ecological Traps for Pacific Island Seabirds? *PLoS ONE*, 10, e0136773.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 2008. Shuttle Radar Topography Mission, Accesado 03 marzo 2016 de <http://srtm.usgs.gov/mission.php>

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 2016. EarthExplorer, Accesado 03 marzo 2016 de <http://earthexplorer.usgs.gov>

WETZEL, F. T., BEISSMANN, H., PENN, D. J. & JETZ, W. 2013. Vulnerability of terrestrial island vertebrates to projected sea-level rise. *Global Change Biology*, 19, 2058-2070.

WETZEL, F. T., KISSLING, W. D., BEISSMANN, H. & PENN, D. J. 2012. Future climate change driven sea-level rise: secondary consequences from human displacement for island biodiversity. *Global Change Biology*, 18, 2707-2719.

WILKINSON T., E. WIKEN, J. BEZAURY CREEL, T. HOURIGAN, T. AGARDY, H. HERRMANN, L. JANISHEVSKI, C. MADDEN, L. MORGAN Y M. PADILLA. 2009. Ecorregiones marinas de América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 200 pp.

YANG, J., P., GONG, FU, R., ZHANG, M., CHEN, J., LIANG, S., BING, X., SHI, J. Y DICKINSON, R. 2013. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature climate change*. 875-876 pp. doi: 10.1038/NCLIMATE1908

## 1.7 Glosario de características geomorfológicas

**Borderland:** corresponden a las zonas de transición entre los continentes y los fondos oceánicos profundos; representan el 20% del área total de los océanos. Existen dos formas principales, tipo Atlántico y tipo Pacífico (Pineda, 2004).

**Cañones:** son valles sinuosos de paredes abruptas que presentan ancho, profundidad y longitud variables. Cortan la plataforma continental y al talud continental y constituyen las vías de transporte de sedimentos hacia las cuencas oceánicas (Pineda, 2004).

**Crestas:** alineación montañosa submarina. (Real academia de ciencias exactas, física y naturales, 2010).

**Dorsal:** corresponde a amplias cordilleras sumergidas que están constituidas por apilamiento de rocas volcánicas basálticas. Son zonas de fallas con topografía irregular, marcada por depresiones, pendientes pronunciadas y montes submarinos (Pineda, 2004).

**Pie del continente:** se forma en los márgenes pasivos y se forma por la acumulación de grandes cantidades de sedimento que son desplazados pendiente abajo desde la plataforma continental hacia los fondos oceánicos (Pineda, 2004).

**Planicie abisal:** corresponden a zonas planas del fondo oceánico, casi horizontales y que se encuentran a profundidades de 2000 a 6000 metros. La topografía plana se debe a grandes acumulaciones de sedimentos que han suavizado el fondo oceánico normalmente irregular (Pineda, 2004).

**Plataforma continental:** corresponde a la zona sumergida de suave pendiente del margen continental, constituida por corteza continental y corresponde a una extensión inundada de los continentes. Se extiende desde la línea de costa hasta una profundidad media de 130 metros, en donde se inicia el talud continental (Pineda, 2004).

**Talud continental:** Delimita el borde de la plataforma continental en dirección al mar. Presenta una pendiente abrupta y desciende desde el borde de la plataforma continental hasta el piso oceánico, alcanzando profundidades de entre 1500 a 3500 metros. El talud continental marca el límite entre la corteza continental y la corteza oceánica (Pineda, 2004).

**Trincheras:** corresponden a largas y estrechas depresiones del fondo oceánico que se ubican bordenado los márgenes continentales de tipo Pacífico y constituyen las partes más profundas del fondo oceánico (Pineda, 2004).



## 2 Evaluación de impactos del cambio climático sobre los hábitats asociados a las islas de México



Imagen 2-1

### 2.1 Introducción

#### 2.1.1 Efectos del cambio climático sobre hábitats de pinnípedos, aves marinas y pesquerías

##### 2.1.1.1 Impactos sobre playas arenosas

Las playas se definen como depósitos no consolidados de arena y grava a lo largo del litoral. La zona costera es un ambiente dinámico, siendo que el perfil de playa, en un momento dado, representa el equilibrio entre el transporte de sedimento hacia el mar (por erosión), hacia la tierra (por acreción o sedimentación), y a lo largo de las costas (por corrientes de deriva). En México, los tipos de playas y sus dunas no se encuentran distribuidos de manera homogénea. En el Atlántico predominan las costas acumulativas, representadas por playas bajas y arenosas donde abunda la sedimentación. Las costas del Golfo de México se encuentran sujetas a movimientos tectónicos, por lo que las pendientes hacia la costa y las de la plataforma continental son suaves (Moreno-Casasola, 2004).

Las evidencias de cambios y modificaciones ambientales de la costa se presentan principalmente en costas de playas bajas arenosas, entre ellas las llanuras costeras y planicies deltaicas (Ortiz y Benítez, 1996). Ejemplos de estos cambios son la erosión de playas, en bocas estuarinas, barras



e islas de barrera, lo cual se manifiesta mediante el retroceso de la línea de costa hacia el interior del continente. Algunas consecuencias de este retroceso son la erosión, inundación y salinización de tierras, de aguas superficiales y del manto freático cercano. Esto a su vez influye en las características estructurales y distribución espacial de los ecosistemas asociados, además de alterar los posibles usos de suelo, afectando de manera directa a la economía regional (Ortíz y Méndez, 2004).

Los impactos más severos sobre la línea de costa han sido en la modificación del transporte sedimentario, ya que esto altera de manera permanente la dinámica costera que le permite a la playa erosionarse y crecer de manera cíclica. Por otro lado, las playas y dunas también reciben, de manera indirecta, los impactos de las actividades terrestres. Actualmente, aproximadamente el 70% de las costas del mundo se encuentran en proceso de erosión. Una gran cantidad de actividades humanas han incrementado este fenómeno, como la construcción de presas que limitan el aporte de sedimento proveniente de tierra adentro, u obras costeras que interrumpen el movimiento sedimentario entre celdas costeras (Moreno-Casasola, 2004). Debido a esto, se considera que las playas y dunas de México se encuentran entre los ecosistemas más amenazados (Moreno-Casasola, 2004).

Por otro lado, las tormentas asociadas a huracanes (Golfo de México y Mar Caribe) y ciclones (Océano Pacífico y Golfo de California) son fenómenos naturales con efectos inmediatos y a corto plazo. Debido a la magnitud de un huracán, es común pensar que el único efecto de éste sobre la costa es la erosión. Sin embargo, durante huracanes como Gilberto y Vilma se vio que, aunque hubo una fuerte erosión en las playas de Cancún, en Akumal y Puerto Morelos hubo depositación de sedimento (Carranza-Edwards, 2010). Carranza Edwards y colaboradores (2004) observaron que los huracanes del Golfo de México y Mar Caribe han incrementado sus intensidades y sus trayectorias han sido más meridionales, al comparar los periodos de 1960 a 1980 y 1981 a 2000. A pesar de que estos fenómenos son de origen natural, se cree que el cambio climático ha sido responsable de las diferencias en magnitud y distribución de los huracanes (Carranza-Edwards, 2010).

México cuenta con 17 estados con frente litoral, pero Baja California y Baja California Sur son estados peculiares al tener costa tanto por el Pacífico como por el Golfo de California. Las diferentes características geológicas de la región permiten un alto nivel de biodiversidad. Las playas arenosas se distinguen por contar con alrededor de 93 especies de infauna, seis de las cuales representan el 70% de la abundancia total, mientras que los acantilados y zonas rocosas, bahías, ensenadas, playas, dunas y marismas son hábitats de gran importancia para una diversa cantidad de peces, moluscos y aves migratorias. Las islas del noroeste son esenciales para la reproducción de más de 30 especies de aves marinas del Pacífico oriental, dos especies de tortugas marinas y cuatro especies de pinnípedos. También son hogar de por lo menos 218 especies y subespecies endémicas de plantas y animales, que incluyen a 81 reptiles, 45 aves terrestres y 92 mamíferos. Desafortunadamente, muchas de estas especies actualmente se encuentran amenazadas o en peligro de extinción (Lara-Lara et al., 2008).

### **2.1.1.2 Posibles impactos sobre los pinnípedos a consecuencia de efectos sobre las playas arenosas**

Las tormentas invernales tienen la capacidad de ocasionar la mortalidad de pinnípedos, en especial crías y jóvenes. La fuerza de estas tormentas podría incrementar durante eventos de El Niño, más aún si la fuerza de estos mismos eventos aumenta por efectos del cambio climático, lo cual ocasionaría disturbios en la distribución espacial de los individuos en la playa, mayor abandono de crías y hasta el ahogamiento de animales jóvenes. Ejemplo de esto fue la mortalidad registrada de lobo fino de Guadalupe durante el evento de El Niño de 1992-93 (SEMARNAP, 2000).

### **2.1.1.3 Impactos sobre el ecosistema pelágico**

Las cadenas tróficas del ambiente pelágico superficial en los océanos dependen principalmente del fitoplancton, que a su vez depende de nutrientes esenciales, que se encuentran normalmente agotados en la superficie pero son abundantes en el océano profundo (Di Lorenzo, 2015). Se espera que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera produzca un aumento en la temperatura y, por lo tanto, un calentamiento de la capa superficial del océano. Esto conduce a una mayor estratificación de la columna de agua al aumentar el contraste de densidades entre la superficie y profundidades mayores (Behrenfeld et al., 2006), reduciendo la mezcla vertical en algunas regiones y, en consecuencia, afectando la disponibilidad de nutrientes para los organismos fotosintéticos en la zona eufótica (Capotondi et al., 2012; Hoegh-Guldberg y Bruno, 2010). Estudios basados en Modelos Climáticos Globales y en observaciones indican que a nivel global existe un aumento en la profundidad de la termoclina costera, y que ha ocurrido un aumento de alrededor de 4% en la estratificación, lo que significa que se requiere mayor energía para mover aguas profundas hacia la superficie (Capotondi et al., 2012; Lluch-Cota et al., 2014; Palacios et al., 2004).

En 1990, Bakun propuso la hipótesis de que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero provocaría una intensificación en los vientos favorables a las surgencias en los Sistemas de Corrientes de Frontera Oriental y, por lo tanto, una intensificación también de las surgencias.

Existe una gran incertidumbre sobre cuál es la respuesta de los ecosistemas modulados por surgencias a los efectos del cambio climático, pues los mecanismos son antagónicos: el aumento en la temperatura aumenta la estratificación, pero se proyecta una intensificación en los vientos que provocan las surgencias, aunque no se sabe si la intensificación de los vientos podrá contrarrestar los efectos del aumento en la estratificación de la capa de mezcla. Trabajos como el de Mendelssohn and Schwing (2002); Rykaczewski y Checkley (2008); Patti et al. (2010); Narayan et al., (2010); García-Reyes y Largier (2010); Seo et al., (2012); Iles et al., (2012); y Varela et al.,

(2015), muestran una intensificación de las surgencias en algunas regiones de la costa del Sistema de la Corriente de California (SCC), particularmente en las latitudes altas, mientras que algunos de estos trabajos obtienen un debilitamiento de las surgencias en la costa Sur de California y frente a la Península de Baja California.

En un escenario de surgencias moderadas se mantiene una red trófica productiva, en la que el fitoplancton sustenta a una comunidad próspera de zooplancton; las concentraciones crecientes de organismos planctónicos son transportadas fuera de la costa hacia el frente de surgencia, en donde las aguas más densas se hunden bajo las aguas superficiales. En estas circunstancias, los organismos planctónicos que son capaces de permanecer a cierta profundidad aumentan su concentración y atraen a peces pelágicos menores, que a su vez atraen a depredadores más grandes (Bakun et al., 2010). En un escenario de surgencias más intensas, la diferencia entre las tasas de reproducción del fitoplancton y del zooplancton podría sobrepasar la capacidad del zooplancton herbívoro, que normalmente controla el crecimiento del fitoplancton mediante el pastoreo. Cuando en el ecosistema se encuentran organismos nectónicos consumidores de fitoplancton, tales como la sardina, estos podrían asumir el rol del zooplancton y consumir el exceso de organismos fitoplanctónicos; en tal situación, el aumento en el aporte de nutrientes podría sostener un sistema trófico enriquecido y pesquerías productivas.

No obstante, si los peces omnívoros son sujetos a sobrepesca, aumentaría la tasa de sedimentación del fitoplancton no consumido, dando como resultado condiciones de hipoxia en el bentos y la liberación de compuestos nocivos, producto de la descomposición anaeróbica, tales como el ácido sulfhídrico y el metano. También se podría favorecer la reproducción de zooplanctívoros no móviles, como las medusas, que serían retenidas en el frente de surgencia hasta que pudieran alcanzar una talla mayor y logran distribuirse por toda la región alimentándose de huevos y larvas de peces. Estas hipótesis han surgido a partir de las observaciones en la zona de surgencia cerca de Lüderitz en Namibia, que es reconocida por ser la zona de surgencia más intensa en el mundo. La sardina fue diezmada en esta región y no se ha podido recuperar. En consecuencia, el sistema fue invadido por medusas y, mientras tanto, ocurren de manera constante Florecimientos Algales Nocivos, erupciones de gases tóxicos y condiciones hipóxicas (Bakun et al., 2010).

#### **2.1.1.4 Posibles impactos sobre las poblaciones de mamíferos y aves marinas a consecuencia de efectos sobre el ecosistema pelágico**

La teoría y las observaciones sugieren que las especies marinas responden al calentamiento del océano mediante un cambio en su distribución latitudinal y de profundidad, de acuerdo con su tolerancia térmica y habilidad de adaptación (Harley et al., 2006). Este cambio podría llevar a numerosas extinciones locales, especialmente en las zonas donde se presentan las temperaturas extremas a las cuales se encuentran adaptadas las comunidades, como es el caso de las regiones subpolares, los trópicos y las cuencas marinas semicerradas (Cheung et al., 2009).

Los efectos sobre los mamíferos y aves marinas podrían ser mayores en comparación con los que ocurran en niveles tróficos menores. Es poco probable que los cambios en la temperatura y la química del océano afecten de forma directa a estos organismos, sin embargo, es más probable que operen de forma indirecta mediante cambios en las características de hábitat y la disponibilidad de alimento. Se espera que las aves marinas y los pinípedos modifiquen su rango de distribución debido a cambios en la disponibilidad de peces como anchoveta y peces de arrecife rocoso (*Sebastes* spp.). Las aves requieren sitios de anidación con una configuración específica en determinadas islas, mientras que los pinnípedos requieren playas protegidas. Si es que el cambio climático produce una redistribución de las especies de las cuales se alimentan estos grupos, de tal forma que ya no se encontraran disponibles en las regiones circundantes a sus sitios de descanso y reproducción, es altamente probable que estos grupos desaparezcan de esa región (Bakun et al., 2015).

### **2.1.1.5 Impactos sobre los arrecifes de coral**

Los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas más sensibles al aumento de la temperatura en los océanos y a la acidificación, pues todo el sistema depende de una especie clave o ingeniero ecosistémico: los corales hermatípicos, que tienen límites de tolerancia reducidos a las variaciones de la temperatura y parámetros fisicoquímicos. Los corales viven en simbiosis con un organismo fotosintético del género *Symbiodinium*, conocido como zooxantela. El 90% de la energía que los corales necesitan proviene de la actividad fotosintética del organismo endosimbionte. Cuando las condiciones de luz y temperatura no son óptimas, las zooxantelas producen radicales libres tóxicos para el hospedero, por lo que son expulsadas. Los corales comienzan a agotar sus reservas de energía y, si la temperatura no regresa a condiciones tolerables, ocurren episodios de mortalidad masiva con consecuencias devastadoras para toda la fauna asociada (Anthony, 2016).

La acidificación del océano es la consecuencia química del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, pues este aumento provoca una mayor disolución en el agua, produciendo ácido carbónico que disminuye el pH y reduce las concentraciones del ion carbonato, que es necesario para todos los organismos calcificadores, incluyendo a los corales constructores de arrecife. Aproximadamente, 25% del CO<sub>2</sub> emitido por fuentes antropogénicas es absorbido por el océano y durante el siglo XX el pH medio de todos los océanos disminuyó en 0.1 unidades (Hoegh-Guldberg et al., 2007). Esto se traduce en un crecimiento más lento de los corales y un cambio potencial a condiciones de disolución de las estructuras coralina. Esta condición genera una mayor susceptibilidad al daño causado por tormentas, menor número de estructuras proveedoras de hábitat a otros organismos y una reducción general de la resiliencia de los arrecifes (Anthony, 2016). La pérdida en la complejidad estructural también afecta la habilidad de los arrecifes para absorber el impacto de las olas en detrimento de la protección de la línea de costa (Hoegh-Guldberg et al. 2007). La acidificación también afecta a las algas coralinas

incrustantes que juegan un papel clave en los arrecifes, pues sirven de sustrato para que las larvas de coral y otros invertebrados se asienten (Anthony, 2016).

Otro pronóstico del cambio climático es el incremento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales. Aunque las tormentas han sido un proceso natural presente en los ambientes tropicales que modela la estructura y diversidad en los arrecifes, se piensa que un aumento en la frecuencia y la intensidad de estos disturbios, aunado con el aumento en la temperatura y otros impactos antropogénicos, disminuirá la resiliencia de los arrecifes coralinos (Anthony, 2016).

Aunque los arrecifes coralinos cubren ca.1% de la superficie del suelo oceánico, albergan aproximadamente una cuarta parte del total de especies que habitan en los océanos y dan sustento a decenas de millones de personas que viven en las regiones costeras tropicales. En términos monetarios, se estima que el valor de los servicios ecosistémicos que proporcionan los arrecifes asciende a 2 millones de dólares por hectárea por año, alrededor de entre 2 y 3 órdenes de magnitud más de lo que proporcionan los bosques tropicales y el mar abierto (Anthony, 2016).

#### **2.1.1.6 Posibles impactos sobre las pesquerías a consecuencia de efectos sobre los arrecifes de coral**

Otros impactos antropogénicos sobre los arrecifes involucran el deterioro de la calidad del agua derivado de la descarga de nutrientes y sedimentos asociados al desarrollo costero y la deforestación, así como la sobreexplotación de los recursos pesqueros. Actualmente, las capturas totales en los arrecifes son 64% mayores del límite máximo sostenible, estimándose que para el año 2050 se requerirán 156,000 km<sup>2</sup> más de arrecifes para poder sostener las prácticas actuales de consumo (Hoegh-Guldberg et al., 2007).

#### **2.1.1.7 Impactos sobre el manglar**

Los manglares representan un ecosistema altamente productivo, con una gran riqueza biológica y proporcionan una gran diversidad de recursos y servicios ambientales. México se encuentra entre los cinco países con mayor extensión de este ecosistema (CONABIO, 2009).

Para algunos ecosistemas, el aumento del nivel del mar y de la temperatura es muy importante. Por ejemplo, los deltas y las playas son vulnerables al ascenso del nivel del mar, pero no al ascenso de la temperatura. Los manglares y arrecifes coralinos presentan de baja a moderada vulnerabilidad al cambio climático, sin embargo, ambos experimentan la presión de las actividades antropogénicas como la deforestación, la sobrepesca, el turismo, entre otros (Gay-García, 2000).

Pannier (1992), citado en Gay-García (2000), considera a los arrecifes coralinos, a los manglares, a las praderas de fanerógamas marinas, a las lagunas costeras, a la costa rocosa, a las playas y a la vegetación costera terrestre, entre los ecosistemas más factibles a ser afectados por cambios globales.

Las actividades humanas constituyen la principal amenaza para los manglares. Entre las principales actividades humanas están la destrucción del hábitat, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos. La falta de planificación del desarrollo urbano, industrial y turístico, así como del desarrollo agrícola, ganadero y acuícola, han desplazado y reducido extensiones considerables de manglares (CONABIO, 2009).

Distintos estudios a nivel internacional señalan que la recuperación de un manglar que ha sido severamente dañado puede tomar muchos años, siendo que en muchas ocasiones la pérdida es total e irreversible (Loyche y Fortuna, 2003; FAO 2007b; Duke et al. 2007). La pérdida de los manglares afecta significativamente a todas las especies que los utilizan durante su ciclo biológico (CONABIO, 2009).

Day et al. (2008), citado en Yáñez-Arancibia (2008), menciona que el IPCC (2007) predice una elevación del nivel del mar de aproximadamente 40 a 45 centímetros para el año 2100, por efecto de la expansión térmica del océano y el derretimiento de los hielos sobre el continente. En lugares como los manglares, u otros humedales, es posible que las comunidades naturales puedan migrar tierra adentro al ritmo de la elevación de las aguas; pero si la migración no es posible, el hábitat morirá por efecto de la inundación, ya que su ritmo de tolerancia adaptativa será menor al de las inundaciones.

Por ejemplo, un pequeño ascenso del nivel del mar en una costa con sedimentación activa, podría afectar los patrones de sedimentación y, por consiguiente, los sistemas de manglar (Gay-García, 2000).

Asumiendo un ascenso en el nivel del mar de menos de 1 metro para finales de este siglo, es de esperarse una respuesta selectiva de los manglares en función del tipo de costa. Es de esperarse una pérdida significativa en extensión del manglar para las costas del Pacífico Sur, las costas de la Península de Baja California y el caribe. Este último en particular por su escaso nivel de mareas (<50 cm), el efecto de los huracanes y el deterioro de su barrera natural (i.e., el arrecife de coral) (Vázquez-Botello 2008).

### **2.1.1.8 Impactos sobre la costa rocosa**

El calentamiento global podría resultar en un incremento de alrededor de un metro en el nivel del mar durante este siglo, debido a la expansión del océano, ya que recibiría todas las aguas de deshielo de los glaciares. Las costas estarían expuestas a mayores riesgos, en particular a la erosión. Este efecto se vería exacerbado por la creciente presión ejercida por la presencia humana sobre las áreas costeras (grado de confianza muy alto) (IPCC, 2007). Como menciona Wayne et

al. (1993), citado en, Vázquez-Botello (2008), se debe tener en cuenta que cualquiera de las predicciones, sea cual sea el método y sus escenarios, la tendencia es una elevación del nivel del mar, en gran parte causada por el Cambio Climático Global; cuyas consecuencias, se ven reflejadas en inundaciones, intrusión de la cuña salina y erosión de las costas (Vázquez-Botello, 2008).

### **2.1.1.9 Impactos sobre el bosque de macroalgas**

Las macroalgas formadoras de bosques son importantes productores primarios e ingenieros ecosistémicos, pues juegan un papel central en la formación de hábitats próximos a la costa. Los bosques de macroalgas proporcionan sustrato para organismos colonizadores, así como estructura tridimensional que proporciona hábitat a una gran cantidad de plantas y animales. Un buen número de especies de peces utilizan este hábitat como área de crianza y alimentación, así como refugio de los depredadores. Los peces atraen a organismos piscívoros como aves marinas, nutrias y pinípedos (Teagle et al., 2017). Los bosques de macroalgas también modifican factores ambientales, pues amortiguan el flujo y la temperatura del agua, redistribuyen el pH y el oxígeno disuelto (Suárez Castillo, 2011).

Los bosques de kelp se distribuyen en las regiones templadas y requieren de aguas frías para que las algas tengan un desarrollo óptimo. La elevación de la temperatura provoca un estrés en las algas y por lo tanto afecta la distribución, productividad, resiliencia y estructura de los bosques. En Tasmania se ha observado una disminución drástica en la extensión de *Macrocystis pyrifera* causado probablemente por la advección de aguas cálidas y con menor concentración de nutrientes de la Corriente Australiana Oriental (Teagle et al., 2017).

Análisis de efectos de variables sobre la abundancia de *Macrocystis pyrifera* en la costa oeste de Baja California indican que la temperatura superficial del mar es la variable que mejor explica los cambios en la distribución y abundancia de los bosques de macroalgas. La temperatura se correlaciona con la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua y también afecta el reclutamiento de nuevos individuos que se encuentran en el sustrato (Casas Valdez et al., 2003), por lo que el aumento en la temperatura superficial del mar y la estratificación afecta de forma directa a las algas pues bajo esas condiciones no existen concentraciones adecuadas de nutrientes para su desarrollo.

## 2.2 Metodología

### 2.2.1 Proyecciones de los efectos de cambio climático

Se utilizaron datos provenientes de simulaciones de dos modelos de cambio climático del *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL, por sus siglas en inglés) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), disponibles en el portal <https://www.gfdl.noaa.gov/>. Los modelos ESM (Earth System Models) acoplan un modelo de circulación atmosférica a uno de circulación oceánica; toman en cuenta la dinámica de las masas de tierra y témpanos de hielo, así como la representación de los ciclos biogeoquímicos. Cada modelo ofrece datos mensuales de variables oceánicas, biogeoquímicas y atmosféricas para un periodo histórico (1860-2005), y para cuatro escenarios de cambio climático proyectados durante el periodo 2006-2100 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Se seleccionaron nueve variables para visualizar los cambios proyectados por cada escenario en las áreas de estudio: (1) temperatura atmosférica a nivel del mar; (2) precipitación; (3) temperatura superficial del mar; (4) salinidad superficial; (5) elevación del nivel del mar; (6) pH; (7) oxígeno disuelto en la superficie; (8) nitratos disueltos; y (9) concentración de clorofila. Las variables atmosféricas de los modelos cuentan con una resolución aproximada de 2.0 grados, mientras que las variables oceánicas cuentan con una resolución de 0.5 a 1.0 grados.

### 2.2.2 Especies en islas

Se utilizaron datos de Biodiversidad Insular proporcionados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La información incluye el área de diferentes islas de México y las especies que se encuentran en ellas.

### 2.2.3 Hábitat

La herramienta para la evaluación rápida de la vulnerabilidad en áreas marinas protegidas de América del Norte (RVA, por sus siglas en inglés) fue creada por la Comisión para la Cooperación Ambiental entre los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y México. El propósito de la herramienta es ayudar a realizar evaluaciones rápidas de vulnerabilidad de un hábitat a los efectos del cambio climático con la finalidad de que sea útil para formular estrategias de adaptación a los efectos. En la RVA se identifican los hábitats asociados al objeto de estudio y se identifican los factores de presión asociados al cambio climático, así como las proyecciones de cada factor en un periodo futuro sobre la región y su efecto anticipado sobre los hábitats. También se analizan las consecuencias de los efectos del cambio climático en combinación con otros factores de presión no asociados al cambio climático. Se evalúa la probabilidad de que



ocurran los efectos anticipados, así como la capacidad adaptativa de los hábitats a dichos efectos, para al final obtener un nivel de vulnerabilidad ante cada factor de presión (CCA, 2016).

A partir de la herramienta RVA (*Rapid Vulnerability Assessment*), se enlistaron una serie de hábitats asociados a aves marinas, pinnípedos y pesquerías en el Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Tropical y Golfo de México y Mar Caribe, estudiados en este trabajo.

Tabla 2-1. Hábitats asociados a tres diferentes grupos de especies marinas, evaluados en diferentes mares de México. Cada celda dentro de la tabla representa el hábitat evaluado en el mar al que pertenecen. En los casos donde la celda se encuentra marcado con un guión (-) es porque el hábitat para ese grupo no pertenecía a ninguno de los mares estudiados.

Hábitat/Grupo	Pinnípedos	Aves Marinas	Pesquerías
<b>Playa arenosa</b>	Golfo de California y Pacífico Norte	Golfo de California, Pacífico Norte y Tropical	-
<b>Costa rocosa</b>	Golfo de California y Pacífico Norte	Golfo de California, Pacífico Norte y Tropical	-
<b>Pelágico</b>	Golfo de California y Pacífico Norte	Golfo de California, Pacífico Norte y Tropical	Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Tropical y Golfo de México y Mar Caribe
<b>Manglar</b>	-	Golfo de México y Mar Caribe	Pacífico Tropical y Golfo de México y Mar Caribe
<b>Arrecife de coral</b>	-	-	Golfo de México y Mar Caribe
<b>Bosque de macroalgas</b>	Pacífico Norte	Pacífico Norte	Pacífico Norte

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Proyecciones de variables ambientales

#### 2.3.1.1 Variables atmosféricas

En la Figura 2-1 se puede observar una clara diferencia entre los cambios de temperatura en ambientes continentales y marinos; siendo los cambios más evidentes en ambientes continentales. En ambientes marinos, el mayor incremento en la temperatura ambiental se observa sobre el Golfo de California. En cuanto al incremento evaluado en los diferentes escenarios, el escenario que presenta un mayor aumento en la temperatura ambiental es el RCP 8.5.

Para la precipitación (Figura 2-2), a diferencia de la temperatura ambiental, existen diferencias positivas y negativas, que reflejan aumentos y disminuciones en la precipitación, bajo cada escenario. Un aspecto interesante son los cambios que ocurren en el Pacífico Tropical, ya que se observa un marcado patrón zonal, que va desde los valores negativos en zonas alejadas de la costa a valores positivos en zonas cercanas a la costa.

#### 2.3.1.2 Variables oceanográficas

Los cambios en la temperatura superficial del mar, muestran sólo aumentos en todos los mares (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que van desde 1.1 en el escenario más optimista (RCP 2.6) hasta 2.2 ante el escenario más pesimista (RCP 8.5). Los mayores incrementos de la temperatura del mar se dan en el Pacífico Norte ante el escenario RCP 8.5.

Ante los cuatro escenarios de cambio climático, el oxígeno disuelto muestra valores negativos, lo que representa una disminución en la concentración de esta variable en la superficie de todos los océanos que rodean a México (

Figura 2-4). El oxígeno disuelto, como la temperatura superficial del mar, presenta los mayores cambios en el Pacífico Norte. Como las variables ya descritas, el escenario más pesimista es el que presenta los valores más intensos.

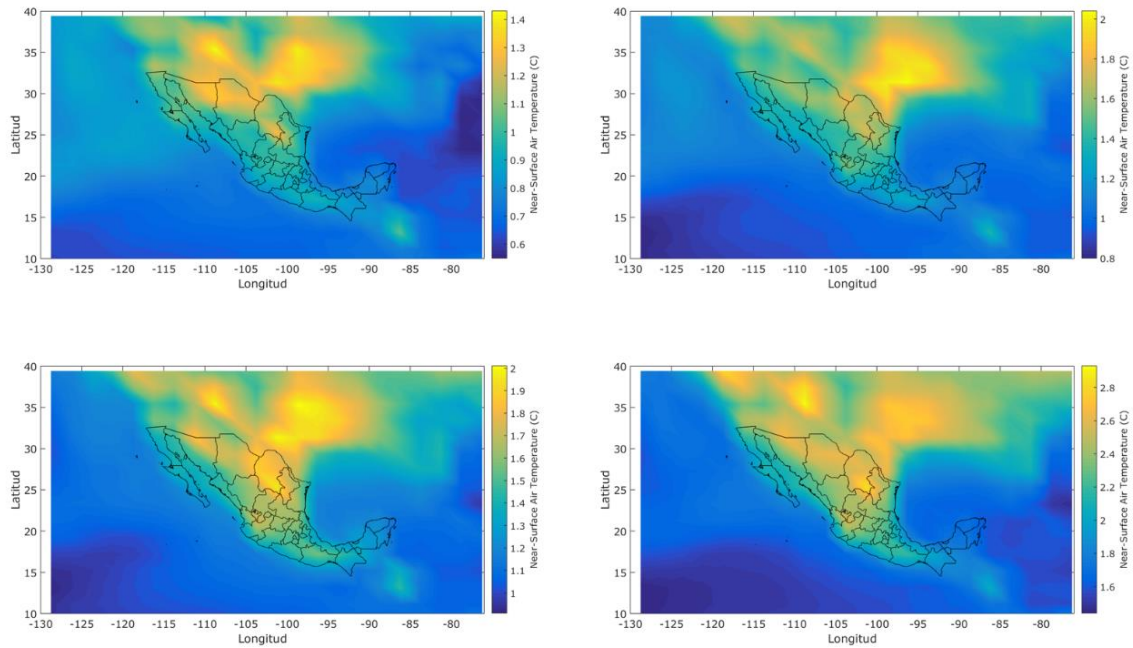


Figura 2-1 Cambios en la temperatura ambiental ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).

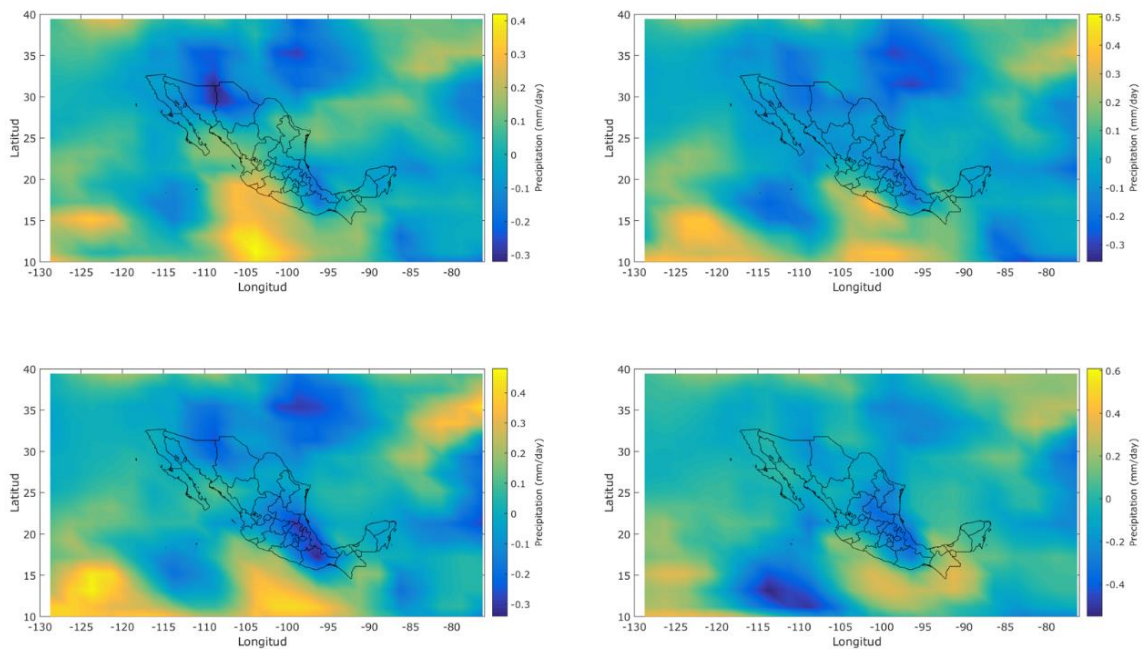


Figura 2-2. Cambios en la precipitación ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).

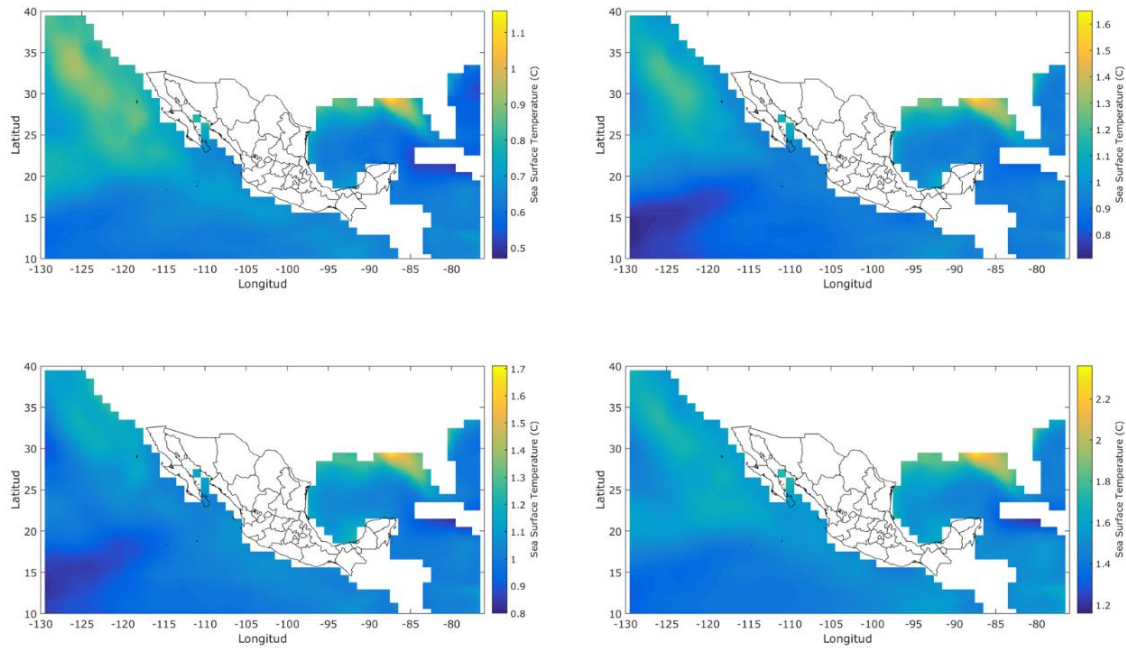


Figura 2-3. Cambios en la temperatura superficial del mar ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).

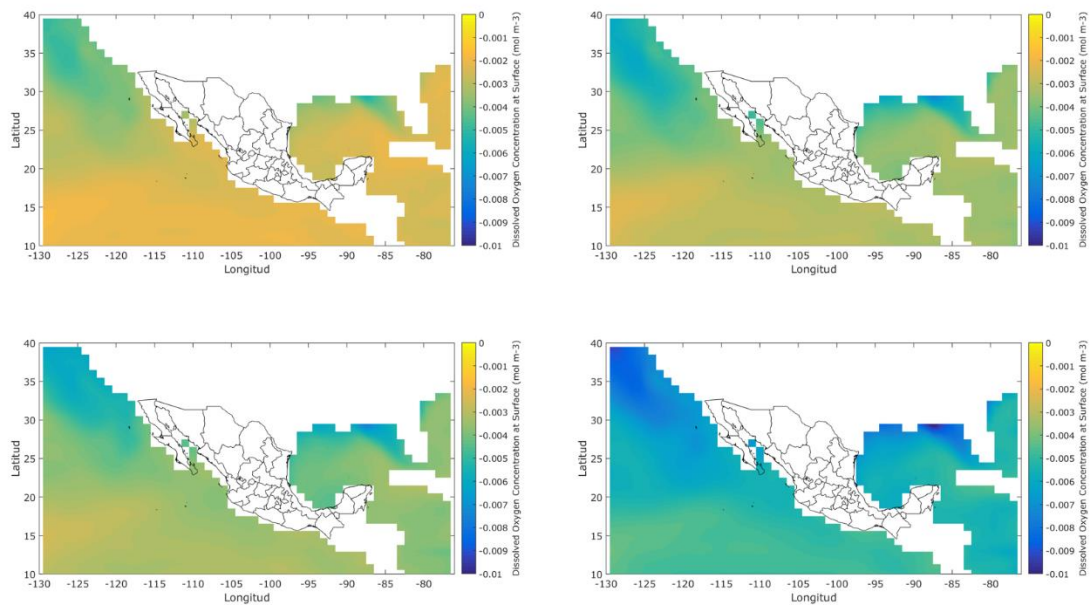


Figura 2-4. Cambios en el oxígeno disuelto ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).

El pH en la superficie de los océanos mexicanos ante todos los escenarios tiende a disminuir (

Figura 2-5). La región que presenta una mayor disminución es aquella que representa la transición entre el Pacífico Norte y el Pacífico Tropical, con valores alrededor de 1.8 unidades de pH. Dichos valores negativos muestran una tendencia dirigida en mayor parte al Pacífico Tropical.

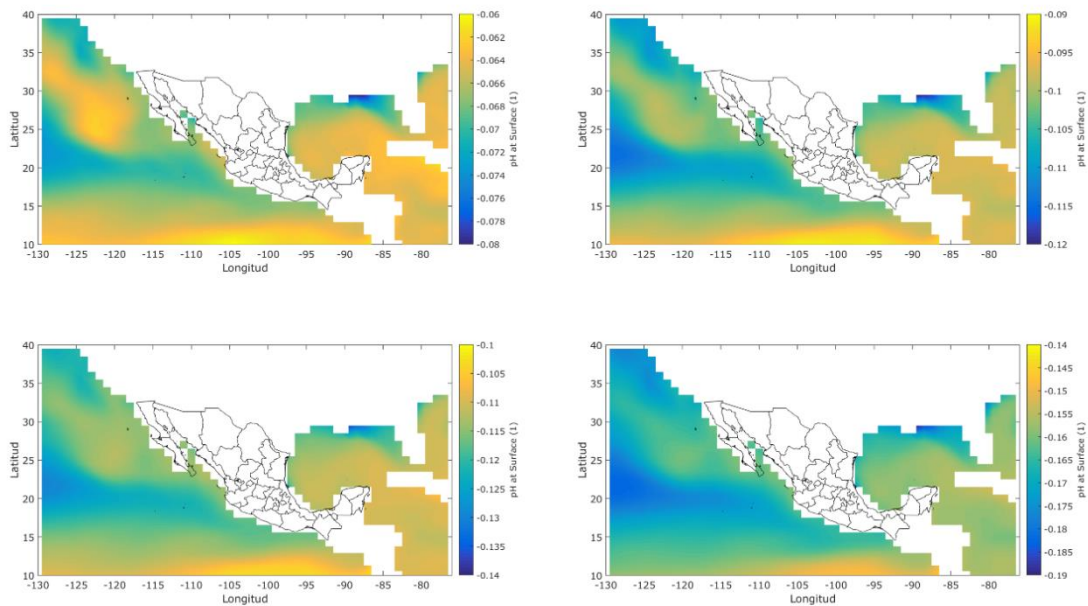


Figura 2-5. Cambios en el pH superficial del mar ante los escenarios del IPCC y el periodo histórico RCP 2.6 (sup. izq.); RCP 4.5 (sup. der.); RCP 6.0 (inf. izq.); y RCP 8.5 (inf. der.).

A partir de los valores observados en las figuras anteriores se calcularon los intervalos de confianza de las diferencias en los cuatro mares estudiados (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*). En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se puede observar que para todas las variables en cada uno de los mares, el escenario pesimista es el que presenta los valores más altos. Si se analizan sólo los valores del escenario más pesimista, los cambios en el oxígeno disuelto son mayores en el Golfo de California; en la temperatura ambiental, de nuevo, en el Golfo de California; en la precipitación —contrario que las demás variables—, presenta variaciones positivas y negativas, siendo el Golfo de California el que presenta la menor de las disminuciones y el Golfo de México y Mar Caribe el mayor aumento. En el caso de la temperatura superficial del mar, donde sólo se presentan aumentos, el mar más afectado es el Golfo de California, seguido del Pacífico Norte. Aunque el pH muestra valores muy similares en cada uno de los mares, el Pacífico Tropical es el que presenta las disminuciones más altas de esta variable.

Tabla 2-2. Intervalos de las diferencias entre variables fisicoquímicas proyectadas y un periodo histórico. Las variables fueron seleccionadas según su impacto sobre los hábitats evaluados con el RVA.

Mar	Escenario IPCC Modelo ESM2G	Oxígeno disuelto (mol m <sup>-3</sup> )	Temperatura ambiental (°C)	Precipitación (mm/día)	Temperatura superficial del mar (°C)	pH superficial
<b>Pacífico Norte</b>	RCP 2.6	[-0.0032883, -0.003095]	[0.81348, 0.87302]	[-0.026295, 0.021076]	[0.76591, 0.78676]	[-0.067052, -0.066208]
	RCP 4.5	[-0.0040199, -0.0038059]	[1.0632, 1.1371]	[-0.024793, 0.032024]	[0.98143, 1.0118]	[-0.10367, -0.10257]
	RCP 6.0	[-0.0041742, -0.0039666]	[1.1168, 1.183]	[0.036249, 0.069327]	[1.0383, 1.0599]	[-0.11677, -0.11559]
	RCP 8.5	[-0.0062101, -0.0060062]	[1.691, 1.7964]	[-0.017289, 0.024914]	[1.5834, 1.6042]	[-0.16636, -0.16465]
<b>Golfo de California</b>	RCP 2.6	[-0.0029865, -0.0026696]	[0.82312, 1.013]	[-0.059938, 0.10646]	[0.70173, 0.74439]	[-0.067656, -0.066787]
	RCP 4.5	[-0.0043459, -0.003914]	[1.1705, 1.3834]	[-0.11229, -0.038564]	[1.0056, 1.0609]	[-0.10291, -0.10186]
	RCP 6.0	[-0.0042036, -0.0039137]	[1.2692, 1.4426]	[-0.064056, 0.045104]	[1.0739, 1.1045]	[-0.1151, -0.1142]
	RCP 8.5	[-0.0063707, -0.0059272]	[1.8931, 2.2087]	[-0.16088, -0.015537]	[1.613, 1.6713]	[-0.16238, -0.16137]
<b>Pacífico Tropical</b>	RCP 2.6	[-0.0025442, -0.0024502]	[0.72999, 0.77248]	[-0.041213, 0.10379]	[0.68365, 0.70058]	[-0.069316, -0.068764]
	RCP 4.5	[-0.0032426, -0.0031233]	[0.98002, 1.0335]	[-0.089522, 0.05311]	[0.88797, 0.90875]	[-0.10717, -0.10623]
	RCP 6.0	[-0.0035258, -0.0034098]	[1.0707, 1.1439]	[-0.03327, 0.067178]	[0.98777, 1.0131]	[-0.12089, -0.11984]
	RCP 8.5	[-0.0053795, -0.0052293]	[1.637, 1.6981]	[-0.14358, 0.050986]	[1.503, 1.5308]	[-0.17158, -0.16969]
<b>Golfo de México y Mar Caribe</b>	RCP 2.6	[-0.0025458, -0.0024562]	[0.67689, 0.74534]	[-0.051325, 0.013563]	[0.61797, 0.63367]	[-0.064778, -0.064378]
	RCP 4.5	[-0.0036705, -0.003566]	[1.0247, 1.0884]	[-0.048029, 0.012971]	[0.94131, 0.95998]	[-0.098787, -0.09823]
	RCP 6.0	[-0.0040589, -0.0039415]	[1.1705, 1.2639]	[-0.062604, 0.019737]	[1.0452, 1.0669]	[-0.11173, -0.1111]
	RCP 8.5	[-0.0056453, -0.0055069]	[1.6669, 1.7811]	[-0.056471, 0.06355]	[1.5013, 1.5276]	[-0.15931, -0.1584]



### 2.3.1.3 Riqueza de especies y microendemismos

En la

Tabla 2-3 se resume la información sobre la cantidad de especies en las islas que pertenecen a cada mar, incluyendo especies endémicas compartidas, estrictas, y la suma de ambas. Se puede ver que las islas del Golfo de California cuentan con la mayor riqueza con más de 3 mil especies, así como la mayor cantidad de microendemismos o especies endémicas estrictas (88 especies). Las islas del Golfo de México y Mar Caribe, tomadas como conjunto, son las segundas más ricas, seguidas de aquellas en el Pacífico Tropical y, finalmente, las del Pacífico Norte. Sin embargo, al tomar en cuenta los microendemismos, el Pacífico Norte es el segundo más rico, seguido del Pacífico Tropical y finalmente el Golfo de México y Mar Caribe.

Tabla 2-3. Número total de especies y número total de especies endémicas (compartidas, estrictas y totales) por mar.

Mar	Especies	Especies endémicas compartidas	Especies endémicas estrictas	Especies endémicas totales
<b>Pacífico Norte</b>	656	34	50	84
<b>Golfo de California</b>	3250	105	88	193
<b>Pacífico Tropical</b>	1087	38	16	54
<b>Golfo de México y Mar Caribe</b>	2362	9	5	14

## 2.4 Discusión

### 2.4.1 Vulnerabilidad de los Pinnípedos ante los efectos del Cambio Climático

En el Pacífico Norte y Golfo de California, se estima que en los próximos 50 años, los pinnípedos serán afectados por el cambio climático a través del aumento en la temperatura superficial del mar y el aumento en el nivel medio del mar. Esto podría agravarse si se toman en cuenta factores no asociados al cambio climático, como la contaminación causada por nutrientes de fuentes terrestres y el desarrollo o crecimiento poblacional. Se puede, por ejemplo, dar una disminución en la disponibilidad de alimento por contaminación asociado a un aumento en la temperatura superficial del mar, así como una mayor perturbación del hábitat por el desarrollo o crecimiento poblacional. Más aún, el incremento en la frecuencia o intensidad de tormentas podría ocasionar que contaminantes como residuos de agricultura y ganadería, aguas residuales, aguas negras, residuos industriales y minería sean arrastrados hacia la costa con mayor facilidad, pudiendo estimular la ocurrencia de florecimientos algales nocivos.



## 2.4.2 Vulnerabilidad de Aves Marinas ante los efectos del Cambio Climático

Se evaluó la vulnerabilidad del hábitat de las aves marinas en el Pacífico Norte, Pacífico Tropical, Golfo de California y Golfo de México y Mar Caribe causada por los efectos del cambio climático. Dentro de los factores de presión evaluados, asociados al cambio climático, se encuentran el aumento de la temperatura superficial del mar, la alteración de corrientes y mezclas ascendentes, la acción del oleaje o erosión de la costa, un incremento en el nivel medio del mar, y una mayor intensidad o frecuencia de tormentas, en los próximos 50 años.

Se espera que los factores de presión asociados al cambio climático tengan un efecto en los cambios de las características del hábitat y la disponibilidad de alimento; que las aves marinas modifiquen su distribución debido a cambios en la disponibilidad de peces como anchoveta y peces de arrecife rocoso (*Sebastes* spp.); que exista un aumento del nivel medio del mar de aproximadamente 40 – 45 cm; una disminución de precipitación en el Golfo de México; un incremento en la intensidad de las tormentas; y que la acción del oleaje tenga mayor impacto sobre la zona costera aumentando la erosión de esta zona. Los factores de presión ajenos al cambio climático existentes en este hábitat son, entre otros, el excesivo aprovechamiento de los recursos pesqueros, las especies invasoras, la contaminación por nutrientes de fuentes terrestres, el crecimiento poblacional, turismo, extracción de petróleo y gas y un incremento en la magnitud de tormentas asociadas a huracanes y ciclones, en especial durante eventos El Niño. Estos factores ajenos al cambio climático actualmente afectan el sistema porque un aprovechamiento excesivo de los recursos podría afectar el hábitat de las aves, al reducir las poblaciones marinas de peces, alimento de muchas especies de aves; las especies invasoras amenazan la abundancia o diversidad de las especies nativas y alteran el equilibrio de los ecosistemas; el desarrollo o crecimiento poblacional ocasiona la pérdida y fragmentación del hábitat de las aves marinas; la contaminación incrementa el estrés fisiológico y las enfermedades en las aves, así como disminuir la disponibilidad de su alimento; el turismo o recreación genera un impacto directo sobre el manglar y las costas, ahuyentando organismos que habitan en estos ecosistemas; y la extracción afecta directamente a todos los organismos que habitan en zonas costeras al practicarse de forma intensiva. El cambio climático puede interactuar con todos estos factores mediante cambios sobre la presión de las pesquerías; la alteración de la dinámica de los ecosistemas marinos, esto debido a los cambios en la temperatura del mar y del aire; en la alteración de la productividad primaria; el incremento de la frecuencia e intensidad de tormentas, destruyendo manglares y praderas de pastos marinos, con lo cual disminuye la retención de nutrientes y sedimentos en estos ambientes.

Se determinó que la mayor vulnerabilidad se debe al aumento en la temperatura superficial del mar, al aumento en el nivel medio del mar y al aumento de la temperatura del aire. Esta vulnerabilidad fue detonada por una alta probabilidad de ocurrencia, una alta tasa de consecuencias y un alto riesgo sobre el hábitat. Las vulnerabilidades de preocupación particular están relacionadas debido a que las especies

invasoras podrían verse beneficiadas con los cambios en las corrientes y mezclas consecuentes, provocando más presión sobre las comunidades nativas; a que el aumento de la temperatura tendrá un efecto negativo, haciendo que la dinámica de las comunidades marinas se vean afectadas fuertemente; la falta de corrientes y mezcla ascendente podría afectar la dinámica de los recursos pesqueros; una disminución del hábitat por efecto de la erosión de la costa, lo que afectará los ecosistemas costeros que sirven de zonas de alimentación y descanso para las aves marinas.

### **2.4.3 Vulnerabilidad de las especies de importancia pesquera ante los efectos pronosticados de cambio climático**

#### **2.4.3.1 Pacífico Norte**

Los factores de presión asociados al cambio climático que actúan en el Pacífico Norte son: el aumento en la temperatura superficial del mar, el incremento en la estratificación y profundidad de la capa de mezcla en las regiones oceánicas, la intensificación de las surgencias costeras y la disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Se espera que el aumento de la temperatura superficial provoque cambios en la distribución de las especies y una disminución de las poblaciones de macroalgas que dan sustento a numerosas especies de peces. El aumento en la estratificación en las regiones oceánicas puede provocar una disminución en la producción primaria en las mismas; mientras que una intensificación de las surgencias costeras podría producir un aumento en la producción primaria en la costa y, si la intensificación es moderada como para no dispersar a los organismos planctónicos, podría haber una mayor producción de las poblaciones de pelágicos menores. Por otro lado, la disminución en la concentración de oxígeno disuelto puede producir un mayor estrés fisiológico en los organismos, así como la compactación del hábitat.

Otros factores de presión antropogénicos presentes en el Pacífico Norte son la sobrepesca y la contaminación por nutrientes de fuentes terrestres. La contaminación promueve la eutrofización de los ambientes costeros y la producción de florecimientos algales nocivos; mientras que la sobrepesca agota las poblaciones de especies que ocupan una posición intermedia en la cadena alimenticia interrumpiendo el flujo de energía a niveles tróficos superiores. La interacción de estos factores con los efectos asociados al cambio climático puede provocar la acumulación de contaminantes en las zonas costeras debido al aumento en la estratificación de la capa superficial del océano. Con la intensificación de las surgencias costeras, la sobrepesca puede eliminar a los pelágicos menores del sistema, aumentando la sedimentación del fitoplancton no consumido, dando como resultado condiciones de hipoxia en el bentos y la liberación de compuestos nocivos, producto de la descomposición anaeróbica.

Como resultado del análisis de vulnerabilidad se determinó que las especies de importancia pesquera en el Pacífico Norte presentan una vulnerabilidad moderada a los efectos del cambio climático sobre su hábitat, pues la intensificación de las surgencias podría contrarrestar el aumento en la estratificación,

con lo cual seguiría existiendo un aporte de nutrientes para dar sustento a la producción primaria y por ende a toda la cadena trófica.

#### **2.4.3.2 Golfo de California**

Los factores de presión asociados al cambio climático que actúan en el Golfo de California son el aumento en la temperatura superficial del mar, el incremento en la estratificación y profundidad de la capa de mezcla, la intensificación de las surgencias costeras y la disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Se espera que el aumento en la temperatura superficial provoque cambios en la distribución de las especies; mientras que el aumento en la estratificación puede provocar una disminución en la producción primaria. Se proyecta una intensificación de las surgencias en regiones puntuales muy cercanas a la costa y disminución en zonas alejadas de la costa. Al ser el Golfo de California una cuenca semicerrada, es más probable que el aumento en la estratificación domine sobre la intensificación de las surgencias. Por otro lado, la disminución en la concentración de oxígeno disuelto puede producir un mayor estrés fisiológico en los organismos, así como la compactación del hábitat, pues las zonas de mínimo oxígeno en la región estarían disminuyendo su profundidad y esas aguas podrían ser advectadas a la superficie mediante las surgencias. Otros factores de presión antropogénicos presentes en el Golfo de California son la sobrepesca y la contaminación por nutrientes de fuentes terrestres.

Como resultado del análisis de vulnerabilidad se determinó que las especies de importancia pesquera en el Golfo de California presentan una vulnerabilidad moderada a los efectos del cambio climático sobre su hábitat, aunque el Golfo de California, al ser una cuenca semicerrada, es más susceptible a los efectos del aumento en la estratificación.

#### **2.4.3.3 Pacífico Tropical**

Los factores de presión asociados al cambio climático que actúan en el Pacífico Tropical son el aumento en la temperatura superficial del mar, el incremento en la estratificación y profundidad de la capa de mezcla, acidificación y disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Los Modelos Globales de Cambio Climático pronostican que en la región aumentará la temperatura entre 0.5 y 2 °C hacia el año 2065 provocando cambios en la distribución de las especies así como extinciones locales. El aumento en la estratificación de la capa de mezcla produce un menor aporte de nutrientes hacia la zona eufótica y por lo tanto afecta de forma negativa la producción primaria. El aumento en la acidez provoca una menor disponibilidad de iones carbonato en disolución provocando un crecimiento lento de los organismos calcificadores o inclusive la disolución de las estructuras calcáreas. En el Pacífico Tropical existe una región subsuperficial con una concentración muy baja de oxígeno disuelto, llamada la Zona Mínima de Oxígeno, dicha zona cada vez se vuelve más somera y compacta el hábitat de los organismos epipelágicos, restringiéndolos a una distribución cada vez más somera; la

disminución en la concentración de oxígeno disuelto provocada por el aumento de la temperatura y la estratificación podrían conjugarse con este fenómeno provocando un mayor estrés fisiológico en los organismos, así como extinciones locales.

Otros factores de presión antropogénicos presentes en el Pacífico Tropical son la sobrepesca, la contaminación por nutrientes de fuentes terrestres y el desarrollo o crecimiento poblacional. La interacción de estos factores con los efectos pronosticados de cambio climático pueden conducir a la disminución de las poblaciones de especies sujetas a pesca, acumulación de contaminantes en zonas costeras, eutrofización, retención de sedimentos en la capa de mezcla con el consiguiente aumento en la turbidez del agua que impacta a los organismos fotosintéticos, disminución de la resiliencia de los manglares, desaparición de los arrecifes coralinos y, en general, pérdida de biodiversidad.

Se determinó que las especies de importancia pesquera en el Pacífico Tropical presentan una vulnerabilidad de moderada a alta a los efectos del cambio climático, esto debido a que en dicha región algunas especies de importancia pesquera se encuentran asociadas a los arrecifes, que son el ecosistema más vulnerable al cambio climático. Por otro lado, la disminución en la concentración de oxígeno disuelto en la región es un factor que incrementa el estrés fisiológico en las especies epipelágicas, promoviendo el desplazamiento hacia regiones con mayores concentraciones de oxígeno.

#### **2.4.3.4 Golfo de México y Caribe Mexicano**

Los factores de presión asociados al cambio climático que actúan en el Golfo de México y mar Caribe son el aumento en la temperatura superficial del mar, el incremento en la estratificación y profundidad de la capa de mezcla, la acidificación de los océanos y el aumento en la intensidad y frecuencia de las tormentas. Según los pronósticos de los Modelos Climáticos Globales, la temperatura superficial aumentará entre 0.5 y 2 °C hacia el año 2065 (dentro de 50 años). El aumento en la temperatura superficial acentúa el contraste de densidades entre la capa superficial del mar y las capas más profundas. Durante las últimas décadas se ha observado que ha aumentado la estratificación alrededor de 4% y se proyecta que la profundidad de la capa de mezcla será mayor, lo que significa que se necesitará un aporte de mayor energía para mover aguas profundas hacia la superficie (Capotondi et al., 2012; Lluch-Cota et al., 2014; Palacios et al., 2004). Durante el siglo XX se observó una disminución del pH en 0.1 unidades (Hoegh-Guldberg et al., 2007) y los modelos globales proyectan una disminución de entre 0.05 y 0.1 unidades hacia el año 2065. Otro pronóstico del cambio climático es el incremento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales (Anthony, 2016).

En el mar Caribe y las regiones costeras del Golfo de México, la gran mayoría de las especies de importancia comercial están asociadas a los arrecifes coralinos; muchas especies de peces de arrecife se refugian entre las raíces de los manglares en sus primeras etapas de desarrollo, por lo que los manglares también son un ecosistema crucial para el reclutamiento de estas especies. Se anticipa que los factores proyectados de aumento en la temperatura y acidificación van a producir cambios en la distribución de especies en general, eventos de blanqueamiento y mortalidad de los corales,

crecimiento lento de las estructuras coralinas e inclusive un cambio potencial a condiciones de solubilidad de las estructuras calcáreas. La intensificación y aumento en la frecuencia de las tormentas produce una destrucción más frecuente de los arrecifes y manglares, lo cual afecta la resiliencia de ambos ecosistemas. En ambientes más alejados de la costa en el Golfo de México se espera que disminuya la producción primaria debido a la acentuación de la estratificación de la capa de mezcla, con la cual se tiene un menor aporte de nutrientes hacia la superficie.

Otros factores de presión asociados a estos ambientes son la contaminación por nutrientes de fuentes terrestres, el desarrollo o crecimiento poblacional que involucra la deforestación del manglar, duna costera y selva baja; la sobrepesca, las especies invasoras, el turismo, las enfermedades y la industria petrolera. El aporte de aguas residuales promueve el crecimiento de algas sobre los corales, disminuye la claridad del agua y, por lo tanto, la cantidad de luz disponible para los endosimbiontes de los corales; promueve la eutrofización de ambientes costeros y la producción de florecimientos algales nocivos; también acentúa enfermedades en muchos organismos como los corales, disminuyendo sus capacidades de reproducción o supervivencia. La deforestación de las dunas costeras provoca la erosión de las playa generando un mayor aporte de sedimentos que asfixian a los corales y disminuyen la actividad fotosintética de las zooxantelas; mientras que la tala de los manglares evita que se retengan nutrientes y sedimentos en estos ecosistemas. La sobrepesca elimina especies clave como los peces herbívoros en los arrecifes, que consumen algas y permiten el crecimiento y reclutamiento de los corales. Los arrecifes coralinos del Caribe y Golfo de México también se encuentran amenazados por una especie invasora: el pez león, el cual no tiene depredadores y ha impactado considerablemente las poblaciones de peces nativos.

La interacción entre los efectos pronosticados de cambio climático y otros factores de presión antropogénicos pueden provocar un mayor estrés sobre los organismos, especialmente los corales. La interacción de factores también provoca un aumento en la concentración de contaminantes en las regiones costeras, disminución de la resiliencia de los ecosistemas, fragmentación del hábitat y en términos generales pérdida de biodiversidad.

Como resultado del análisis de vulnerabilidad se determinó que todos los factores contemplados hacen de las especies de importancia comercial en estas regiones altamente vulnerables, especialmente en las regiones costeras, pues los corales formadores de arrecife, son los organismos que dan sustento a todo el ecosistema, son especialmente sensibles a los cambios de temperatura, acidez y concentración de nutrientes en el agua.

## 2.5 Literatura citada

- Anthony, K. R. N. 2016. Coral reefs under climate change and ocean acidification: challenges and opportunities for management and policy. *Annual Review of Environment and Resources*, 41:59–81.
- Bakun, A., B. A. Black, S. J. Bograd, M. García-Reyes, A.J. Miller, R. R. Rykaczewski & W. J. Sydeman. 2015. Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. *Current Climate Change Reports*, (JUNE):85–93.
- Bakun, A., D. B. Field, A. Redondo-Rodríguez & S. J. Weeks. 2010. Greenhouse gas, upwelling–favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*, 16(4):1213–1228.
- Behrenfeld, M. J., R. T. O'Malley, D. A. Siegel, C. R. McClain, J. L. Sarmiento, G. C. Feldman, A. J. Milligan, P. G. Falkowski, R. M. Letelier & E. S. Boss. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120):752–755.
- Capotondi, A., M. A. Alexander, N. A. Bond, E. N. Curchitser & J. D. Scott. 2012. Enhanced upper ocean stratification with climate change in the CMIP3 models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4):1–23.
- Carranza-Edwards, A. 2010. Causas y consecuencias de la erosión de playas. En: A. Yáñez-Arancibia (Ed.) *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 2010.
- Carranza-Edwards, A., L. Rosales Hoz, M. caso Chávez, E. Morales de la Garza, 2004. La Geología ambiental de la zona litoral, p. 573-602. En: M/ Caso, I. Pisanty y E. Excurra (Eds.), *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Instituto Nacional de Ecología SEMARNAT, Instituto de Ecología, A.C., INECOL, Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University Corpus Christi, Vol 1, 626 pp.
- Casas Valdez, M., E. Serviere Zaragoza, D. Lluch Belda, R. Marcos & R. Aguila Ramírez. 2003. Effect of Climatic Change on the Harvest of the Kelp *Macrocystis Pyrifera* on the Mexican Pacific Coast. *Bulletin of Marine Science*, 73(3):545–556.
- CCA (2016). Herramienta para la evaluación rápida de la vulnerabilidad en áreas marinas protegidas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.
- Cheung, W. W., V. W. Lam, J. L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson & D. Pauly. 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10(3):235–251.
- CONABIO. 2009. *Manglares de México: Extensión y distribución*. 2ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 99 pp.
- Di Lorenzo, E. 2015. The future of coastal ocean upwelling. *Nature*, 518(7539):310-311.
- García-Reyes, M. & J. Largier. 2010. Observations of increased wind-driven coastal upwelling off Central California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C04011).
- Gay García C. (Compilador) 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X

Harley, C. D. G., A. R. Hughes, K. M. Hultgren, B. G. Miner, C. J. B. Sorte, C. S. Thornber, L. F. Rodriguez, L. Tomanek & S. L. Williams. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters*, 9:228–241.

Hoegh-Guldberg, O. & J. F. Bruno. 2010. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*, 328(5985):1523–1528.

Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi & M. E. Hatziolos. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857):1737–1742.

Iles, A. C., T. C. Gouhier, B. Menge, J. S. Stewart, A. J. Haupt & M. C. Lynch. 2012. Climate-driven trends and ecological implications of event-scale upwelling in the California Current System. *Global Change Biology*, 19:783–796.

IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

Lara-Lara, J.R., et al. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en: *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 109-134.

Lluch-Cota, S. E., O. Hoegh-Guldberg, D. Karl, H. O. Pörtner, S. Sundby & J. P. Gattuso. 2014. Cross-chapter box on uncertain trends in major upwelling ecosystems. In Field, C., V. Barros, D. Dokken, K. Mach, M. Mastrandrea, T. Bilir, M. Chatterjee, K. Ebi, Y. Estrada, R. Genova, B. Girma, E. Kissel, A. Levy, S. MacCracken, P. Mastrandrea & L. White, editors, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 149–151. Cambridge University Press.

Mendelssohn, R. & F. B. Schwing. 2002. Common and uncommon trends in SST and wind stress in the California and Peru-Chile current systems. *Progress in Oceanography*, 53:141–162.

Moreno-Casasola, P. 2004. Playas y dunas del Golfo de México. Una visión de su situación actual. En: .M. Caso, I. Pisanty y E. Ecurra (comp.). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. SEMARNAT (INE)-INECOL-Harte Research Institute for Gulf of México Studies. 491-520.

Moreno-Casasola, P. & D. Infanta-Mata. 2010. Veracruz. Tierra de ciénagas y pantanos. México : Gobierno del Estado de Veracruz, Secretaría de Educación del Estado de Veracruz, Comisión del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave para la conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución. 412 p.

Narayan, N., P. S. Muiltza & M. Schulz. 2010. Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century. *Ocean Science*, 6:815–823.

Ortíz Pérez, M. A. & A. P. Méndez Linares. 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe, p. 307-320. En: Rivera Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, & F. Rosado May (eds.), 2004. *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.

- Palacios, D. M., S. J. Bograd, R. Mendelsohn & F. B. Schwing. 2004. Long-term and seasonal trends in stratification in the California Current, 1950-1993. *Journal of Geophysical Research*, 109(C10016).
- Patti, B., C. Guisande, I. Riveiro, P. Thejll, A. Cuttitta, A. Bonanno, G. Basilone, G. Buscaino & S. Mazzola. 2010. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> and solar activity on wind regime and water column stability in the major global upwelling areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(1):45–52.
- Rykaczewski, R. R. & D. M. Checkley. 2008. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6):1965–1970.
- SEMARNAP, 2000. Proyecto para la conservación, recuperación, manejo y aprovechamiento sustentable de los pinnípedos. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Instituto Nacional de Ecología. México D.F. Consulta en línea: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/185.pdf>
- Seo, H., K. H. Brink, C. E. Dorman, D. Koracin & C. Edwards. 2012. What determines the spatial pattern in summer upwelling trends on the U.S. west coast? *Journal of Geophysical Research*, 117(C08012).
- Súarez Castillo, A. N. 2011. Bosques de *Sargassum* en el Golfo de California: Estrategias para su conservación y manejo. PhD thesis, Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Teagle, H., S. J. Hawkins, P. J. Moore D. A. Smale. 2017. The role of kelp species as biogenic habitat formers in coastal marine ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology Special Issue*.
- Varela, R., I. Álvarez, F. Santos, M. de Castro & M. Gómez-Gesteira. 2015. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982-2010? *Scientific Reports*, 5(10016).
- Vázquez Botello, A. 2008. Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe final. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. 121 págs.
- Yáñez-Arancibia (Ed.). 2010. Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera. Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, 2010.
- Yáñez-Arancibia, A. & J.W. Day. 2005. Ecosistemas vulnerables, riesgo ecológico y el record 2005 de huracanes en el Golfo de México y Mar Caribe. URL: <http://www.ine.gob.mx/download/huracanes2005.pdf>.



### 3 Evaluación de impactos del cambio climático sobre la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México: estado del arte de la perspectiva jurídica relacionada con las islas, delimitación del área de influencia, y variables a ser consideradas desde el derecho internacional público



Imagen 3-1 Vista panorámica de Isla Clarión, Archipiélago de Revillagigedo, la última frontera de México en el Océano Pacífico. © Archivo GECl / J. A. Soriano.

## 3.1 Introducción

### 3.1.1 Zona Económica Exclusiva y las islas de México

De acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR), los Estados ribereños poseen plena soberanía sobre el espacio denominado Mar Territorial —franja del mar que no excede de 12 millas náuticas—, incluyendo su espacio aéreo, lecho y subsuelo. Más allá de éste, se reconoce un segundo espacio marino conocido como Zona Económica Exclusiva (ZEE), un área en la que el Estado ribereño tiene derechos soberanos relacionados con la explotación de recursos y el ejercicio de jurisdicción. La ZEE se extiende hasta el límite definido por 200 millas náuticas (370,400 metros) mar adentro. Es una franja situada fuera del Mar Territorial y adyacente a éste, en la que la Nación ejerce derechos de soberanía (artículo 46 de la Ley Federal del Mar-LFM; DOF, 1986). Bajo este esquema, en principio, cada elemento del Territorio Insular Mexicano (TIM) cuenta con Mar Territorial, Zona Contigua, Plataforma Insular y Zona Económica Exclusiva —con excepción para esta última de las rocas no aptas para mantener habitación humana o vida económica

propia (artículo 51 de la LFM)—. Estas disposiciones de la Convención están incorporadas en el orden jurídico mexicano en los artículos 27 y 42 desde 1960, fecha en que se reformaron los párrafos cuarto, quinto y sexto del artículo 27, así como los artículos 42 y 48 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF, 1960).

A nivel mundial, México fue uno de los primeros países en adoptar e instituir el concepto de ZEE. De hecho, este concepto de espacio marítimo tiene fuertes raíces latinoamericanas. El Decreto Supremo emitido por Perú el 1 de agosto de 1974 es el primer instrumento legal en Latinoamérica que establece una ZEE de 200 millas náuticas (Méndez Buenos Aires 1977). El año de 1976 resulta relevante en la historia de México con relación a la ZEE, pues es la fecha en que nuestro país la reconoce en su jurisdicción al incorporar el párrafo octavo en el artículo 27 constitucional (DOF 06-02-1976). Esto derivado de la definición adoptada durante la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONFEMAR), realizada el 16 de noviembre de 1973. Pocos días después de esta reforma, el 13 de febrero de 1976, el entonces presidente Luis Echeverría Álvarez, publicó la *“Ley Reglamentaria del Párrafo Octavo del Artículo 27 Constitucional, relativo a la Zona Económica Exclusiva”*. Esta Ley Reglamentaria es la predecesora a la actual Ley Federal del Mar. Finalmente, el 7 de junio de 1976 el mismo presidente Echeverría emitió el “Decreto que fija el límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de México” (Figura 3-2).

<b>Perú 1º de agosto de 1974.</b>	<p><b>Declaración de Perú.</b> Primer instrumento legal en Latinoamérica, que establece ZEE de 200 millas náuticas.</p>
<b>México 26 de enero de 1976.</b>	<p><b>Adición al artículo 27 de la Constitución Política Mexicana.</b> México reconoce en su jurisdicción la ZEE, al incorporar el párrafo octavo en el artículo 27 constitucional.</p>
<b>D.O.F. 13 de febrero de 1976.</b>	<p><b>Ley Reglamentaria del Párrafo Octavo del Artículo 27 Constitucional, relativo a la zona económica exclusiva.</b> Ley que se facultó para regular, el párrafo 8º del artículo 27 de la CPEUM.</p>
<b>D.O.F. 7 de junio de 1976.</b>	<p><b>Decreto de Secretaría de Marina.</b> Decreto que fija el límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de México.</p>
<b>Bahía Montego, Jamaica, 10 de diciembre de 1982.</b>	<p><b>Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.</b> Tratado multilateral, considerado la Constitución de los océanos, dentro del cual en su artículo 55 contempla la figura de la ZEE.</p>
<b>D.O.F. 8 de enero 1986.</b>	<p><b>Ley Federal del Mar.</b> La cual procura regular todo lo relativo a los océanos, basado en la CONVEMAR.</p>

Figura 3-1 Evolución en el marco legal, sobre la implementación de la figura ZEE.

Dentro de su ZEE, México ejerce derechos de soberanía para los fines de exploración y explotación, conservación y administración de los recursos naturales, tanto vivos como no vivos, ya sean renovables o no renovables, del lecho y el subsuelo del mar y de las aguas suprayacentes. Igualmente, México tiene derechos soberanos en la ZEE con respecto a otras actividades con miras a la exploración y explotación económica, tal como la producción de energía derivada del agua, de las corrientes y de los vientos. Destaca también la riqueza petrolera y de minerales conocida, y la que aún falta por explorarse y descubrirse. Además, en la ZEE la nación ejerce jurisdicción con respecto al establecimiento y utilización de islas artificiales, instalaciones y estructuras, a la investigación científica marina, y a la

protección y preservación del medio marino. También gracias a su ZEE, México captura de manera sustentable más de 100 mil toneladas métricas de atún aleta amarilla cada año con una gran flota industrial, equivalente a un tercio del total de las capturas de esta especie en el océano Pacífico oriental (CANTIM 2012).

**Lunes 7 de junio de 1976    DIARIO OFICIAL    3**

---

pueda ejercer las funciones de Cónsul General de Primera de Guatemala en la ciudad de México, Distrito Federal.

Dado en la ciudad de México, firmado de mi mano, autorizado con el Gran Sello de la Nación, refrendado por la Secretaría de Relaciones Exteriores y registrado bajo el número veinte, a fojas veinticinco del libro correspondiente, el veintisiete de octubre de mil novecientos setenta y cinco.—El Secretario de Relaciones Exteriores, **Emilio O. Rabasa**.—Rúbrica.

---

**SECRETARIA DE MARINA**

**DECRETO que fija el límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de México.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.—Presidencia de la República.

**DECRETO QUE FIJA EL LIMITE EXTERIOR DE LA ZONA ECONOMICA EXCLUSIVA DE MEXICO**

**LUIS ECHEVERRIA ALVAREZ**, Presidente Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, en ejercicio de la facultad que me confiere la fracción I del Artículo 89 Constitucional y con fundamento en los artículos 2o y 3o, de la Ley Reglamentaria del Párrafo Octavo del Artículo 27 Constitucional, relativo a la Zona Económica Exclusiva y

I.—En el Océano Pacífico:

LATITUD			LONGITUD		
Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
32	35	22.11	117	27	49.42
32	35	21.	117	28	4.
32	35	32.	117	29	06.
32	37	37.	117	49	31.
32	17	22.	117	59	41.
32	01	52.	118	07	16.0
31	32	58.	118	19	46.

Figura 3-2. Sección de la primera página del Decreto que fija el límite exterior de la Zona Económica Exclusiva de México, publicado en el Diario Oficial de la Federación el lunes 7 de junio de 1976.

Las islas juegan un papel preponderante en la delimitación de la ZEE (Parte VIII. Régimen de las Islas, CONVEMAR). Las islas de México no son la excepción, pues en especial gracias a sus islas remotas, nuestro país tiene una ZEE de 3,188,031 km<sup>2</sup>, superficie bastante mayor que el propio territorio continental mexicano de 1,964,375 km<sup>2</sup> (González Avelar 1997; CANTIM 2012). En el Océano Pacífico, las islas Guadalupe, Socorro y Clarión —estas últimas parte del Archipiélago de Revillagigedo—, contribuyen con 1.1 millones de kilómetros cuadrados, es decir, el 34.9% de la superficie total de la ZEE. De hecho, la superficie de ZEE generada por cada isla remota equivale a todo el territorio del estado de Sonora. Por su parte, en el Golfo de México, Arrecife Alacranes y Cayo Arenas contribuyen con 0.5 millones de kilómetros cuadrados, es decir, el 15.1% del total. Es así que estos cuatro grupos de islas aportan prácticamente la mitad de la extensión territorial de nuestra ZEE. Por ende, son sitios de gran valor estratégico para nuestro país, especialmente en términos de soberanía territorial (Figura 3-3).



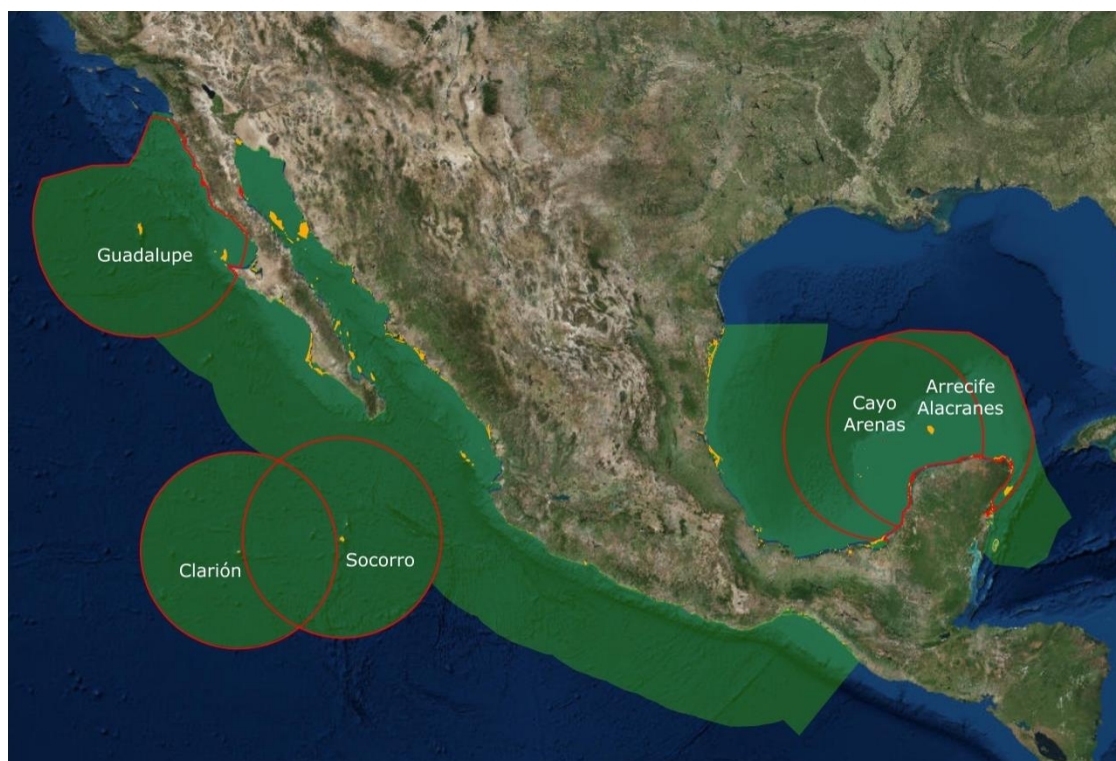


Figura 3-3. Representación gráfica que muestra la contribución de las islas Guadalupe, Clarión y Socorro, así como de los arrecifes Cayo Arenas y Alacranes, a la Zona Económica Exclusiva de México (elaboración propia), con base en el método de arcos de circunferencia (Kastrisios 2014 y Gómez-Robledo Verduzco 2016, presentan información sobre el método).

El 2 de marzo de 1909, Porfirio Díaz decidió plantear que se resolviera el conflicto sobre la soberanía de la Isla Clipperton, también conocida como Isla de la Pasión, bajo un arbitraje internacional. Con una resolución que ha sido repetidamente cuestionada, México perdió una isla que pudo proporcionar una extensa ZEE adicional a nuestro país, ubicada en el Océano Pacífico norte (Laudo Arbitral, 1931), frente a Acapulco. El árbitro elegido para el asunto Clipperton fue el rey de Italia S.M. Victor-Emmanuel III. De hecho la sentencia quedó pendiente por muchos años y no fue dictada sino hasta el 28 de enero de 1931, cuando Victor-Emmanuel III decidió resolver que la soberanía sobre la Isla de Clipperton debiera pertenecer a Francia desde el 17 de noviembre de 1858. Además de perder la isla y la extensa ZEE correspondiente, México tiene ahora la ominosa presencia territorial de una potencia frente a su territorio continental.

Poco se conocía de la isla Clipperton o Isla de la Pasión antes de la controversia por su soberanía, como señala Miguel González Avelar:

*“Seguramente los mexicanos de principios del siglo buscaron a Clipperton en los mapas y muchas veces no pudieron hallarla; 9 de aquí surge una primera lección: ningún libro de geografía que muestre el territorio nacional*

*debería omitir la representación de nuestras islas; porque no son fragmentos prescindibles del Estado, ni partículas de soberanía desbalagadas sobre las aguas, sino parte integral del todo nacional.”*

Actualmente Clipperton pertenece a Francia, gracias a lo cual esta nación cuenta con la soberanía de los recursos naturales que ahí se encuentran (Figura 3-4). Aunado a ello, después de la III CONFEMAR, Francia reclamó sobre la misma espacios marinos correspondientes, como lo fue la Zona Económica Exclusiva (Hernández Martínez *et. al.*, 2015). Es importante que, al ser evaluada la petición de Francia respecto a la ZEE, sobre la isla Clipperton, sean considerados dos puntos: la isla se encuentra deshabitada, y no cuenta con posibilidades de sostener a la población por ella misma, requisitos que de manera ambigua, se encuentran estipulados en la CONVEMAR, en su artículo 121 fracción III<sup>1</sup>, a pesar de referirse específicamente a la figura de roca, deja ver, la importancia, de que dicha figura pudiera ofrecer habitación humana o vida económica propia.



Figura 3-4. Zona Económica Exclusiva de México, en verde, y Zona Económica Exclusiva de Francia alrededor de la isla Clipperton, en azul. La pérdida de esta isla representó para México una superficie de 435,657 km<sup>2</sup> de superficie marina.

<sup>1</sup> CONVEMAR art. 121, fracción 3. Las rocas no aptas para mantener habitación humana o vida económica propia no tendrán zona económica exclusiva ni plataforma continental.

Otro caso en el que, a diferencia del de Clipperton, México resulto victorioso, está vinculado a la famosa ley del guano de los Estados Unidos de Nortamérica, conocida como “*Guano Act*”. Ésta fue expedida en 1856, y estipulaba que cualquier ciudadano estadounidense que descubriera una isla guanera que no perteneciera, o que no pareciera pertenecer a otro país, podía ser registrada en el Departamento de Estados Unidos, quedando entonces desde ese momento como pertenencia propia, bajo la protección del gobierno de los EE. UU.A (González Avelar 1997).

Lo anterior beneficio en gran medida a Estados Unidos, ya que con esta Ley logró adquirir 80 islas a su jurisdicción, dentro de las cuales se encontraba Cayo Arenas y Arrecife Alacranes. Éstas fueron registradas en el Departamento de Estado como islas vacantes, por lo cual cumplían con los términos de la Guano Act. Afortunadamente, gracias a las gestiones del secretario Ignacio Mariscal, México logró que EE. UU. eliminara estas islas de su listado, saliendo así de la soberanía estadounidense y pasando a ser parte incontrovertible de México. Es gracias a esta atinada y oportuna intervención del gobierno mexicano por defender sus valiosas islas, que al día de hoy contamos con una ZEE mayor en el Golfo de México.

### 3.1.2 Impactos del aumento del nivel del mar en las islas de México

En México, 149 islas que componen el 0.2% del territorio nacional, alojan el 8% de todas las especies de vertebrados y plantas vasculares del país, de las cuales 300 son endémicas y un 10% está considerado como vulnerable en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Aguirre Muñoz et al. 2008; CONABIO 2007; Latofski-Robles et al. 2014). El Territorio Insular Mexicano se caracteriza por albergar numerosas especies endémicas, así como por poseer una gran variedad de hábitats en los que convergen especies marinas y terrestres. Entre los cuerpos insulares que destacan por su riqueza de especies se encuentran: Clarión, Cozumel, Banco Chinchorro, Arrecife Alacranes y Espíritu Santo. Es por ello de vital importancia el estudio en cuanto a la afectación del cambio climático al Territorio Insular Mexicano, ya que de las islas depende gran parte de la biodiversidad del País.

Las diferentes características geomorfológicas y oceanográficas hacen a ciertas islas susceptibles a los impactos del cambio climático. En la actualidad existe una clara evidencia de que los cambios climáticos recientes han afectado a una amplia gama de organismos con diversa distribución geográfica (Walther et al. 2002). El aumento del nivel del mar es una de las principales consecuencias del cambio climático (Nichols 2010), reconociéndose que sus efectos son identificables con claridad (Nichols et al. 2007 y Nichols 2015): inmersión total o un incremento en las inundaciones de la costa; pérdida o cambios en hábitats como humedales o manglares (incluso islas); erosión costera; e intrusión de agua salina sobre las aguas superficiales y los mantos acuíferos.

Los resultados obtenidos por Aguirre Muñoz et al. (en revisión), indican que un aumento del nivel del mar tiene un impacto significativo en la superficie insular, así como en las especies y en los ecosistemas asociados a las islas. Dichos resultados obtenidos a través de la simulación de diferentes escenarios de elevación del nivel del mar sobre 28 cuerpos insulares, nos dicen que, a nivel nacional, 2.1%, 5.2% y 8.7% de la superficie insular quedaría completamente sumergida ante escenarios de aumento del nivel

del mar de 1 m, 3 m y 5 m, respectivamente. Ante el escenario más extremo de 5 m, Isla del Carmen y las cuatro islas que integran el Arrecife Alacranes prácticamente desaparecerían (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 3-5).

Cuadro 3-1. Superficie insular perdida (en hectáreas) para cada una de las islas estudiadas ante un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m. Los números en paréntesis corresponden al porcentaje (%) de pérdida con relación a la superficie original de cada una de las islas.

Isla o grupo de islas	Superficie insular perdida ha (%)		
	1m	3m	5m
Arrecife Alacranes	43.5 (39.7)	94.2 (85.9)	109.7 (100.0)
Del Carmen	2615.3 (20.4)	6504.2 (50.8)	10735.8 (83.9)
Mujeres	35.2 (6.6)	147.2 (27.5)	322.7 (60.4)
San Benito Medio	7.7 (8.8)	29.8 (33.7)	47.9 (54.3)
Rasa	12.5 (18.5)	27.2 (40.2)	35.9 (53.1)
Banco Chinchorro	32.4 (5.3)	92.5 (15.1)	292.0 (47.7)
Larga	16.1 (21.1)	27.2 (35.5)	36.1 (47.2)
Isabel	13.7 (13.0)	25.3 (24.0)	39.7 (37.6)
San Benito Oeste	10.2 (2.1)	52.9 (11.1)	99.0 (20.7)
San Benito Este	8.4 (4.2)	24.7 (12.5)	39.5 (20.0)
Redonda	1.6 (4.5)	4.5 (12.5)	7.1 (19.6)
Cozumel	1279.0 (2.7)	3726.9 (7.8)	7399.0 (15.4)
San Juanico	18.6 (2.0)	48.0 (5.1)	113.7 (12.1)
Clarión	71.4 (3.4)	136.2 (6.4)	212.7 (10.0)
Danzante	9.8 (2.4)	25.1 (6.2)	37.2 (9.1)
San Benedicto	19.0 (2.8)	39.7 (5.9)	56.7 (8.4)
Complejo Insular Espíritu Santo	155.4 (1.5)	524.7 (5.0)	852.2 (8.0)
Carmen	519.3 (3.5)	811.4 (5.4)	997.4 (6.7)
Coronado	9.3 (1.2)	26.7 (3.4)	50.8 (6.5)
María Cleofas	27.4 (1.3)	68.7 (3.3)	121.0 (5.9)
María Magdalena	67.8 (1.0)	177.4 (2.5)	280.0 (4.0)
Montserrat	14.0 (0.7)	39.3 (2.1)	63.5 (3.4)
Socorro	130.7 (1.0)	278.7 (2.0)	424.0 (3.1)
Cedros	388.4 (1.1)	789.5 (2.2)	1054.6 (2.9)
Guadalupe	191.4 (0.8)	489.8 (1.9)	693.8 (2.8)
Tiburón	964.5 (0.8)	2113.2 (1.8)	3171.0 (2.6)



<b>Santa Catalina</b>	26.2 (0.6)	53.5 (1.3)	99.8 (2.4)
<b>María Madre</b>	63.8 (0.4)	157.9 (1.1)	281.5 (1.9)
<b>Total</b>	6752.6 (2.1)	16536.4 (5.2)	27674.1 (8.7)

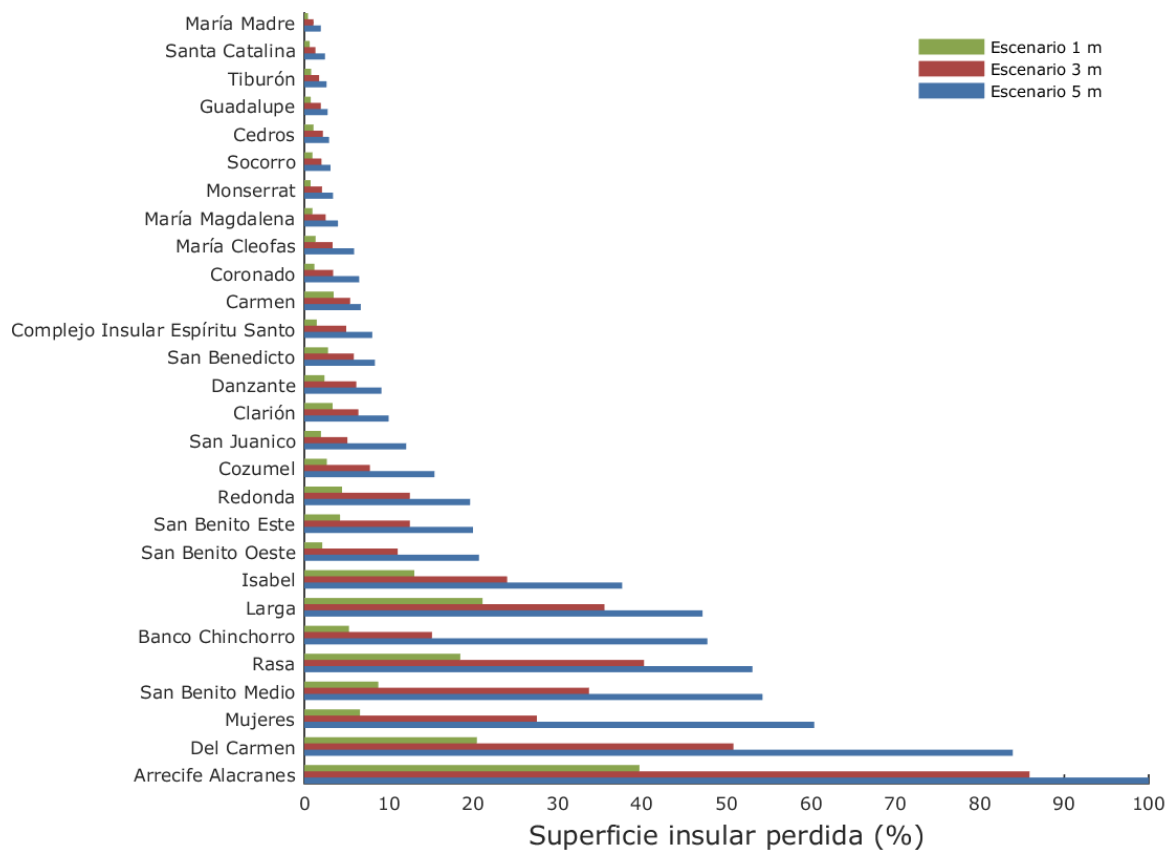


Figura 3-5. Porcentaje de la superficie insular perdida debido a un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m tomado de Aguirre Muñoz et al. (en revisión).

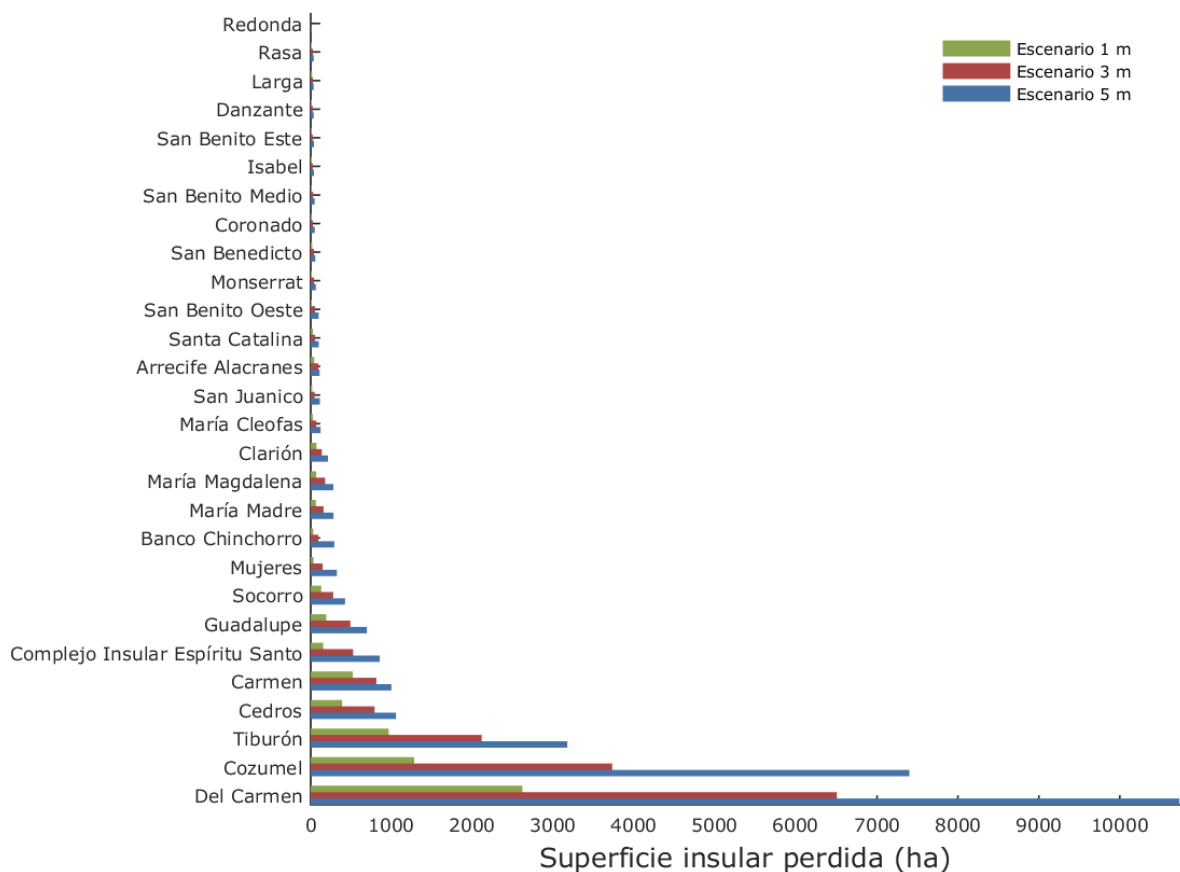


Figura 3-6. Superficie insular perdida en hectáreas debido a un aumento del nivel del mar de 1 m, 3 m y 5 m tomado de Aguirre Muñoz et al. (En revisión).

Para el presente informe, se llevó a cabo un estudio sobre los medios legales aplicables para la zona económica exclusiva (ZEE), dentro del Derecho Internacional. Este trabajo tiene como objetivo el responder las siguientes tres preguntas: (1) ¿Cuáles son las islas que contribuyen de manera crítica a la zona económica exclusiva?; (2) ¿Qué pasaría con la ZEE, si se llegaran a perder alguna de las islas que contribuyen a la ZEE?; y (3) ¿Existen mecanismos de defensa ante esa situación?

## 3.2 Zona Económica Exclusiva: contexto jurídico nacional e internacional

### 3.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

El 6 de febrero de 1976, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la adición al artículo 27 constitucional, donde se estipuló la figura de la ZEE, como a continuación se transcribe:

*“[...] La Nación ejerce en una zona económica exclusiva situada fuera del mar territorial y adyacente a éste, los derechos de soberanía y las jurisdicciones que determinen las leyes del Congreso. La zona económica exclusiva se extenderá a doscientas millas náuticas, medidas a partir de la línea de base desde la cual se mide el mar territorial. En aquellos casos en que esa extensión produzca superposición con las zonas económicas exclusivas de otros Estados, la delimitación de las respectivas zonas se hará en la medida en que resulte necesario, mediante acuerdo con estos Estados. [...]”.*

A partir de dicha definición de ZEE, puede considerarse que al perder Arrecife Alacranes y Cayo Arenas, México dejaría de contar con esa línea de base, por lo que estaríamos ante el supuesto de pérdida de superficie marina en el Golfo de México (Figura 3-7).

### 3.2.2 Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (DOF, 1983), es un tratado internacional que entró en vigor el 16 de noviembre de 1994. Éste brinda un marco de regulación para el buen uso de los mares y océanos del mundo, con el objetivo de asegurar la conservación y disposición equitativa de los recursos del medio marino.

Los Estados Partes de la CONVEMAR, al haber firmado dicho tratado están obligados a regularse por este instrumento jurídico. De no hacerlo de esta forma un Estado Parte, se entendería como una violación a la Ley Internacional. Afirmando que las normas y principios de derecho internacional general seguirán rigiendo las materias no reguladas por la CONVEMAR, México lo firmó el 10 de diciembre de 1982 y lo ratificó el 18 de marzo de 1983.

Los Estados Partes de la CONVEMAR, al haber firmado dicho tratado están obligados a regularse por este instrumento jurídico. De no hacerlo de esta forma un Estado Parte, se entendería como una violación a la Ley Internacional. En la actualidad existen algunos países, que aún no son parte de la CONVEMAR, tal es el caso, de E.U.A., y de acuerdo a la Convención de Viena, en su artículo 34, se establece que, *“un tratado no crea obligaciones ni derechos para un tercer Estado o una tercera organización sin el consentimiento de ese Estado o de esa organización, siguiendo esa lógica, se entendería que E.U.A. no se encuentra obligado a regirse por la CONVEMAR. Sin embargo, existe una excepción a dicho artículo, y es el principio de "gestión de intereses comunes por Estados suficientemente representativos" (Pastor Ridruejo, 2009), lo cual consiste, que el derecho internacional, es oponible a terceros, de acuerdo a la relevancia del tema”*, contemplando con ello, que algunas situaciones regulables por el Derecho Internacional poseen una importancia singular para una

cantidad representativa de sujeto, un número suficientemente amplio para presumir que la situación es igualmente importante para todos los sujetos (Sebastián Matos), siendo estos Parte o no del tratado, es por lo anterior que la CONVEMAR, es reconocida como la Constitución del Mar. Afirmando que, las normas y principios de derecho internacional general seguirán rigiendo las materias no reguladas por la CONVEMAR. En el caso de México, lo firmó el 10 de diciembre de 1982 y lo ratificó el 18 de marzo de 1983.

Así, el marco legal de la ZEE en México se rige por la CONVEMAR, en la cual dentro de su capítulo V, se estipulan 20 artículos relacionados a: derechos y deberes de otros Estados en la ZEE; base para la solución de conflictos relativos a la atribución de derechos y jurisdicción en la zona económica exclusiva; islas artificiales, instalaciones y estructuras en la ZEE; conservación de los recursos vivos; utilización de los recursos vivos; poblaciones que se encuentren dentro de las ZEE de dos o más Estados ribereños, o tanto dentro de la ZEE como en un área más allá de ésta y adyacente a ella; especies altamente migratorias; mamíferos marinos; poblaciones anádromas; especies catádromas; especies sedentarias; derecho de los Estados sin litoral; derecho de los Estados en situación geográfica desventajosa.

En caso de existir conflictos relativos a la atribución de derechos y jurisdicción en la ZEE, el artículo 59 de la CONVEMAR establece lo siguiente:

*[...] “En los casos en que esta Convención no atribuya derechos o jurisdicción al Estado ribereño o a otros Estados en la zona económica exclusiva, y surja un conflicto entre los intereses del Estado ribereño y los de cualquier otro Estado o Estados, el conflicto debería ser resuelto sobre una base de equidad y a la luz de todas las circunstancias pertinentes, teniendo en cuenta la importancia respectiva que revistan los intereses de que se trate para las partes, así como para la comunidad internacional en su conjunto.”*

### **3.2.2.1 Mecanismo para la solución obligatoria de controversias relativas a la CONVEMAR**

Dentro de la Convención, se establece un mecanismo para la solución obligatoria de las controversias relativas a la interpretación o la aplicación de sus disposiciones, y establece el Tribunal Internacional del Derecho del Mar como foro central para la solución pacífica de las controversias relativas al derecho del mar. El Tribunal Internacional del Derecho del Mar es, entonces, un órgano judicial independiente. Es competente para resolver todas las controversias que se susciten, en cuanto a la interpretación o la aplicación de la Convención. Dentro de estas controversias se encuentran las relativas a la delimitación de las zonas marítimas, la navegación, la conservación y ordenación de los recursos vivos del mar, la protección y preservación del medio marino y la investigación científica (Gómez-Robledo Verduzco, 2016).

### 3.2.3 Ley Federal del Mar

El 8 de enero de 1986, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la Ley Federal del Mar (DOF, 1986), la cual dentro de su articulado, contempla los derechos y jurisdicción con los que cuenta México dentro de su ZEE. Asimismo hace alusión de la ZEE de la cual gozan las islas, siempre y cuando éstas sean aptas para mantener habitación humana o vida económica propia, dentro de los artículos que se transcriben a continuación.

*Artículo 46.- La nación ejerce en una Zona Económica exclusiva situada fuera del Mar Territorial y adyacente a éste:*

*I. Derechos de soberanía para los fines de exploración y explotación, conservación y administración de los recursos naturales [...].*

*II. Jurisdicción, con relación a las disposiciones pertinentes de esta Ley [...].*

*Artículo 50.- La Zona Económica Exclusiva Mexicana se extiende a 200 millas marinas (370,400 metros) contados desde las líneas de base a partir de las cuales, de conformidad con el artículo 26 de esta Ley, se mide la anchura del Mar Territorial.*

*Artículo 51.-Las islas gozan de zona económica exclusiva pero no así las rocas no aptas para mantener habitación humana o vida económica propia.*

### 3.2.4 Ley General de Bienes Nacionales

El 20 de mayo de 2004, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley General de Bienes Nacionales (DOF, 2004), de acuerdo al artículo 3º fracción I, se contempla como bienes de la nación, lo estipulado dentro del artículo 42 fracción IV, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF, 1917), el cual establece:

*Artículo 42. El territorio nacional comprende:*

*II. El de las islas, incluyendo los arrecifes y cayos en los mares adyacentes;*

*III. El de las islas de Guadalupe y las de Revillagigedo situadas en el Océano Pacífico;*

*IV. La plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas, cayos y arrecifes;*

*V. Las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fija el Derecho Internacional y las marítimas interiores; [...].*

Las islas, además de brindar una valiosa ZEE, son bienes nacionales dentro del régimen de dominio público de los bienes de la Federación.

### 3.2.5 Tratados y acuerdos con Estados vecinos

México cuenta con diversos Tratados y Acuerdos internacionales, vinculados a la ZEE, los cuales buscan establecer conforme al derecho internacional, el límite de la plataforma continental entre Estados como los son: Honduras, Estados Unidos de Norteamérica y Cuba. En algunos casos se da prioridad a la cooperación internacional, tanto a nivel bilateral y regional, en objetivos tales como el desarrollo y adopción de medidas equitativas de prevención, atención y mitigación ante eventuales contingencias ambientales. A continuación se presenta un resumen sobre dichos tratados.

**Cuadro 3-2. Resumen de los Tratados y Acuerdos internacionales firmados por México relacionados con los objetivos de la CONVEMAR.**

Fecha	Tratado	Resumen / Objetivo
<b>22 de marzo de 2001</b>	Tratado sobre la Delimitación de la Plataforma Continental en la Región Occidental del Golfo de México.	Establecer el límite de la plataforma continental entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, en la región occidental del Golfo de México, más allá de las 200 millas náuticas contadas desde las líneas de base a partir de las cuales se mide la anchura del mar territorial.
<b>29 de noviembre de 2005</b>	Tratado de delimitación marítima entre los Estados Unidos mexicanos y la República de Honduras.	Se realizó con la finalidad de lograr una solución equitativa, en busca de una negociación sobre los límites de sus respectivas ZEE.
<b>18 de enero de 2017</b>	Tratado entre los Estados Unidos mexicanos y la República de Cuba sobre la delimitación de la plataforma continental en el polígono oriental del Golfo de México.	El Gobierno de México y el Gobierno de Cuba convienen en establecer, con base en el principio de la equidistancia, la línea divisoria entre la Zona Económica Exclusiva de México y la que será la Zona Económica Exclusiva de Cuba (o su equivalente).

### 3.3 Resultados

De acuerdo con Aguirre Muñoz et al. (en revisión), sólo ante un escenario de 5 m de elevación del nivel del mar, la superficie completa de Arrecife Alacranes se pierde, es decir, la islas quedan completamente sumergidas. Lo cual no ocurre ante los escenarios de 1 y 3 metros, que aunque se pierde un gran porcentaje del Arrecife, este no queda completamente inundado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 3-5 y Figura 3-6). Con lo que, ante escenarios de 1 y 3 metros de elevación del nivel del mar la ZEE quedaría de la manera en la que se encuentra actualmente. Algo similar a lo que ocurre con el Arrecife Alacranes ocurre en Cayo Arenas, debido a que comparten características geomorfológicas. Esto, evidentemente, tiene repercusiones tanto en la delimitación como en la superficie de la ZEE de México. Es así que en este caso México perdería 146,735.27 km<sup>2</sup> de ZEE en el Golfo de México, lo que representa el 17.2% del total para esta región, así como el 4.3% del total de la superficie de la ZEE de la nación (Figura 3-7).

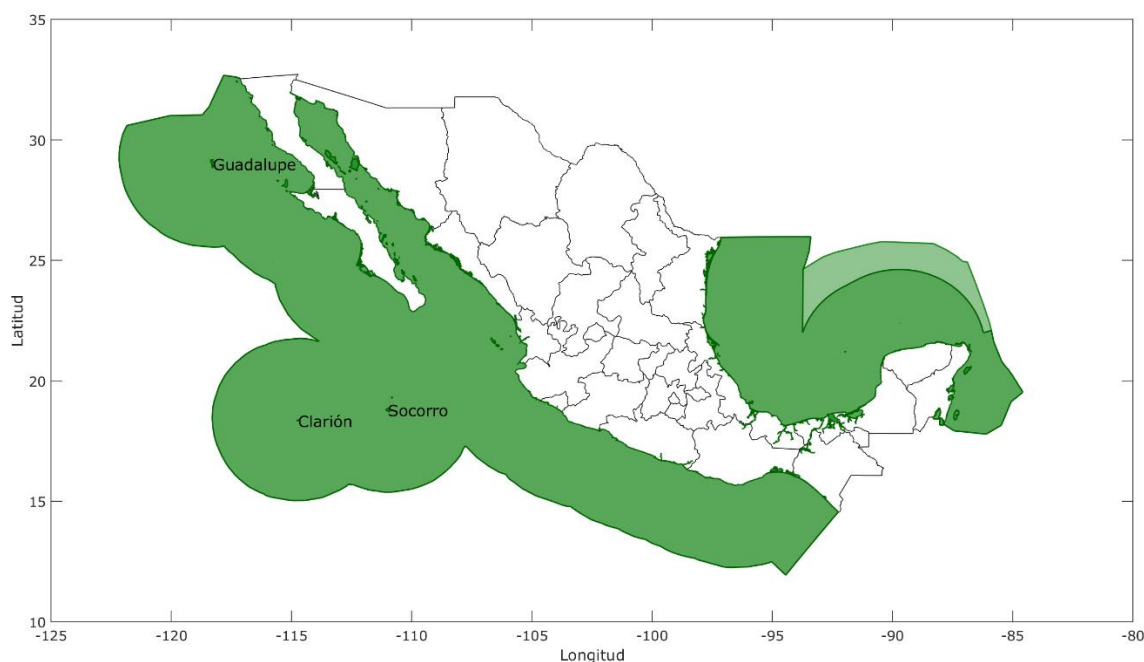


Figura 3-7. Representación gráfica de la pérdida de superficie de Zona Económica Exclusiva en el Golfo de México, ante la pérdida de Arrecife Alacranes y Cayo Arenas debido a una elevación del nivel del mar de 5 metros. El color verde claro representa la ZEE original, mientras que el color verde oscuro muestra la configuración de la ZEE tras el impacto del cambio climático.

Partiendo del análisis de los diferentes instrumentos jurídicos vigentes, se hacen las siguientes observaciones:

- En la actualidad no hay mecanismos de defensa claros para la protección de la soberanía de la ZEE, en caso de pérdida de territorio desde el cuál ésta se proyecta. No hay aún literatura disponible que trate el tema de manera específica.
- El derecho internacional es estricto en cuanto a la definición sobre la figura de la ZEE, más no contempla diversas eventualidades, que se pudieran suscitar de manera natural en la actualidad, sobre todo por los efectos de la elevación del nivel del mar como consecuencia del cambio climático global.
- Es indispensable reforzar la legislación sobre Derecho del Mar, tanto a nivel nacional como internacional, para que se prevean de manera incluyente todos los impactos del cambio climático, como es el tema de los efectos sobre la ZEE.
- Las islas juegan un papel preponderante en la delimitación de la ZEE de México. Ello se debe de dar a conocer de manera amplia, para con esto impulsar la concientización sobre su importancia y cuidado.
- Es necesario reconocer a las islas como las fronteras internacionales abiertas que son y prioritarias para la soberanía de la nación. A partir de dicho reconocimiento, se impone en consecuencia desarrollar políticas públicas con ese enfoque preciso: salvaguardar la soberanía territorial de México.



### 3.4 Literatura Citada

Aguirre Muñoz, A., F. Méndez Sánchez, D. Munguía Cajigas, Y. Lora Cabrera, D. Martínez Cervantes, A. Cárdenas Tapia, B. Arellano Nava, B. Rojas Mayoral y E. Rojas Mayoral. (En revisión). Impacts of sea level rise on Mexico's islands. Manuscrito sometido a revisión a la Revista *Atmósfera*. Abril de 2017.

Aguirre Muñoz, A., R. Mendoza Alfaro et al. (2009). Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía, en *Capital natural de México*, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 277-318.

CANTIM (Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano). (2012). *Estrategia Nacional para la Conservación y el Desarrollo Sustentable del Territorio Insular Mexicano*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Gobernación, Secretaría de Marina-Armada de México y Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A.C. México, D.F. y Ensenada, B.C. 125 pp.

CONABIO. (2007). *Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas*. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy-Programa México, Pronatura, A.C.

DOF (1917). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Diario Oficial de la Federación, 5 de febrero de 1917. México, D.F.

DOF (1983). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*. Diario Oficial de la Federación, 1 de junio de 1983. México, D.F.

DOF (1986). *Ley Federal del Mar*, Diario Oficial de la Federación. Diario Oficial de la Federación, 9 de enero de 1986. México, D.F.

DOF (2004). *Ley General de Bienes Nacionales*. Diario Oficial de la Federación, Diario Oficial de la Federación, 20 de mayo de 2004. México, D.F.

Gómez-Robledo Verduzco, A. (2016). Apuntes sobre delimitación en derecho internacional del mar. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional*, XVI: 255-300.

González Avelar, M. (1997). El territorio insular como frontera. *Frontera Norte*, 9 (17): 161-169.

Kastrisos, C. (2014). *Methods of Maritime Outer Limits Delimitation. PART E: Marine Sciences and Naval Operations*. Nausivos Chora. Vol. 5.2014. Hellenic Naval Academy. E-3-E-22.

Latofski-Robles, M., Aguirre-Muñoz, A., Méndez-Sánchez, F., Reyes-Hernández, H. & Schlüter, S. (2014). Prioritizing restoration actions for the islands of México. *Monographs of the Western North American Naturalist*, 7, 435-441.

Laudo Arbitral del Rey de Italia Víctor Manuel III, sobre la soberanía Isla Clipperton, entre los Estados Unidos Mexicanos y la República Francesa. (1931).

Marineregions.org. (2016). World Economic Exclusive Zone. Obtenido de: <http://www.marineregions.org/eezdetails.php?mrgid=8429&zone=eez>

Méndez Buenos Aires, M. A. (1977). La zona económica exclusiva de México y la zona de conservación de pesca de los Estados Unidos de América. Proyecto de Derecho del Mar, Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Nicholls, R. J., (2015). Adapting to Sea Level Rise. In: *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters* (Shroder, J. F., J. T. Ellis, and D. J. Sherman, Eds.). Elsevier, Boston, USA, 243 – 270.

Nicholls, R. J. and A. Cazenave, (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* 328(5985), 1517–1520.

Nicholls, R. J., P. P. Wong, V. Burkett, J. Codignotto, J. Hay, R. McLean, S. Ragoonaden, and C. D. (2007). Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Parry, M., O. Canziani, J. Palutikof, P. van der Linden, and C. Hanson, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315–356.

Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395.

## 4 Bases para formular un Programa Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático para el Territorio Insular Mexicano



Imagen 4-1 Vista panorámica de isla María Cleofas, parte del archipiélago Marias, en el Océano Pacífico, frente a las costas de Nayarit. © Archivo GECI / J. A. Soriano.

### 4.1 Bases

Las islas de México representan un territorio con una gran vocación natural para la colaboración internacional en cuanto al tema de adaptación y mitigación al cambio climático. Destaca en particular lo tocante al manejo sustentable de recursos naturales y conservación de la biodiversidad. Esto se debe a que los territorios insulares de nuestro país constituyen estaciones a lo largo de grandes corredores marinos que trascienden las fronteras nacionales, ofreciendo sitios vitales para garantizar el ciclo de vida de muchas especies marinas compartidas por varios países, así como los ecosistemas que los sustentan. En particular, las islas y archipiélagos de vastas regiones de todos los mares de México — Corriente de California, Golfo de California, Pacífico Tropical Oriental, Golfo de México y Caribe— tienen una fuerte conectividad —en no pocas ocasiones aun estando a miles de kilómetros de distancia— con islas de otros países, por lo que no ha dejado de señalarse desde hace tiempo la necesidad de actuar bajo esquemas de cooperación internacional (Jessen and Ban 2003; Jessen *et al.*, 2016; Sullivan and Bustamante 1999; Spalding *et al.* 2007).

Los medios físicos que permiten la conectividad entre las islas son las corrientes marinas y el aire, y los vectores que destacan en esta conectividad de gran escala geográfica son las especies migratorias —en especial las aves marinas y los pinnípedos—, así como una variedad de peces e invertebrados marinos. Algunas aves terrestres, si bien no tienen una dependencia total de las islas para su

reproducción, también las usan como sitios de descanso en sus migraciones distantes estacionales, sobre todo entre el norte y el sur, atravesando por varios países; para el caso de México esto ocurre sobre todo en las islas del Caribe.

Para su conservación, las aves marinas dependen totalmente de las islas, pues éstas son sus únicos sitios de reproducción y anidación. Lo mismo se da con los pinnípedos —lobos marinos, focas, elefantes marinos— que, frente a la destrucción de hábitats e intensas actividades humanas en las costas continentales, tienen en las islas también los últimos resquicios como sitios de descanso, reproducción y crianza.

Las extensas ecorregiones marinas donde se encuentran las islas —los mares que las circundan—, a su vez son las áreas de forrajeo de algunas de estas especies, o bien, de especies con ciclos de vida cuyos diferentes estadios tienen muy amplias distribuciones geográficas. Se complementa así otra función esencial —la de la alimentación— con la de anidación de aves marinas, o sitios de reproducción y crianza para el caso de las colonias de pinnípedos, y de hábitat para diversas fases del ciclo de vida en el caso de peces e invertebrados marinos.

En especial varias especies de aves marinas y pinnípedos presentan una serie de ventajas —tamaño de los individuos y las poblaciones, accesibilidad, distribución, conocimiento acumulado sobre historia de vida y manejo— para definir indicadores, tanto de salud ambiental como de desempeño con relación a objetivos y acciones de colaboración internacional cuyo objetivo sea la conservación de la biodiversidad a gran escala geográfica. Entre estas especies encontramos precisamente aquellas que pueden ser definidas como especies focales o sombrilla (Roberge and Stam, 2004), es decir, aquellas que, por sus características e historia natural, al ser conservadas protegen a otras con las cuales comparten hábitats.

En este caso se trata de integrar una visión y las bases para un programa de trabajo que permita incidir en medidas de manejo internacional a favor de la mitigación y adaptación al cambio climático en territorios insulares en regiones multinacionales de las que México es parte. De esta manera, por las características de sus historias naturales, se trata de identificar con precisión a las especies de aves marinas y pinnípedos que nos pueden informar acerca del estado de salud ambiental de toda una ecorregión marina que abarca a varios países. Se anticipa que este objetivo es alcanzable a través del conocimiento de la dinámica de las poblaciones de las especies seleccionadas y la relación que éstas guardan con los parámetros ambientales generales, así como con las condiciones y amenazas específicas de sitios clave, con énfasis en el cambio climático y sus impactos en los ecosistemas marinos.

## 4.1.1 Instrumentos

### 4.1.1.1 Antecedentes y justificación

El 9 de mayo de 1992, fue creada la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual está basada en la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Para su elaboración, la CMNUCC contempló la resolución 44/206 de la Asamblea General, de fecha 22 de diciembre de 1989, la cual vislumbra los posible efectos adversos del ascenso del nivel del mar sobre las islas y las zonas costeras, especialmente las zonas costeras bajas. Asimismo, durante 1997, se aprobó un anexo relevante de la Convención, conocido como Protocolo de Kioto, el cual tiene como objetivo lo estipulado en el artículo 2° de la CMNUCC:

*“[...] Lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vean amenazados y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”.*

México ratificó dicha convención el 13 de junio del mismo año, adquiriendo así el compromiso de tomar medidas de precaución para prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático (CMNUCC, 1992), siendo que se reconoce poco tiempo después que los patrones dominantes de producción y consumo están causando devastación ambiental, agotamiento de recursos y una extinción masiva de especies (La Carta de la Tierra, 1997), y por ello es ahora un imperativo máximo que los países declaren y asumen responsabilidad dando frente al cambio climático.

En el mismo sentido, uno de los grandes compromisos adoptados por México en el plano internacional, es el cumplimiento de las Metas de Aichi, las cuales tienen como misión tomar medidas efectivas y urgentes para detener la pérdida de diversidad biológica a fin de asegurar que, para el año 2020, los ecosistemas sean resilientes y sigan suministrando servicios esenciales, asegurando de este modo la variedad de la vida del planeta (Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 y las Metas de Aichi, 2010). Derivado de lo anterior, nace el compromiso de diversos países, de crear, actualizar e impulsar estrategias, así como planes de acción nacionales para la diversidad biológica.

El instrumento más reciente a nivel internacional es el Acuerdo de París, de fecha 12 de diciembre de 2015, el cual tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático. México, al ser parte de este acuerdo, se encuentra comprometido a aumentar la capacidad de adaptación, fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad al cambio climático con miras a contribuir al desarrollo sostenible y lograr una respuesta de adaptación adecuada en el contexto del objetivo referente a la temperatura que se menciona en el artículo 2° de dicho acuerdo.

En virtud de lo anterior, queda claro que México debe responder a los compromisos establecidos en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. Entre las acciones más relevantes se encuentra la elaboración y la implementación de Programas de Adaptación al Cambio Climático en el nivel

nacional, los cuales contemplen acciones que, basadas en el principio precautorio, contribuyan a que especies y ecosistemas puedan mantener o incrementar su resiliencia ante los impactos del cambio climático, de manera previsor, y antes de que sea demasiado tarde intervenir. Se considera que de no contar con estrategias orientadas a buscar adaptación inteligente y planificada de las actividades humanas ante el cambio climático, habrá consecuencias que podrían agravar aún más la salud ecológica y la sustentabilidad en la región (PACC del complejo del Caribe de México, 2011 ).

Las islas son ecosistemas particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático y tienen limitaciones importantes de capacidad (Acuerdo de París, 2015), por lo que se considera necesario la elaboración específica de un Programa de Adaptación al Cambio Climático del Territorio Insular Mexicano.

#### **4.1.1.2 Actividades y términos**

4.1.1.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre los instrumentos a nivel internacional, que traten como tema el cambio climático, así como un análisis comparativo, sobre las diferencias más relevantes de cada uno de estos instrumentos. La revisión habrá de incluir literatura gris. Elaborando para ello narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de todos los instrumentos creados, hasta la fecha, que presenten el tema de cambio climático, señalando: país al que pertenece, Estados parte, fecha de publicación, derechos y obligaciones que se adquieren al ser parte del instrumento.
- Identificar, cuales instrumentos son parte de la CMNUCC, asimismo, elaborar un listado de los Estados que son parte del CMNUCC.

4.1.1.2.2 Elaboración de un mapeo de actores, a nivel nacional e internacional, encargados de la elaboración de los instrumentos relacionados al tema.

4.1.1.2.3 Narrativa fundamentada sobre los escenarios esperados con el cambio climático en las islas, contemplando únicamente los instrumentos con los que se cuenta en la actualidad, con la finalidad de observar, posibles vacíos.

4.1.1.2.4 Crear a manera de propuesta un instrumento, que se encargue de regular la esfera jurídica del Territorio Insular Mexicano, ante el posible escenario que se generará por la elevación del nivel del mar, derivado por el cambio climático.

## 4.1.2 Actores

### 4.1.2.1 Antecedentes y justificación

El artículo 4º Constitucional de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUMM), establece ya el derecho a un medio ambiente sano, dando como resultado la obligación que tienen el estado mexicano y el gobierno de hacer cumplir y respetar este derecho. Asimismo dentro del artículo 25 de la misma Constitución se determina que corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable. De manera reglamentaria a la Constitución, se creó la Ley General de Cambio Climático (LGCC), misma que prevé la integración del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINCC), el cual tiene como objetivo la búsqueda de sinergias para enfrentar de manera conjunta la vulnerabilidad y los riesgos del país ante el fenómeno y establecer las acciones prioritarias de mitigación y adaptación. El SINACC está conformado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC); el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC); el Consejo de Cambio Climático (C3); las entidades federativas; las asociaciones de autoridades municipales; y el congreso de la Unión. A su vez, la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático es el mecanismo de coordinación de acciones entre las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal en Materia de cambio climático. De acuerdo a las funciones que contempla, se encuentra, la de formular e instrumentar políticas nacionales para la mitigación y adaptación al cambio climático. Esta Comisión está integrada por 13 secretarías de Estado: Secretaría de Gobernación; Secretaría de Relaciones Exteriores; Secretaría de Marina; Secretaría de Hacienda y Crédito Público; Secretaría de Desarrollo Social; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Secretaría de Energía; Secretaría de Economía; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; Secretaría de Educación Pública; Secretaría de Salud; y Secretaría de Turismo. Así también, como resultado de la participación conjunta de ciudadanos, empresas y académicos con el Gobierno de la República, se integró la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), instrumento de planeación que define la visión de largo plazo, rige y orienta la política nacional con una ruta a seguir y establece prioridades nacionales (ENCC, 2013).

A nivel internacional, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) creó el órgano internacional para la evaluación del cambio climático denominado Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Es un órgano científico que examina y evalúa la bibliografía científica, técnica y socioeconómica más reciente, relacionada con la comprensión del cambio climático y producida en todo el mundo (PNUMA, 2004). Una de sus principales funciones, es dar a conocer a los encargados de tomar decisiones, la situación actual referente al cambio climático.

Uno de los ejes fundamentales para la elaboración de un PACC, es la participación así como involucramiento de los actores sociales clave, a modo de una construcción social, a lo largo de todo el proceso. De esta manera, al llegar a la fase de implementación, los actores sociales se encuentren ya relacionados y comprometidos con el PACC.

### **4.1.2.2 Actividades y Términos**

- 4.1.2.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre los actores que colaboran en la elaboración, estudio y análisis que se presenta ante la vulnerabilidad y los riesgos del país ante el cambio climático, asimismo como los que colaboran en el establecimiento de las acciones prioritarias de mitigación y adaptación, así como el análisis a través de entrevistas a distancia o presenciales con actores clave. La revisión habrá de incluir literatura gris. Narrativa de 10 páginas.
- 4.1.2.2.2 Elaboración de un mapeo de actores, a nivel nacional e internacional, encargados de la elaboración, así como la implementación de los instrumentos relacionados al tema. La información se presentará en un compendio incluyendo: directorio con datos de contacto, Secretaría que representa, capacidades (recursos humanos), breve explicación del por qué se encuentra vinculado al tema.
- 4.1.2.2.3 Análisis detallado, sobre las funciones de cada uno de los actores, así como el fundamento legal, para llevar a cabo cada una de las funciones que le son atribuidas. Esto con la finalidad de lograr detectar posibles vacíos, que pudieran ser subsanadas con actores que en la actualidad no son contemplados.
- 4.1.2.2.4 Incentivar la colaboración entre tomadores de decisiones y sociedad civil organizada.

## **4.1.3 Instrumentos en los PACC**

### **4.1.3.1 Antecedentes y justificación**

La Ley General de Cambio Climático es reglamentaria de las disposiciones de la CPEUM en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico (LGCC, 2012). El objetivo de este ordenamiento es: regular, fomentar y posibilitar la instrumentación de la política nacional de cambio climático. Además de la LGCC, se contemplan una serie de instrumentos financieros, regulatorios, técnicos, de planeación y de evaluación y de vigilancia de la política pública de cambio climático. De los instrumentos destacados, se encuentra la ENCC, así como instrumentos de planeación, en particular el Programa Especial del Cambio Climático y los Programas Estatales de Cambio Climático. Otros de los instrumentos que son contemplados, son las normas oficiales mexicanas, atlas nacionales, estatales y municipales de riesgo (ENCC, 2013).



#### 4.1.3.2 Actividades y términos

**Revisión bibliográfica exhaustiva sobre los instrumentos que se contemplan para la elaboración de los Programas de Adaptación para el Cambio Climático a nivel nacional e internacional, elaborando un análisis comparativo entre ambos. La revisión habrá de incluir literatura gris: documentos no publicados, tales como reportes o informes de investigación, notas de prensa, memorias de congresos, y productos de Internet. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:**

- Identificación de los instrumentos actuales que se utilizan para la elaboración de los PACC, sumando en la búsqueda instrumentos nacionales e internacionales, así como avances que se han realizado en el tema y las modificaciones.
- Identificar espacios de oportunidad en cuanto a la creación de nuevos instrumentos, que contemplen al Territorio Insular Mexicano (TIM), integrando de manera armónica resultados a corto y largo plazo.

## 4.2 Colaboración internacional

Las islas de México representan un territorio con una gran vocación natural para la colaboración internacional en cuanto al tema de adaptación y mitigación al cambio climático. Destaca en particular lo tocante al manejo sustentable de recursos naturales y conservación de la biodiversidad. Esto se debe a que los territorios insulares de nuestro país constituyen estaciones a lo largo de grandes corredores marinos que trascienden las fronteras nacionales, ofreciendo sitios vitales para garantizar el ciclo de vida de muchas especies marinas compartidas por varios países, así como los ecosistemas que los sustentan. En particular, las islas y archipiélagos de vastas regiones de todos los mares de México — Corriente de California, Golfo de California, Pacífico Tropical Oriental, Golfo de México y Mar Caribe— tienen una fuerte conectividad —en no pocas ocasiones aún estando a miles de kilómetros de distancia— con islas de otros países, por lo que no ha dejado de señalarse desde hace tiempo la necesidad de actuar bajo esquemas de cooperación internacional (Jessen and Ban 2003; Jessen *et al.*, 2016; Sealey and Bustamante 1999; Spalding *et al.* 2007).

Los medios físicos que permiten la conectividad entre las islas son las corrientes marinas y el aire, y los vectores que destacan en esta conectividad de gran escala geográfica son las especies migratorias —en especial las aves marinas y los pinnípedos—, así como una variedad de peces e invertebrados marinos. Algunas aves terrestres, si bien no tienen una dependencia total de las islas para su reproducción, también las usan como sitios de descanso en sus migraciones distantes estacionales, sobre todo entre el norte y el sur, atravesando por varios países; para el caso de México esto ocurre sobre todo en las islas del Golfo de México y el mar Caribe (e.g., Cohen *et al.* 2017).

Para su conservación, las aves marinas dependen totalmente de las islas, pues éstas son sus únicos sitios de reproducción y anidación (e.g., Mulder *et al.* 2011). Lo mismo se da con los pinnípedos —

lobos marinos, focas, elefantes marinos— que, frente a la destrucción de hábitats e intensas actividades humanas en las costas continentales, tienen en las islas también los últimos resquicios como sitios de descanso, reproducción y crianza.

Las extensas ecorregiones marinas donde se encuentran las islas —los mares que las circundan—, a su vez son las áreas de forrajeo de algunas de estas especies, o bien, de especies con ciclos de vida cuyos diferentes estadios tienen muy amplias distribuciones geográficas. Se complementa así otra función esencial —la de la alimentación— con la de anidación de aves marinas, o sitios de reproducción y crianza para el caso de las colonias de pinnípedos, y de hábitat para diversas fases del ciclo de vida en el caso de peces e invertebrados marinos.

En especial varias especies de aves marinas y pinnípedos presentan una serie de ventajas —tamaño de los individuos y las poblaciones, accesibilidad, distribución, conocimiento acumulado sobre historia de vida y manejo— para definir indicadores, tanto de salud ambiental como de desempeño con relación a objetivos y acciones de colaboración internacional cuyo objetivo sea la conservación de la biodiversidad. Entre estas especies encontramos precisamente aquellas que pueden ser definidas como especies focales o sombrilla (Roberge and Stam, 2004), es decir, aquellas que, por sus características e historia natural, al ser conservadas protegen a otras con las cuales comparten hábitats.

En este caso se trata de integrar una visión y las bases para un programa de trabajo que permita incidir en medidas de manejo internacional a favor de la mitigación y adaptación al cambio climático en territorios insulares en regiones multinacionales de las que México es parte. De esta manera, por las características de sus historias naturales, se trata de identificar con precisión a las especies de aves marinas y pinnípedos que nos pueden informar acerca del estado de salud ambiental de toda una ecorregión marina que abarca a varios países. Se anticipa que este objetivo es alcanzable a través del conocimiento de la dinámica de las poblaciones de las especies seleccionadas y la relación que éstas guardan con los parámetros ambientales generales, así como con las condiciones y amenazas específicas de sitios clave, con énfasis en el cambio climático y sus impactos en los ecosistemas marinos.

Desde hace cerca de 15 años, México colabora de manera activa, simétrica y destacada en el plano internacional en el tema de conservación ambiental y restauración ecológica de islas. Sus logros son reconocidos a nivel internacional, siendo que en la propia Nueva Zelanda se han equiparado los avances de México con los de ese país, pionero en dichas actividades (Towns, 2011). Lo mismo ocurre con las aptitudes de nuestro país para continuar en esa ruta: vasta experiencia, vínculo estrecho entre la conservación y la Secretaría de Marina, y el equipo más capaz en el mundo en restauración ecológica de islas a través de una organización de la sociedad civil (i.e., el Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A. C. - GECD). Este es un capital nacional valioso para colaborar en un posible programa internacional de conservación de islas de mayor escala y eficiencia. En ese sentido se ha fundamentado ya la conveniencia de una iniciativa con soporte internacional —México incluido—, de tal manera que se puedan complementar las diversas y limitadas capacidades de países interesados y maximizar la eficiencia del trabajo —especialmente la implementación de proyectos de erradicaciones de especies

exóticas invasoras, que es una prioridad máxima—, pues hay grandes retos que superar, tales como contar con equipamiento sofisticado y el personal especializado, así como los aspectos logísticos que involucran grandes embarcaciones oceánicas y aeronaves (Saunders *et al.*, 2011).

Las oportunidades de colaboración internacional que también se presentan en forma evidente en torno a las islas y el cambio climático incluyen los siguientes temas: pesquerías artesanales de especies compartidas o similares; desarrollo de conocimiento básico y aplicado, incluyendo el enfoque de investigación y desarrollo de tecnologías especiales para el propósito; creación de una institución especializada en conservación y desarrollo sustentable de islas, con soporte y vocación internacional y posible ubicación en México; intercambio de prácticas, políticas públicas y esquemas de gobernabilidad entre los diversos actores: comunidades, autoridades, academia y sociedad civil.

De acuerdo a todo lo anterior, en este apartado se determinan los términos de referencia básicos para que, con una visión estratégica, México cuente con las bases y pueda avanzar la agenda en el tema, crucial por cierto para el ejercicio efectivo de la soberanía nacional en costas, mares e islas. Al precisar con un estudio detallado el estado actual de cosas, sistematizar los objetivos específicos, identificar los retos y las oportunidades, y plantear las eventuales soluciones, se sentarán las bases para alcanzar el objetivo ulterior: la implementación de proyectos aplicados de conservación, restauración y manejo del territorio insular mexicano, aprovechando esquemas de colaboración internacional.

## 4.2.1 Aves marinas

### 4.2.1.1 Antecedentes y justificación

México es uno de los países con mayor biodiversidad en aves marinas. Del total de especies a nivel mundial, nuestro país tiene en sus mares e islas a una de cada tres especies, es decir, 115 especies de un total de 345. En cuanto a diversidad de especies endémicas, México es segundo en el mundo. El país comparte varias de estas especies con países vecinos, destacando las especies del Océano Pacífico. Así, en cuanto a especies compartidas con otros países, el corredor de islas de la región Pacífico Norte, frente al litoral occidental de la península de Baja California y que corresponde a las ricas aguas de la Corriente de California, tiene especial relevancia para oportunidades de colaboración. Se ha estimado que las islas de México en esta región soportan entre el 43% y el 57% de todos los individuos reproductores de las diversas especies de aves marinas del sistema de la Corriente de California, el 59% de los taxa reproductores y un nivel alto de endemismo, lo mismo que la conectividad entre las poblaciones de México y los EE. UU. Asimismo, se ha encontrado que al menos 17 de las 22 especies presentes en México se reproducen o forrajean cruzando la frontera entre ambos países, y 13 de ellas están listadas bajo alguna categoría de protección federal tanto en México como en los EE. UU. (Wolf *et al.*, 2006). Es en esta misma región de la Corriente de California —en las islas y las aguas marinas— donde tenemos la mayor concentración de poblaciones de aves marinas en México y de las mayores del planeta, por lo que internacionalmente se les reconoce como sitios clave de anidación para las

numerosas especies presentes de aves marinas. El caso del archipiélago de San Benito, frente a la mitad de la península de Baja California, merece especial atención, pues se trata del sitio con mayor diversidad y abundancia de aves marinas en todo el Pacífico Oriental, desde las Galápagos hasta el mar de Bering (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2005 y DOF, 2016). Hay otros ejes de conectividad en el Pacífico, como ocurre en el caso del albatros de Laysan, que ha colonizado a Isla Guadalupe y su hábitat abarca una gran región que va desde las Aleutianas e islas de Alaska, hasta islas tropicales como Hawái, en el centro del Pacífico (Hernández-Montoya *et al.*, 2014)

En la mayoría de estos casos, México comparte de manera subrayada especies con Canadá y los Estados Unidos, países con los ya se tiene una relación de colaboración práctica en el tema, contándose incluso con la firma de una carta de intención específica (Comité Trilateral, 2014) donde se expresan objetivos comunes y la voluntad de implementar más proyectos en colaboración.

#### **4.2.1.2 Actividades y términos**

4.2.1.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre el tema de aves marinas compartidas por México con otros países, separando por grandes regiones marinas: Pacífico Oriental (Corriente de California y tropical), Golfo de California, Caribe y Golfo de México), así como análisis a través de entrevistas a distancia o presenciales. La revisión habrá de incluir literatura gris: documentos no publicados tales como reportes o informes de investigación, notas de prensa, tesis de grado y posgrado, memorias de congresos, programas y proyectos de investigación, y productos de Internet. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de las principales especies compartidas, señalando región y países involucrados; selección de criterios (e.g. endemismos regionales, nivel de protección, amenazas, etc.) y jerarquización para identificar las principales especies o familias por cada región.
- Estado del conocimiento en biología, ecología, dinámica poblacional, genética y conservación, por especie o familia, e identificación de vacíos.
- Caracterización del estado de las poblaciones de las principales especies, señalando sitios críticos, por país.
- Situación legal de las especies de aves marinas compartidas, en especial con relación a las categorías formales de riesgo existentes.
- Tipificación de las amenazas y posibles impactos a las especies compartidas, distinguiendo por región y país, con énfasis en cambio climático.

- 4.2.1.2.2 Identificación (por país) de las instituciones gubernamentales, académicas y organizaciones de la sociedad civil relevantes y activas en el tema, generando un compendio con la siguiente información: directorio con datos de contacto, capacidades (recursos humanos y equipamiento), logros, proyectos en curso y experiencias en colaboración internacional (énfasis en la relación con México). A reserva de lo que arroje la revisión, se anticipa que entre los países más relevantes estarán Alemania, Belice, Cuba, Canadá, Chile, Ecuador, EE. UU., Nueva Zelanda, Puerto Rico y República Dominicana.
- 4.2.1.2.3 Descripción del marco legal favorecedor existente de los países con los que México tiene el potencial de colaboración.
- 4.2.1.2.4 Listado señalando oportunidades de colaboración internacional para la restauración y conservación de especies de aves marinas compartidas, incluyendo actividades o proyectos de: investigación, implementación de proyectos de campo, intercambio de experiencias entre comunidades locales, monitoreo científico y participativo, desarrollo compartido de políticas públicas o instrumentos de manejo.
- 4.2.1.2.5 Análisis comparativo de los instrumentos de conservación y restauración, por país, de las principales especies compartidas.

## 4.2.2 Pinnípedos

### 4.2.2.1 Antecedentes y justificación

Las islas de México, particularmente las del Pacífico Norte y del Golfo de California, y los mares que las rodean, son hábitat de algunas de las poblaciones más importantes del mundo de pinnípedos. Estas islas son sitios de reproducción, descanso y crianza de la foca común (*Phoca vitulina*), del lobo marino de California (*Zalophus californianus*), de la foca elefante (elefante marino) del norte (*Mirounga angustirostris*) y del lobo fino de Guadalupe (*Arctocephalus townsendi*). De hecho, gracias al cuidado por parte de México de la Isla Guadalupe desde principios del siglo pasado, a través de un Acuerdo Presidencial de Álvaro Obregón de 1922 (DOF, 1922) y un subsiguiente Acuerdo Secretarial de 1928 (DOF, 1928), se salvaron de la extinción la foca elefante y el lobo fino de Guadalupe a partir de unos cuantos individuos que sobrevivieron matanzas indiscriminadas en los tiempos del comercio masivo de pieles; a la fecha sus poblaciones se han recuperado en número de manera notable, y su distribución geográfica ha crecido ocupando ahora sitios a miles de kilómetros de distancia de Isla Guadalupe.

En el caso de los pinnípedos, México comparte especies con Canadá y los Estados Unidos, y hay algunos esfuerzos de colaboración en marcha entre México y los EE. UU., si bien todavía de alcance limitado (CONANP 2017).

Por otra parte, resulta pertinente explorar la posibilidad de que México colabore en el restablecimiento de una población de lobo marino de California en islas de Japón y Corea, a modo de pie de cría, a

partir de una robusta población mexicana, toda vez que en esa región se extinguió la subespecie (o especie) propia (Lawry, 2017) durante el siglo pasado. Existe interés por parte de Japón y Corea de la eventual reintroducción de la subespecie más próxima, que es el lobo marino de California, y ha habido algunos avances en los primeros pasos de un proyecto de esa naturaleza, mismo que ha contado también con la cooperación de Rusia y China (Ji-sook, 2007).

#### **4.2.2.2 Actividades y términos**

4.2.2.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre el tema de pinnípedos compartidos por México con otros países, con énfasis en el Pacífico Oriental (Corriente de California y tropical) y Golfo de California, así como análisis a través de entrevistas a distancia o presenciales. La revisión habrá de incluir literatura gris: documentos no publicados, tales como reportes o informes de investigación, notas de prensa, tesis de grado y posgrado, memorias de congresos, programas y proyectos de investigación, y productos de Internet. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de todas las especies compartidas, señalando: región y países involucrados, endemismos regionales, niveles de protección, amenazas, etc.
- Jerarquización para identificar las especies y poblaciones de pinnípedos que enfrentan mayores amenaza vis a vis el cambio climático.
- Narrativa fundamentada sobre los escenarios esperados con el cambio climático en las islas que son hábitat crítico para los pinnípedos, de los países con los que los compartimos.
- Estado del conocimiento en biología, ecología, dinámica poblacional, genética y conservación, por especie, e identificación de vacíos.
- Caracterización del estado de las poblaciones de todas las especies compartidas, señalando sitios críticos, por país.
- Tipificación de las amenazas y posibles impactos a las especies compartidas, distinguiendo por región y país, con énfasis en cambio climático.

- 4.2.2.2 Identificación (por país) de las instituciones gubernamentales, académicas y organizaciones de la sociedad civil relevantes y activas en el tema, generando un compendio con la siguiente información: directorio con datos de contacto, capacidades (recursos humanos y equipamiento), logros, proyectos en curso y experiencias en colaboración internacional (énfasis en la relación con México). A reserva de lo que arroje la revisión, se anticipa que entre los países más relevantes estarán Canadá, Chile, Ecuador, EE. UU. y Nueva Zelanda.
- 4.2.2.3 Listado señalando oportunidades de colaboración internacional para la restauración y conservación de pinnípedos compartidos o especies similares, e.g. lobo marino de Galápagos (*Zalophus wollebaeki*), muy próximo al lobo marino de California, e incluyendo actividades o proyectos de: investigación, implementación de proyectos de campo, intercambio de experiencias entre comunidades locales, desarrollo compartido de políticas públicas o instrumentos de manejo.
- 4.2.2.4 Análisis comparativo de los instrumentos de conservación y restauración, por país, de las principales especies compartidas, o especies similares.
- 4.2.2.5 Revisión puntual sobre el avance de la idea de la eventual reintroducción del lobo marino de California a islas de Japón y Corea, así como la identificación de las instituciones involucradas en los diversos países —Japón, Corea, China y Rusia—, y elaboración de un plan de ruta indicativo básico que pudiera conducir a la implementación exitosa.

### 4.2.3 Pesquerías artesanales

#### 4.2.3.1 Antecedentes y justificación

Las islas de México, particularmente las del Pacífico Norte y del Caribe, y los mares que las rodean, son hábitat de especies pesqueras de gran importancia comercial para comunidades locales que las aprovechan en forma colectiva desde hace cerca de un siglo. Por su valor y volumen, destacan el abulón, el erizo, el caracol y la langosta de las islas del Pacífico de Baja California, y la langosta de las islas del Caribe. Más allá de las especies, en este caso es crucial el enfoque ecosistémico orientado a las condiciones que permiten el mantenimiento de las poblaciones que dan lugar a las pesquerías artesanales. Es decir, es indispensable analizar los impactos del cambio climático sobre los bosques de sargazo en el Sistema de la Corriente de California, pues representa la base alimenticia y el hábitat para el abulón, el erizo, el caracol panocha y la langosta (Beas-Luna and Ladah, 2014; Edwards, 2004; Edwards and Estes, 2006; Ladah *et al*, 1999). Lo mismo ocurre con el arrecife de coral en el mar Caribe, ecosistema que sostiene a las poblaciones de langosta, caracol rosado y pulpo, base de las pesquerías artesanales de la región y sustento de miles de pescadores (Chávez, 2014).

### 4.2.3.2 Actividades y términos

4.2.3.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre el tema de pesquerías artesanales de especies compartidas (o similares) por México con otros países, con énfasis en el Pacífico Oriental (Corriente de California y tropical) y el mar Caribe, así como análisis a través de entrevistas a distancia o presenciales con actores clave. La revisión habrá de incluir literatura gris: documentos no publicados, tales como reportes o informes de investigación, notas de prensa, tesis de grado y posgrado, memorias de congresos, programas y proyectos de investigación, y productos de Internet. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de todas las especies compartidas (y similares), señalando en fichas: región y países involucrados; series de tiempo con los niveles de producción; organización económica, social y legal de la pesquería; estado general de la pesquería; etc. A reserva de incluir algunas más, se anticipa que entre las principales especies estarán las siguientes: abulón, langosta, erizo, caracol y pepino de mar.
- Estado del conocimiento en biología, ecología, dinámica poblacional, genética y conservación, por especie, e identificación de vacíos.
- Determinación de las formas en que se comparten entre los países los ciclos de vida de las especies que dan pie a las pesquerías artesanales.
- Identificación de los impactos derivados del cambio climático sobre las diferentes pesquerías, por región, y modelación de escenarios probables.
- Narrativa fundamentada sobre los escenarios esperados con el cambio climático en las islas y sus aguas adyacentes para las pesquerías artesanales compartidas seleccionadas.
- Tipificación de las amenazas y posibles impactos a las especies compartidas, distinguiendo por región y país, con énfasis en cambio climático.



- 4.2.3.2.2 Identificación (por país) de las instituciones gubernamentales, actores económicos, institutos académicos y organizaciones de la sociedad civil, relevantes y activas en el tema. La información se presentará en un compendio incluyendo: directorio con datos de contacto, capacidades (recursos humanos) y proyectos en curso relacionados con las pesquerías artesanales motivo de este estudio. A reserva de lo que arroje la revisión, se anticipa que entre los países más relevantes están Australia, Belice, Canadá, Chile, Cuba, Ecuador, EE. UU., Honduras, Nueva Zelanda, Puerto Rico y Venezuela. En el caso de los países de Oceanía, de Chile y Cuba, se trata más bien de la forma en que llevan a cabo sus pesquerías artesanales, similares a las de nuestras regiones, y la forma en que están problematizando y enfrentando la amenaza del cambio climático.
- 4.2.3.2.3 Listado señalando oportunidades de colaboración internacional para el manejo y conocimiento de pesquerías artesanales compartidas o similares, incluyendo: proyectos de investigación, intercambio de experiencias entre comunidades pesqueras, desarrollo compartido de políticas públicas y buenas prácticas.

## 4.3 Política y Sociedad

### 4.3.1 Derechos humanos

#### 4.3.1.1 Antecedentes y justificación

El derecho a un medio ambiente sano, contemplado como derecho humano, es de arquitectura internacional. Fue incluido por primera vez en 1999, en el artículo 4º constitucional, de la siguiente forma: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”. El 8 de febrero de 2012 este artículo se reformó para incluir la figura de un derecho a un medio ambiente sano, así como la obligación que le es instaurada al Estado de garantizar el respeto a ese derecho, estableciendo asimismo la responsabilidad para quien provoque daño y deterioro ambiental.

El derecho a un medio ambiente sano se relaciona con más de un derecho humano, toda vez que se considera una condición esencial para el disfrute y ejercicio de los demás. El desarrollo humano y el derecho al medio ambiente sano tienen en común que ambos suponen un elemento esencial de coexistencia: la sustentabilidad, es decir, la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de satisfacción de las generaciones futuras (Fraga María, 2013). Es en ese sentido que dentro de la declaración de Estocolmo de 1972 se establece que “El hombre tiene derecho fundamental a la libertad, la igualdad y el disfrute de condiciones de vida adecuadas en un medio de calidad tal que le permita llevar una vida digna y gozar de bienestar...”.

En México, con la finalidad de preservar y respetar el derecho a un medio ambiente sano, se encuentra regulada la conservación de la biodiversidad, debido a que está conformada por los diversos valores

que tutela (*e.g.* la vida, salud, ecosistemas), a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), ley reglamentaria de las disposiciones de la CPEUM, referente a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. En ese sentido, el Territorio Insular Mexicano (TIM) representa un importante capital natural en términos de biodiversidad. Con no más del 3 por ciento de la superficie terrestre global, las islas contienen cerca del 20 por ciento del total de especies registradas de plantas, reptiles y aves del planeta. En las islas se han establecido, adaptado y evolucionado especies y comunidades separadas del continente. Por su aislamiento geográfico, las islas presentan características singulares que ocasionan dinámicas evolutivas únicas (Whittaker *et. al.* 2006), de ahí que se imponga la necesidad de la regulación del uso del TIM, ya que, bajo el esquema de los derechos humanos, su conservación es obligación de los gobernantes así como de los ciudadanos.

Uno de los principales obstáculos referente al derecho de un medio ambiente sano, es que a pesar de que existe legislación nacional e internacional, se trata de establecer medidas que no derivan automáticamente en acciones. Por ello, es necesaria la creación de instrumentos que logren llevar a cabo los objetivos plasmados en la legislación, estableciendo las bases para programas viables y acciones eficaces.

### **4.3.1.2 Actividades y términos**

- 4.3.1.2.1 Revisión bibliográfica exhaustiva, donde se logre identificar, qué obligaciones tienen los Estados respecto a la protección de los derechos humanos de las comunidades cuyo modo de vida está estrechamente ligado al Territorio Insular Mexicano. La revisión habrá de incluir literatura gris. Narrativa de 10 páginas.
- 4.3.1.2.2 Elaborar un análisis sobre la condición en que viven las poblaciones establecidas en el TIM, con la finalidad de determinar si se cumple con la definición de derecho a una vida digna y a un ambiente sano.
- 4.3.1.2.3 Con fundamento al punto anterior, elaborar propuestas de instrumentos, que se orienten a lograr calidad de vida para las poblaciones locales del TIM.

## **4.3.2 Política de población insular específica y deliberada**

### **4.3.2.1 Antecedentes y justificación**

Las islas de México albergan 269,236 habitantes. Gran parte de la población insular se encuentra en isla del Carmen, ubicada en el Golfo de México —más como una extensión del territorio continental

que como isla—, y dentro del Mar Caribe las islas Cozumel y Mujeres. En la región del Pacífico Norte, con un número considerable de habitantes se encuentra Isla Cedros. Dentro de las principales actividades, que dan sustento a la población de estas islas, se encuentra la pesca artesanal, siendo esta de las primeras actividades económicas de la historia del país, así como el turismo (Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano, 2012). El territorio insular mexicano (TIM) carece a la fecha de reglamentos jurídicos específicos y de cobertura universal que reconozcan la especificidad del TIM y vele por los intereses del mismo y, sobre todo, de sus habitantes. Es decir, por las peculiaridades y fragilidades extremas del TIM, hay una necesidad de generar una normatividad que regule el uso de los recursos naturales, que establezca una normatividad de población contemplando que es indispensable reconocer que la capacidad de carga del TIM es muy distinta a la del continente, que es necesario contar con servicios públicos adecuados y que haya una clara y eficaz protección del equilibrio ecológico de las islas y sus aguas adyacentes, así como de la biodiversidad del ecosistema.

Un ejemplo de lo anterior lo marco la República del Ecuador. En el artículo 242 de su Constitución establece que *“El Estado se organiza territorialmente en regiones, provincias, cantones y parroquias rurales. Por razones de conservación ambiental, étnico culturales o de población podrán constituirse regímenes especiales.”* Derivado de lo anterior, Ecuador creó precisamente la Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos, un territorios de gran valor geopolítico y natural para ese país, como lo es Revillagigedo o Isla Guadalupe para México. Ese instrumento de Ecuador tiene como objetivo el regular tanto a las personas nacionales como extranjeras, que se encuentren dentro o que realicen actividades en la provincia de Galápagos, de tal manera que sus actividades y presencia se apeguen a los principios de conservación del patrimonio natural del Estado y la política del Buen Vivir. De esta manera, la República Ecuatoriana es un caso que vale la pena analizar, como país con un territorio insular muy valioso, con el fin de considerar el desarrollo de políticas similares en México, más otros casos similares que se encuentren en otros países y que también puedan ser útiles como fuente de inspiración y antecedentes a favor del desarrollo sustentable del TIM.

#### **4.3.2.2 Actividades y términos**

4.3.2.2.1 Elaboración, a manera de propuesta de un instrumento que se encargue de la regulación de la población y el desarrollo sustentable del TIM, el cual contemple lo siguiente:

- Capacidad de carga, por cada isla, que cuente con población.
- Propuesta de una política general de población para el TIM.
- Desarrollo de servicios públicos e infraestructura, que busquen la sustentabilidad y el equilibrio entre el desarrollo económico, social y la conservación en todo momento del TIM.

- Se base en principios explícitos y pertinentes, tales como: precautorio, respeto a los derechos de la naturaleza y al medio ambiente sano, sustentabilidad, justicia social, participación ciudadana y derecho al acceso preferente.

## 4.4 Ecosistemas insulares

Las islas de México cuentan con una gran diversidad de ecosistemas terrestres, costeros y marinos. Entre los ecosistemas insulares costeros y marinos se encuentran arrecifes coralinos, manglares, estuarios, bosques de macroalgas, praderas de pastos marinos, zonas intermareales rocosas y humedales. Sobre la superficie terrestre de las islas se encuentran los ecosistemas insulares de matorral, chaparral, dunas, bosques y selvas secas. Los ecosistemas insulares varían en su grado de vulnerabilidad ante presiones asociadas al cambio climático y muchos de estos, juegan un papel clave sobre las poblaciones de aves marinas, pinnípedos y peces e invertebrados marinos de importancia comercial.

### 4.4.1 Ecosistemas insulares de relevancia para la conservación

Los manglares representan un ecosistema altamente productivo, con una gran riqueza biológica, además de que proporcionan una gran diversidad de recursos económicos y servicios ambientales. México se encuentra entre los cinco países con mayor extensión de este ecosistema (CONABIO, 2009). Los manglares son de alta importancia ecológica porque regulan vastos ecosistemas costeros, al modificar variables abióticas en zonas intermareales, reducir la variabilidad del sitio y proveer hábitats más estables para una gran diversidad de organismos. Actúan también como hábitats de crianza para especies de invertebrados marinos y peces de importancia comercial. Igualmente, representan barreras naturales de protección a asentamientos humanos e infraestructura frente a huracanes y marejadas.

Los corales hermatípicos son aquellos corales que son responsables de la propia construcción de los arrecifes, siendo que sus estructuras coralinas proveen hábitat para una multitud de especies de peces, algas e invertebrados marinos (Hoegn-Guldberg, 1999; Wild *et al.*, 2011). Los arrecifes coralinos que se presentan en aguas oligotróficas son particularmente importantes porque proveen un oasis dentro de aguas tropicales que en general son escasas en nutrientes.

Las macroalgas formadoras de bosques proporcionan sustrato para organismos colonizadores, así como estructura tridimensional que proporciona hábitat a una gran cantidad de plantas, mamíferos marinos, peces e invertebrados. Un buen número de especies de peces e invertebrados utilizan este hábitat como área de crianza y alimentación, así como refugio de los depredadores. Los bosques de macroalgas también modifican factores ambientales, pues amortiguan el flujo y la temperatura del agua, redistribuyen el pH y el oxígeno disuelto (Suárez-Castillo, 2011).

Los ecosistemas pelágicos presentan una gran variedad de organismos, desde especies de fitoplancton y zooplancton a megafauna, como mamíferos marinos, peces, invertebrados y aves marinas. La productividad de estos sistemas depende de la presencia y cantidad de nutrientes, en particular de nitrógeno y fósforo. La disponibilidad de estos nutrientes depende a su vez de los patrones de corrientes y de mecanismos oceanográficos capaces de traer aguas ricas en nutrientes del fondo cerca de la superficie con luz solar (Letscher *et.al.*, 2016; Woodson y Litvin, 2015). Los ecosistemas pelágicos son también sitios importantes de forrajeo para especies insulares, destacando el caso de las aves marinas y los pinnípedos.

## 4.5 Impactos y vulnerabilidad

### 4.5.1 Factores de presión asociados al cambio climático

#### 4.5.1.1 Antecedentes y justificación

El aumento combinado de la temperatura de la tierra y del mar ha incrementado 0.11°C de 1880 a 2012, y se estima que para el final del siglo XXI la temperatura incrementará entre 1.1°C a 2.6°C según el pronóstico del modelo RCP 4.5 de cambio climático, que representa un escenario de cambio moderado (IPCC AR5, 2014). Asociado a este incremento en la temperatura del agua de mar en combinación con el incremento en la concentración del carbono atmosférico, se proyecta una disminución en el pH del agua de mar de entre 0.14 y 0.15 unidades (correspondiente a un aumento de acidez del agua de 38 a 48%), junto con una disminución en la concentración de oxígeno disuelto (IPCC AR5, 2014). Igualmente, se espera que durante el presente siglo el 70% de las costas sufran un cambio en el nivel del mar con respecto al promedio global (IPCC AR5, 2014). Adicionalmente, la intensidad y frecuencia de eventos extremos climatológicos, como tormentas, sequías, inundaciones e incendios incrementarán. De esta manera, los diversos cambios en variables abióticas tendrán repercusiones para una amplia gama de especies y ecosistemas del territorio insular mexicano.

#### 4.5.1.2 Actividades y términos

4.5.1.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento acerca del cambio climático con un enfoque particular en las variables abióticas, indicativas de ello, en las islas mexicanas y en los hábitats marinos relacionados con las islas de especies prioritarias, en particular las aves marinas y los pinnípedos. Esto, con el fin de identificar vacíos de información a partir de revisión bibliográfica. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Evaluación del nivel de conocimiento actual acerca del cambio climático para las regiones insulares de México.

- Identificación de fuentes de información para cada región insular y de los vacíos de información actuales.
- Identificación de estrategias y oportunidades para llenar los vacíos de información.

4.5.1.2.2 Evaluación de cambios de la temperatura insular para región insular, tanto de la parte terrestre como de la marina, de las siguientes variables: pH del agua de mar, oxígeno disuelto del agua de mar, nivel del mar; además de variables climatológicas de interés, incluyendo precipitación y la frecuencia e intensidad de tormentas a partir de datos satelitales y datos disponibles de propiedad intelectual común. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Evaluación de las variables anteriormente mencionadas para cada región insular con series de tiempo durante los últimos 20 años.
- Identificación de regiones insulares con alta variabilidad e islas que presentan patrones de incremento o disminución en las variables anteriormente mencionadas a lo largo del tiempo.

4.5.1.2.3 Elaboración de un plan de trabajo de campo para generar información para los próximos 10 años de las variables anteriormente mencionadas para islas prioritarias, incluyendo la instalación y mantenimiento de equipo oceanográfico y climatológico para la obtención de datos *in situ*. Narrativa de 10 páginas.

## 4.6 Sistemas insulares ante el cambio climático

Los impactos asociados al cambio climático en sistemas insulares abarcan una gran diversidad de hábitats, ecosistemas —tanto marinos como terrestres—, especies y escalas. Para poder evaluarlos, se requiere investigación científica *in situ* con un enfoque interdisciplinario junto con una evaluación del estado actual de la literatura científica. En ese sentido, el primer paso es la identificación de las variables abióticas y bióticas de importancia para cada impacto.

### 4.6.1 Cambios de la productividad primaria marina

#### 4.6.1.1 Antecedentes y justificación

Actualmente existe una gran incertidumbre sobre cuál es la respuesta de los ecosistemas modulados por surgencias a los efectos del cambio climático, pues los mecanismos son antagónicos: el aumento en la temperatura aumenta la estratificación, pero se proyecta una intensificación en los vientos que provocan las surgencias, aunque no se sabe si la intensificación de los vientos podrá contrarrestar los efectos del aumento en la estratificación de la capa de mezcla. Hay análisis que plantean una intensificación de las surgencias en algunas regiones de la costa del Sistema de la Corriente de

California (SCC), particularmente en las latitudes altas, mientras que pudiera darse un debilitamiento de las surgencias en la costa Sur de California y frente a la Península de Baja California (Mendelssohn and Schwing (2002); Rykaczewski y Checkley (2008); Patti *et al.* (2010); Narayan *et al.*, (2010); García-Reyes y Largier (2010); Seo *et al.*, (2012); Iles *et al.*, (2012); y Varela *et al.*, (2015). Sin un patrón general en la respuesta de la productividad primaria (PP) ante el cambio climático en sistemas insulares, resulta importante evaluar el estado actual de la PP, a modo de línea base, en cada región insular o en islas prioritarias, pues cambios en la PP pueden disparar una serie de efectos concatenados tipo “bottom-up” con consecuencias notables al llegar a niveles superiores de la red trófica.

La evaluación de la PP puede llevarse a cabo con un análisis de imágenes satelitales junto con muestreos *in situ* de nutrientes y de fitoplancton así como de variables físicas como temperatura y oxígeno disuelto en la columna de agua. Cambios en la PP marina tendrán repercusiones en diversos niveles de la red trófica y la identificación de probables patrones de cambio en PP son sumamente importantes.

#### **4.6.1.2 Actividades y términos**

4.6.1.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento de la productividad primaria alrededor de cada región insular o islas prioritarias y en los hábitats marinos de especies prioritarias, i.e. aves marinas y pinnípedos, para identificar vacíos de información a partir de revisión bibliográfica. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Evaluación del nivel de conocimiento actual acerca de la PP para cada región insular.
- Identificación de fuentes de información para cada región insular y de los vacíos de información actuales.
- Identificación de estrategias y oportunidades para llenar los vacíos de información.

4.6.1.2.2 Evaluación de la productividad primaria (PP) durante los últimos 20 años utilizando imágenes satelitales. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de islas con alta variabilidad en PP.
- Identificación de patrones estacionales de PP para cada isla.
- Evaluación de la relación entre la variabilidad en temperatura y la variabilidad en PP para cada isla.

4.6.1.2.3 Elaboración de un plan de trabajo de campo para generar información para los próximos 10 años de la productividad primaria en las regiones insulares e islas prioritarias, incluyendo la instalación y mantenimiento de equipo oceanográfico para estimar la PP y medir la temperatura del agua de mar junto con la toma de muestras *in situ*.

## 4.6.2 Fragmentación de hábitat y cambios en la distribución de especies

### 4.6.2.1 Antecedentes y justificación

La fragmentación de hábitat es una de las causas principales de la pérdida de la biodiversidad. Se refiere a la pérdida de un parche continuo de hábitat para dar paso a varios parches de hábitats discontinuos y discretos en el espacio (Lawrence *et al.*, 2007). La pérdida y la fragmentación de hábitat pueden resultar en la creación de una metapoblación, con parches de hábitat de tamaño variable y con niveles variables de conexión genética entre las poblaciones de organismos presentes (Lawrence *et al.*, 2007; MacArthur y Wilson, 1967). Entre más grande sea un parche y mayor su nivel de conectividad a otros parches, mayor la riqueza y diversidad de especies presentes (MacArthur y Wilson, 1967).

Debido al cambio climático, el rango de temperaturas dentro de una ecorregión cambiará, junto con el régimen de disturbios presentes y de la distribución de las especies presentes, con efectos medibles al nivel de la metapoblación y al nivel de parche. Los comportamientos de forrajeo, de apareamiento y de crianza de organismos pueden verse afectados negativamente por la pérdida y los cambios en la composición del hábitat y en su fragmentación. Las dinámicas de las poblaciones afectadas pueden fluctuar y pueden resultar en una disminución o desaparición de poblaciones con repercusiones tanto ecológicas como económicas.

La pérdida de hábitat, su fragmentación y cambios en la distribución de especies requieren información actual tomada *in situ* con un enfoque sobre la diversidad, las condiciones del hábitat y la presencia de especies exóticas. De la misma manera, análisis de imágenes satelitales ayudarán a generar información a gran escala, tanto espacial como temporal. La identificación de hábitats que han sufrido grandes pérdidas y que se presentan en altos grados de fragmentación ayudará a medidas de manejo y a la toma de decisiones para las acciones de mitigación.

### 4.6.2.2 Actividades y términos

4.6.2.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento acerca de la fragmentación y pérdida de hábitat y de cambios en la distribución de especies insulares para cada región insular e islas prioritarias y en los ecosistemas marinos de mantos de macroalgas y de corales asociados para identificar vacíos de información a partir de revisión bibliográfica. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Evaluación del nivel de conocimiento actual de la fragmentación y pérdida de hábitat para ambientes terrestres y marinos de las regiones insulares junto con una evaluación en los cambios en la distribución de especies insulares.
- Identificación de fuentes de información para cada región insular y de los vacíos de información presentes.
- Identificación de estrategias y oportunidades para llenar los vacíos de información.



4.6.2.2.2 Evaluación de la fragmentación y pérdida de hábitat terrestre durante los últimos 20 años utilizando imágenes satelitales. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Cuantificación de la fragmentación y pérdida de hábitat terrestre para cada isla.
- Clasificación de las islas en términos del grado de pérdida y fragmentación de hábitat presente.
- Identificación de los hábitats vulnerables insulares.

4.6.2.2.3 Elaboración de una plan de trabajo de campo para generar información para los próximos 10 años de la pérdida de hábitat, su fragmentación y cambios en la distribución de especies prioritarias, con énfasis en las aves marinas y los pinnípedos como indicadores, para cada región insular.

### 4.6.3 Blanqueo de coral

#### 4.6.3.1 Antecedentes y justificación

Los corales viven en simbiosis con algas fotosintéticas llamadas zooxantelas. Ante estrés ambiental, los corales se blanquean debido a la pérdida de sus zooxantelas o a la disminución de pigmentos fotosintéticos (Carilli, 2009; Hoegh-Guldberg, 1999). Incrementos en la frecuencia y magnitud de eventos de blanqueo coralino están asociados a incrementos en la temperatura y la acidificación del agua de mar debido al cambio climático. Estos cambios abióticos tendrán repercusiones dañinas para los corales y los organismos asociados a ellos, reflejados en una pérdida de biodiversidad y riqueza de especies.

La gran diversidad y riqueza de especies marinas observada en arrecifes de coral es vulnerable ante eventos de blanqueo que resultan en el daño o la mortalidad de corales y que han actuado como gatillos para iniciar un cambio de fase en la cual mantos de macroalgas cubren arrecifes de coral (Shulman and Robertson, 1996). La disminución en la reducción en la cobertura coralina debido al blanqueo o a un cambio de fase resulta en la pérdida de diversidad (Williams and Bunkley-Williams, 1990; Leder *et al.*, 1991). Además, corales que han sufrido eventos de blanqueo presentan una disminución en su fecundidad y son menos resilientes ante un disturbio (Ward *et al.*, 1998), poniendo en riesgo la persistencia de estos sistemas en el futuro.

En el caso del blanqueo coralino, datos asociados de la temperatura y del pH del agua de mar se pueden obtener a través de imágenes satelitales. Estas imágenes darán información acerca de cambios en la temperatura superficial a lo largo del tiempo para cada región insular. Además de imágenes satelitales, mediciones de temperatura tomadas *in situ* utilizando anclajes de termistores suspendidos en la vertical son necesarias para obtener series de tiempo de la temperatura de la columna de agua. En conjunto, las imágenes satelitales y las mediciones *in situ*, ofrecerán información acerca de las

condiciones actuales en cada arrecife junto con información asociada a la variabilidad en escalas de tiempo menores. Adicionalmente, el pH medido *in situ* proveerá información de la alcalinidad del agua de mar en cada región insular. Junto con estas mediciones, estimaciones de la diversidad de organismos asociados al arrecife de coral, y de un listado de registro de especies para cada arrecife y muestras biológicas del tejido de coral permitirán hacer un primer diagnóstico de la salud del ecosistema.

### 4.6.3.2 Actividades y términos

4.6.3.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento de blanqueo coralino para cada región insular con el fin de identificar vacíos de información a partir de una revisión bibliográfica. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Evaluación del nivel de conocimiento actual de eventos de blanqueo coralino para cada región insular con arrecifes coralinos.
- Identificación de fuentes de información para cada región insular y de los vacíos de información presentes.
- Identificación de estrategias y oportunidades para llenar los vacíos de información.

4.6.3.2.2 Elaboración de un plan de trabajo de campo para generar información actual y 10 años a futuro del blanqueo coralino, para cada isla, incluyendo la toma de muestras de coral para la identificación de posibles enfermedades presentes.

## 4.7 Mitigación y adaptación

### 4.7.1 Restauración

#### 4.7.1.1 Antecedentes y justificación

Las acciones de conservación y restauración de los ecosistemas son un elemento clave en el proceso de adaptación al cambio climático (INECC-SEMARNAT, 2012). En las islas mexicanas se han realizado exitosamente diversas estrategias de restauración, siendo una de las principales la erradicación de especies exóticas invasoras, mediante la aplicación de un Programa Nacional de Restauración Insular, que se ha abordado bajo un enfoque de colaboración interinstitucional (Aguirre Muñoz *et al.*, 2016). Esto debido a que las especies exóticas invasoras representan la mayor amenaza sobre la biota nativa de las islas (Latofski-Robles *et al.*, 2014), alterando el equilibrio ecológico de los ecosistemas insulares, causando extinciones y, en general, disminuyendo la capacidad adaptativa y resiliencia de los ecosistemas ante los efectos del cambio climático. Otras acciones de restauración, ya con ciertos avances en México, consisten en la restauración activa de comunidades vegetales y en

inducir la recolonización de las aves marinas así como la mejora de sus hábitats, en particular de sus sitios de anidación.

## 4.7.2 Actividades y términos

4.7.2.1.1 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre el estado actual de las acciones de restauración en las islas mexicanas a través de las erradicaciones de especies exóticas invasoras, revisando y actualizando las prioridades para las erradicaciones pendientes. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:

- Identificación de las erradicaciones que se han realizado exitosamente en cada una de las islas mexicanas, indicando los efectos sobre los ecosistemas insulares que han derivado de las mismas (e.g. efectos sobre las poblaciones de aves marinas, reptiles y comunidades vegetales). Incluir un listado de islas con presencia de especies exóticas invasoras, evaluando la factibilidad de su erradicación.
- Revisión y análisis comparativo de los procedimientos que han sido utilizados en México y otros países para la priorización y planificación de acciones de restauración en islas mediante la erradicación de especies exóticas invasoras, identificando los criterios considerados en los análisis.
- Evaluación de métodos de priorización para la restauración de las islas mexicanas, considerando la posible integración de criterios basados en los impactos del cambio climático y sus escenarios a futuro, así como la vulnerabilidad de los ecosistemas insulares y el efecto sinérgico que representa la combinación de los factores de presión asociados al cambio climático y aquéllos ajenos al mismo.

4.7.2.1.2 Identificación de los actores involucrados en la restauración de los ecosistemas insulares, así como los instrumentos de conservación y restauración en México. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a incluir son:

- Identificación de las instituciones gubernamentales, académicas y organizaciones de la sociedad civil relevantes y activas en el tema.
- Revisión de los lineamientos para la restauración de los ecosistemas (con énfasis en las islas) establecidos en la legislación mexicana aplicable, así como en estrategias y programas a nivel nacional y regional.

4.7.2.1.3 Elaboración de un plan para dar seguimiento y fortalecer las estrategias de restauración de las islas mexicanas con el fin de incrementar su capacidad adaptativa ante el cambio climático. Narrativa de 10 páginas. Los puntos a considerar son:

- Seguimiento y actualización de las estrategias de priorización y planificación para la restauración mediante la erradicación de especies exóticas invasoras.
- Realización de monitoreos post-erradicación en los ecosistemas insulares y evaluación de la respuesta de las poblaciones de aves marinas y otras especies afectadas por este factor de presión.

- Seguimiento a los sistemas de atracción social para aves marinas que fueron extirpadas como consecuencia de las especies exóticas invasoras.
- Otras actividades para el mejoramiento del hábitat e incremento de su capacidad de su capacidad adaptativa ante los efectos del cambio climático, tales como la reforestación (terrestre y marina), la restauración de suelos, la instalación de arrecifes artificiales y la creación de corredores ecológicos, así como la protección de áreas de reproducción y crianza de las especies.

### 4.7.3 Resiliencia

#### 4.7.3.1 Antecedentes y justificación

La resiliencia de un ecosistema es la capacidad de resistencia del ecosistema en cuestión ante un disturbio y de recuperarse a un estado previo de equilibrio (Holling, 1973; Côté and Darling, 2010). Una de las mayores y serias consecuencias del cambio climático es justamente el incremento en la frecuencia y magnitud de disturbios (IPCC AR5, 2014). Ante esta amenaza, los ecosistemas que presentan una baja capacidad de resistir un disturbio o de recuperarse son vulnerables a un cambio de fase caracterizado por una pérdida de biodiversidad (Holling, 1973; Côté and Darling, 2010). Por lo tanto, acciones que incrementan la resistencia o capacidad recuperativa de un ecosistema ayudarán a mitigar los efectos del cambio climático en sistemas insulares. Para incrementar la resiliencia de las islas de México ante el cambio climático, se propone invertir en la investigación científica con el propósito específico de identificar ecosistemas insulares vulnerables y críticos ante disturbios asociados al cambio climático, así como plantear medidas para fortalecer la diversidad funcional de cada ecosistema insular.

#### 4.7.3.2 Actividades y términos

- 4.7.3.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento de la diversidad funcional y del régimen de disturbios para cada región insular con el fin de identificar vacíos de información a través de una revisión bibliográfica. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:
- Evaluación del nivel de conocimiento actual de la diversidad funcional y del régimen de disturbios en ecosistemas insulares.
  - Identificación de fuentes de información por región insular de México y de los vacíos de información presentes.
  - Identificación de estrategias y oportunidades para llenar los vacíos de información.

- 4.7.3.2.2 Elaboración de un plan de evaluación de la vulnerabilidad del territorio insular mexicano ante el cambio climático con el objetivo de establecer las bases para la formulación de estrategias de adaptación. Esto, mediante herramientas como la evaluación rápida de la vulnerabilidad en áreas marinas protegidas de América del Norte (RVA, por sus siglas en inglés) creada por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA, 2016).
- 4.7.3.2.3 Utilizando la información disponible en la literatura científica y de datos de propiedad intelectual común, generar mapas de vulnerabilidad (baja resiliencia) para cada región insular con el fin de priorizar los esfuerzos de protección y la toma de decisiones.
- 4.7.3.2.4 Identificar corredores ecológicos y áreas de hábitat alternos para generar planes de manejo y de protección con el fin de incrementar la resiliencia de sistemas insulares vulnerables. Proteger ecosistemas vulnerables y prioritarios ayudará a incrementar tanto la resistencia de los ecosistemas como su capacidad restaurativa.
- 4.7.3.2.5 Crear vínculos con actores económicos e individuos que utilizan los recursos de las islas para promover esfuerzos de conservación, con el objetivo específico de incrementar la resiliencia de ecosistemas insulares a través de la educación ambiental y la generación del aprovechamiento racional y, en su caso alternativo, de los recursos naturales insulares.

## 4.7.4 Prevención

### 4.7.4.1 Antecedentes y justificación

Mitigar los impactos del cambio climático en ecosistemas insulares implica invertir en estrategias que promuevan la prevención de los efectos dañinos asociados a través de estrategias enfocadas en: 1) la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes ambientales de vida corta; 2) la promoción de una cultura climática y de divulgación de información con las poblaciones locales; 3) el desarrollo de energías derivadas de fuentes alternativas (e.g., energía solar, eólica y del oleaje). Para llevar a cabo las estrategias anteriores se deberá trabajar en conjunto con el gobierno, los actores sociales de las comunidades locales, instituciones académicas y el sector privado.

De esta manera, se promoverá la creación de programas enfocados en la investigación e implementación de energías alternas, así como en la creación de campañas y programas de capacitación, con la finalidad de educar y sensibilizar a la población para inducir cambios en patrones de producción y consumo; la capacitación en materia de cambio climático a los tomadores de decisiones y los responsables de la asignación de presupuesto en los tres niveles de gobierno y el poder legislativo; y la creación de programas para promover las buenas prácticas y el uso de energías limpias en el sector industrial.

#### **4.7.4.2 Actividades y términos**

- 4.7.4.2.1 Evaluación del estado actual del conocimiento de las medidas de prevención en existencia para cada región insular. Narrativa de 10 páginas. Los subtemas a cubrir son:
- Evaluación de las medidas de prevención en existencia para cada isla.
  - Generación de un listado de medidas de prevención pertinentes para los sistemas insulares de México.
  - Identificación de estrategias para mejorar el nivel de protección en el territorio terrestre y marino de las islas de México.
- 4.7.4.2.2 Identificación de estrategias y oportunidades para fortalecer e implementar estrategias preventivas en cada región insular.
- 4.7.4.2.3 Generación de un plan estratégico para implementar medidas de prevención a nivel local, regional y nacional para las islas de México.
- 4.7.4.2.4 Identificación de estrategias y oportunidades para la creación de programas enfocados en la investigación e implementación de energías alternativas, así como en educación y sensibilización de la población en general y a los tomadores de decisiones, con el fin de inducir cambios drásticos en patrones de producción y consumo.

### **4.7.5 Casos prioritarios**

#### **4.7.5.1 Antecedentes y justificación**

La integración de una perspectiva que amalgame y de énfasis a los valores de la conservación ambiental como base para las pesquerías artesanales y las actividades económicas, los aspectos sociales y culturales, y la soberanía de las islas de México, se vuelve necesaria para establecer prioridades e invertir recursos escasos de manera racional. Esto porque el país tiene tal cantidad de islas que no resulta factible considerar que todas podrán ser atendidas simultáneamente en términos de su vulnerabilidad por la amenaza del cambio climático y las medidas de mitigación y adaptación adecuados. Para establecer prioridades, un antecedente muy útil —que a su vez integra una serie de ejercicios previos— como base para esta sección, es presentado en forma detallada en la Estrategia Nacional para la Conservación y el Desarrollo Sustentable del Territorio Insular Mexicano (Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano, 2012). A partir de una serie de criterios explícitos, y además concediendo de antemano una cobertura de islas de todas las regiones de México, se elaboró una lista de "islas prioritarias", con actividades para cada uno de los plazos marcados y para cada isla o archipiélago por la propia estrategia.

Ahora bien, a la luz de la claridad creciente sobre los impactos del cambio climático en ecosistemas marinos, costeros e insulares —cambios y disrupción en la productividad orgánica de los ecosistemas,

aumento en las temperaturas de las aguas marinas adyacentes a las islas, reducción de los bosques de sargazo, blanqueo del coral y aumento del nivel mar—, es posible ajustar la lista, reduciéndola y ponderando con valores máximos los aspectos de soberanía, sociales y económicos. Esto no implica que se descarten las actividades consideradas en otros apartados de este reporte y que obedece a recortes temáticos. Más bien, se plantea que a estas islas que resulten como prioritarias bajo este enfoque, se les reconozca con un recorte geográfico, es decir, de la isla o archipiélago en sí. El objetivo en estos casos sería el de reconocer impactos posibles del cambio climático en las actividades económicas de estas islas, así como en el tema de soberanía y la zona económica exclusiva (ZEE), de darse pérdida territorial por aumento en el nivel del mar.

A reserva de determinar categorías y hacer un ejercicio formal de priorización con los criterios mencionados, se plantea en principio y a modo de hipótesis de trabajo —a partir de la experiencia de los que elaboran esta propuesta—, que el grupo de islas prioritarias para este apartado son: Cedros y San Benito, Guadalupe, corredor de islas del Pacífico de Baja California (Corriente de California), Archipiélago Islas Marías, Archipiélago de Revillagigedo, Arrecife Alacranes, Isla Mujeres, Cozumel y Banco Chinchorro.

## 4.7.5.2 Actividades y términos

- 4.7.5.2.1 Ejercicio de priorización formal, a partir de las islas que tienen población humana y de aquellas que son sustento importante de actividades económicas —islas del Pacífico de Baja California, Cozumel, Isla Mujeres y Banco Chinchorro—, incluyendo sus aguas adyacentes e infraestructura económica —Cedros—, o clave en temas de soberanía y sociales —Islas Marías, Revillagigedo y Alacranes—, seleccionando un grupo de no más de diez islas o archipiélagos.
- 4.7.5.2.2 Revisión bibliográfica exhaustiva sobre aspectos económicos, sociales, de población, culturales, históricos y arqueológicos de las islas seleccionadas. El tema de pesquerías artesanales, actividad económica fundamental de gran cantidad de comunidades locales, ejercida por cooperativas con derechos históricos, asentadas en las islas o en costas continentales cercanas, merece atención especial (e.g., Méndez Sánchez 2012). El análisis incluirá entrevistas presenciales con actores clave. La revisión habrá de incluir literatura gris: documentos no publicados, tales como reportes o informes de investigación, notas de prensa, tesis de grado y posgrado, memorias de congresos, programas y proyectos de investigación, y productos de Internet. Narrativa de 10 páginas.
- 4.7.5.2.3 Identificación de impactos del cambio climático por cada una de los aspectos reconocidos, y propuestas fundadas y discutidas de las medidas de mitigación y adaptación correspondientes. El objetivo ulterior es conservar la soberanía territorial que dan las islas a la nación, incluyendo la ZEE; el reforzamiento de las actividades económicas en marcha, incluyendo infraestructura amenazada, y su eventual ajuste o indicación de posibles alternativas, si fuera necesario; medidas generales de adaptación, incluyendo la adopción de energías alternativas y diseño de cambio hacia comunidades intencionales que respondan a los retos que impone el cambio climático. Narrativa de 10 páginas.



## 4.8 Referencias

Acuerdo de París, 12 de diciembre de 2015.

Aguirre-Muñoz, A., A. Samaniego-Herrera, L. Luna-Mendoza, A. Ortiz-Alcaraz, F. Méndez-Sánchez & J. Hernández-Montoya. 2016. La restauración ambiental exitosa de las islas de México: una reflexión sobre los avances a la fecha y los retos por venir. *En: Ceccon E. y C. Martínez-Garza (coordinadoras). Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas.* Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Aguirre-Muñoz, A., A. Samaniego-Herrera, L. Luna-Mendoza, A. Ortiz-Alcaraz, M. Rodríguez-Malagón, F. Méndez-Sánchez, M. Félix-Lizárraga, J.C. Hernández-Montoya, R. González-Gómez, F. Torres-García, J.M. Barredo-Barberena & M. Latofski-Robles. 2011. Island restoration in Mexico: ecological outcomes after systematic eradications of invasive mammals IUCN, Gland, Switzerland. Pages 250-258 In: Veitch, C. R.; Clout, M. N. and Towns, D. R. (eds.). 2011. Island invasives: eradication and management. IUCN, Gland, Switzerland.

Beas-Luna, R. and L. B. Ladah. 2014. Latitudinal, seasonal, and small-scale spatial differences of the giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, and an herbivore at their southern range limit in the northern hemisphere. *Botánica Marina* 57(2): 73–83.

Carilli JE, Norris RD, Black BA, Walsh SM, McField M. 2009. Local Stressors Reduce Coral Resilience to Bleaching, *PLoS ONE* 4(7), e6324.

CCA. 2016. Herramienta para la evaluación rápida de la vulnerabilidad en áreas marinas protegidas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.

Challenger A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de Conservación. *En: Conservación de ecosistemas templados de montaña en México.* Instituto Nacional de Ecología, México.

Challenger, A. y Soberón J. 2008. Los ecosistemas terrestres, en *Capital Natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 87-108.

Chávez, E.A. 2014. Coral Reef Fisheries of the Gulf of Mexico and the Caribbean. *Proceedings of the 66th Gulf and Caribbean Fisheries Institute November 4 - 8, 2013 Corpus Christi, Texas USA*, pp. 10-17.

Cohen, E. B., W. C. Barrow, J. J. Buler, J. L. Deppe, A. Farnsworth, P. P. Marra, S. R. McWilliams, D. W. Mehlman, R. R. Wilson, M. S. Woodrey, & F. R. Moore. 2017. How do en route events around the Gulf of Mexico influence migratory landbird populations? *The Condor*, 119(2), 327-343. doi: 10.1650/condor-17-20.1

COLEF. 2017. México, Estados Unidos y Canadá trabajan para conservar ecosistemas compartidos. El Colef Press. 19 de mayo de 2017. <https://www.colef.mx/saladeprensa/?p=32810>

Collinge, S. K. 2009. Ecology of fragmented landscapes. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Comisión Mundial para el Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, La Carta de la Tierra, 1997.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.-The Nature Conservancy. 2011. Programa de adaptación al cambio climático en áreas naturales protegidas del complejo del Caribe de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.-The Nature Conservancy México.

Comité Asesor Nacional sobre el Territorio Insular Mexicano. 2012. Estrategia Nacional para la Conservación y el Desarrollo Sustentable del Territorio Insular Mexicano. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Gobernación, Secretaría de Marina-Armada de México y Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A.C. México, D.F. y Ensenada, B.C. 125 pp.

Comité Trilateral México, Canadá y Estados Unidos de América. 2014. Carta de Intención en materia de conservación y restauración de ecosistemas insulares de los Estados Unidos Mexicanos, de los Estados Unidos de América y de Canadá. SEMARNAT, Parks Canadá y USFWS. Querétaro, Qro., México. 20 de mayo de 2014. 4 pp.

CONABIO, s.f. Biodiversidad Mexicana - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.biodiversidad.gob.mx/>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2017

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2005. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento de la Reserva de la Biosfera Islas del Pacífico de California. México, D.F. 169 pp., más 3 anexos.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2017. Se colocan transmisores satelitales a elefantes marinos. Página web de la CONANP, consultada el 15 de junio de 2017. <https://www.gob.mx/conanp/prensa/se-colocan-transmisores-satelitales-a-elefantes-marinos>

Côté, I.M., E. S. Darling. 2010. Rethinking Ecosystem Resilience in the Face of Climate Change. PLoSBiol 8(7), e1000438.

Diario Oficial de la Federación, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 5 de febrero de 1917.

Diario Oficial de la Federación, Ley General de Cambio Climático, 6 de junio de 2012.

Diario Oficial de la Federación, Estrategia Nacional de Cambio Climático, 3 de junio de 2013.

Diario Oficial de la Federación, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 28 de enero de 1988.

Documentos Oficiales de la Asamblea General, cuadragésimo cuarto periodo de sesiones, Suplemento No. A/44/25.

DOF. 1928. Acuerdo Secretarial para la Designación como Zona Reservada para la Caza y Pesca de Especies Animales y vegetales isla de Guadalupe.

DOF. 1922. Acuerdo Presidencial reservando la Isla de Guadalupe, de la Baja California, para el fomento y desarrollo de las riquezas naturales que contiene.

DOF. 2016. Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Islas del Pacífico de la Península de Baja California. DOF - Diario Oficial de la Federación. 7 de diciembre de 2016. Ciudad de México, México. 47 pp. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5464451](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5464451)

Edwards, M.S. 2004. Estimating scale-dependency in disturbance impacts: El Niños and giant kelp forests in the northeast Pacific. *Oecologia* 138: 436–447.

Edwards, M.S. and J.A. Estes. 2006. Catastrophe, recovery and range limitation in NE Pacific kelp forests: a large-scale perspective. *Marine Ecology. Progr. Ser.* 320: 79–87.

Fraga María Celina, El derecho ambiental en el desarrollo humano, 2013.

Gallo Reynoso, J.P., J. Burney, J. Le Boeuf, A. L. Figueroa Carranza y M. O. Maravilla Chávez. 2005. Los pinnípedos de Isla Guadalupe. In: Santos del Prado K. y E. Peters (Compiladores). Isla Guadalupe, Restauración y Conservación. SEMARNAT, INE, CICESE, GECI y SEMAR. pp. 171-202.

García-Reyes, M. & J. Largier. 2010. Observations of increased wind-driven coastal upwelling off Central California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C04011).

Gómez Torres, M.M.C. Torres, M. P. Castillo. 2013. Programa de Adaptación al Cambio Climático.

Hernández-Montoya, J.C., L. Luna-Mendoza y A. Aguirre-Muñoz, F. Méndez-Sánchez, M. Félix-Lizárraga, and J.M. Barredo-Barberena. 2014. Laysan Albatross on Guadalupe Island, Mexico: Current Status and Conservation Actions. *Monographs of the Western North American Naturalist* 7, 543–554.

Hoegh-Guldberg O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50(8), 839 - 866.

Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1–24.

Iles, A. C., T. C. Gouhier, B. Menge, J. S. Stewart, A. J. Haupt & M. C. Lynch. 2012. Climate-driven trends and ecological implications of event-scale upwelling in the California Current System. *Global Change Biology*, 19:783–796.

- INECC-SEMARNAT. 2012. Adaptación al cambio climático en México: visión, elementos y criterios para la toma de decisiones. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, México.
- 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jessen, S. and M. Ban. 2003. Baja California to the Bering Sea: A North American marine conservation initiative. Wild Earth.
- Jessen, S., L. Morgan and J. Bezaury-Creel. 2016. Dare to be Deep: Sea States Report on North America's Marine Protected Areas (MPAs). Ottawa, Seattle, and México City: Canadian Parks and Wilderness Society, Marine Conservation Institute, 52 pp.
- Ji-sook, B. 2007. Extinct Sea Lions to Bring Back to Korea. Korea Times. September 5, 2007. [https://web.archive.org/web/20150924012502/http://koreatimes.co.kr/www/news/nation/2007/09/113\\_9626.html](https://web.archive.org/web/20150924012502/http://koreatimes.co.kr/www/news/nation/2007/09/113_9626.html)
- Ladah, L. B., J. Zertuche-González and G. Hernández-Carmona. 1999. Giant kelp (*Macrocystis pyrifera*, Phaeophyceae) recruitment near its southern limit in Baja California after mass disappearance during ENSO 1997–1998. *J. Phycol.* 35: 1106–1112.
- Lawrence, W. F., H. E. M. Nascimento, S. G. Lawrence, A. Andrade, R. M. Ewers, K. E. Harms. 2007. Habitat Fragmentation, Variable Edge Effects, and the Landscape-Divergence Hypothesis. *PLoS ONE* 2(10), e1017.
- Latofski-Robles, M., A. Aguirre-Muñoz, F. Méndez-Sánchez, H. Reyes-Hernández y S. Schlüter 2014. Prioritizing restoration actions for the islands of Mexico. *Monographs of the Western North American Naturalist* 7, 435-441.
- Leder, J.J., A. M. Szmant, P. K. Swart. 1991. The effect of prolonged “bleaching” on skeletal banding and stable isotopic composition in *Montastrea annularis*. *Coral Reefs* 10, 19–27.
- Letscher, R. T., F. Primeau, J. K. Moore. 2016. Nutrient budgets in the subtropical ocean gyres dominated by lateral transport. *Nature Geoscience* 9, 815–819.
- Lowry, L. 2017. *Zalophus japonicus*. Amended version. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T41667A113089431. 7 pp. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T41667A113089431.en>
- MacArthur, R. H. and E. O. Wilson. 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Mendelssohn, R. & F. B. Schwing. 2002. Common and uncommon trends in SST and wind stress in the California and Peru-Chile current systems. *Progress in Oceanography*, 53:141–162.

- Méndez Sánchez, F. A. 2012. Co-management and small-scale fisheries in Mexico: the case of a fishers' cooperative in Cedros and San Benito islands. Thesis. Master of Science in Environmental Management, The University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Mulder, C. P. H., W. B. Anderson, D. R. Towns, & P. J. Bellingham (Eds.). 2011. Seabird Islands: Ecology, Invasion, and Restoration. New York, NY, USA: Oxford University Press.
- Naciones Unidas, Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Nueva York, 9 de mayo de 1992.
- Naciones Unidas, Protocolo de Kyoto, 1998.
- Narayan, N., P. S. Mulitza & M. Schulz. 2010. Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century. *Ocean Science*, 6:815–823.
- Patti, B., C. Guisande, I. Riveiro, P. Thejll, A. Cuttitta, A. Bonanno, G. Basilone, G. Buscaino & S. Mazzola. 2010. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> and solar activity on wind regime and water column stability in the major global upwelling areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(1):45–52.
- PNUMA, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2004.
- Registro Oficial. 2015. Suplemento. Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos, 11 de junio de 2015.
- Roberge, J. M. and A. Stam, P. 2004, Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool. *Conservation Biology*, 18:76–85. doi:10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x
- Rykaczewski, R. R. & D. M. Checkley. 2008. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6):1965–1970.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra. edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Disponible en: [http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx\\_Cont.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf)
- Saunders, A.; Parkes, J.P.; Aguirre-Muñoz, A. and Morrison, S.A. 2011. Increasing the return on investments in island restoration. In: Veitch, C. R.; Clout, M. N. and Towns, D. R. (eds.). *Island invasives: eradication and management*, pp. 492-495. IUCN, Gland, Switzerland
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. 2010. Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 y las Metas de Aichi, 2010.
- Seo, H., K. H. Brink, C. E. Dorman, D. Koracin & C. Edwards. 2012. What determines the spatial pattern in summer upwelling trends on the U.S. west coast? *Journal of Geophysical Research*, 117(C08012).
- Shulman, M. and D. R. Robertson. 1996. Changes in the coral reefs of San Blas, Caribbean Panama: 1983–1990. *Coral Reefs* 15, 231–6.

Spalding, M. D., H. E. Fox, Gerald R. A., N. Davidson et al. 2007. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. *Bioscience* Vol. 57 No. 7, July/August 2007, pp. 573–583.

Subgrupo del Catálogo de Islas Nacionales del Grupo Técnico para la Delimitación de las Zonas Marítimas Mexicanas, 2014. Catálogo del Territorio Insular Mexicano. INEGI, SEGOB, SEMAR, SEMARNAR, SER, SCT, INECC, CONANP, UNAM. Aguascalientes, Ags.

Sullivan Sealy, K. and G. Bustamante. 1999. Setting Geographic Priorities for Marine Conservation in Latin America and the Caribbean. Arlington (VA), The Nature Conservancy. 125 pp.

Towns, D.R. 2011. Eradications of vertebrate pests from islands around New Zealand: what have we delivered and what have we learned? Pages 364-371 In: Veitch, C. R.; Clout, M. N. and Towns, D. R. (eds.). 2011. Island invasives: eradication and management. IUCN, Gland, Switzerland.

Varela, R., I. Álvarez, F. Santos, M. de Castro & M. Gómez-Gesteira. 2015. Has upwelling strengthened along worldwide coasts over 1982-2010? *Scientific Reports*, 5(10016).

Ward, S., R. Jones, P. Harrison, O. Hoegh-Guldberg. 1998. Changes in the reproduction, lipids and MAAs of corals following the GBR mass bleaching event. Abstract, Australian Coral Reef Society annual meeting in Port Douglas. (Ed. S. Ward.) p. 10. (University of Queensland Press).

Wild et al. 2011. Climate change impedes scleractinian corals as primary reef ecosystem engineers. *Marine and Freshwater Research* 62, 205–215.

Williams, E. H. Jr. and L. Bunkley-Williams. 1990. The world-wide coral reef bleaching cycle and related sources of coral mortality. *Atoll Research Bulletin* 355, 1–72.

Whittaker R. J. y J. M. Fernández-Palacios. 2006. *Island Biogeography. Ecology, Evolution, and Conservation*, Second Edition. Oxford University Press.

Wolf, S., B. Keitt, A. Aguirre-Muñoz, B. Tershy, E. Palacios and D. Croll. 2006. Transboundary Seabird Conservation in an Important North American Marine Ecoregion. *Environmental Conservation* 33 (4): 294–305 doi:10.1017/S0376892906003353

Woodson, C. B. and S. Y. Litvin. 2015. Oceanfronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling. *PNAS* 112(6), 1710-1715.



Plataforma de colaboración sobre  
**CAMBIO CLIMÁTICO  
Y CRECIMIENTO VERDE**  
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de  
Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y  
México, todos los derechos reservados

Derechos reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P. 11000

[www.mx.undp.org](http://www.mx.undp.org)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CDMX CP. 14210

[www.gob.mx/inecc](http://www.gob.mx/inecc)



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio  
de las personas  
y las naciones