



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES**

**ARRECIFES CORALINOS DEL PACÍFICO MEXICANO: DETERMINACIÓN  
Y PREDICCIONES DE CAMBIOS EN SU DISTRIBUCIÓN POTENCIAL  
OCASIONADOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**TESIS INDIVIDUAL**

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE

**LICENCIADA EN BIOLOGÍA**

PRESENTA:  
GUADALUPE PAOLA FAVIÁN HUERTA

DIRIGIDO POR:  
DANIEL MARTÍN AULIZ ORTIZ

Querétaro, Qro., Julio 2025

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



## CC BY-NC-ND 4.0 DEED

### Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

#### **Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

#### **Bajo los siguientes términos:**



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



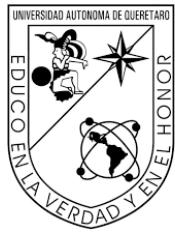
**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

#### **Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ciencias Naturales



Arrecifes Coralinos del Pacífico Mexicano: determinación y predicciones de cambios en su distribución potencial ocasionados por el cambio climático

**Tesis individual**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**LICENCIADA EN BIOLOGÍA**

**Presenta:**

Guadalupe Paola Favián Huerta

**Dirigido por:**

Daniel Martín Auliz Ortiz

**Sinodales:**

Fabiola Janette Guerrero de la Rosa \_\_\_\_\_

Mónica Elisa Quejeiro Bolaños \_\_\_\_\_

Carlos Alberto López González \_\_\_\_\_

Israel Gustavo Carrillo Ángeles \_\_\_\_\_

Centro Universitario

Querétaro, Qro

Julio, 2025

## Resumen

Los arrecifes de coral son fundamentales para el correcto funcionamiento de los procesos que ocurren en la biosfera y generan ganancias económicas netas de 30 billones de dólares alrededor del mundo. Pese a su gran importancia, están sometidos a una serie de amenazas, tal como el cambio climático, ya que representa la exposición de las especies de coral a nuevas condiciones ambientales con potenciales repercusiones negativas. De acuerdo con el IPCC, en un escenario con un incremento de temperatura de 1.5°C, los corales tendrían un declive en su riqueza de especies de entre el 70% al 90% a nivel mundial. Por ello, es de vital importancia conocer la respuesta de las especies coralinas al cambio climático por medio de herramientas como los modelos de distribución potencial. El presente trabajo modeló la distribución potencial presente y futura para el año 2050 bajo los escenarios climáticos RCP 2.5 y RCP 8.5 de las principales especies de coral constructoras de arrecifes en el Pacífico mexicano: *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora capitata* y *Pavona gigantea*, de acuerdo a las variables ambientales más importantes: temperatura superficial oceánica, salinidad, calcita, pH, hierro, coeficiente de atenuación y nitratos. El área de estudio se extendió por el pacífico mexicano, desde las costas de Baja California Norte hasta las costas de Ecuador, formando un polígono con las Islas Revillagigedo y Galápagos, e incluye al Mar de Cortés. Se obtuvo que, en el año 2050, la temperatura superficial del océano incrementará, y, en consecuencia, el área de distribución potencial de los corales disminuye, quedando hábitats en las costas de Jalisco, Oaxaca y Sinaloa. Esta pérdida de hábitat con respecto al presente será mayor en el escenario RCP 8.5. En conclusión, en el RCP 2.6 se lograría preservar mejor el hábitat de los corales para su supervivencia, sin embargo, en caso de no lograr controlar las emisiones de GEI y dado el escenario RCP 8.5, nos enfrentaremos a una alarmante pérdida de hábitat para los corales, por ello, es de vital importancia impulsar el desarrollo de políticas que realicen las medidas de conservación pertinentes.

**Palabras clave:** arrecife, coral, zooxantela, simbiosis, cambio climático, calentamiento

global, RCPs, Pacífico, modelaje, distribución potencial, nicho, temperatura.

## Abstract

Coral reefs are essential for the proper functioning of biosphere processes and generate net economic gains of \$30 billion worldwide. Despite their great importance, they are subject to a series of threats, such as climate change, which exposes coral species to new environmental conditions with potentially negative impacts. According to the IPCC, in a scenario with a 1.5°C temperature increase, coral species richness would decline between 70% and 90% worldwide. Therefore, it is vitally important to understand the response of coral species to climate change through tools such as potential distribution models. This work modeled the present and future potential distribution for the year 2050 under the RCP 2.5 and RCP 8.5 climate scenarios of the main reef-building coral species in the Mexican Pacific: *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora capitata* and *Pavona gigantea*, according to the most important environmental variables: ocean surface temperature, salinity, calcite, pH, iron, attenuation coefficient and nitrates. The study area was extended across the Mexican Pacific, from the coasts of Baja California Norte to the coasts of Ecuador, forming a polygon with the Revillagigedo and Galapagos Islands, and including the Sea of Cortez. It was found that, by 2050, ocean surface temperatures will increase, and consequently, the potential distribution area of corals will decrease, leaving habitats on the coasts of Jalisco, Oaxaca, and Sinaloa. This habitat loss compared to the present will be greater under the RCP 8.5 scenario. In conclusion, under RCP 2.6, coral habitat would be better preserved for their survival. However, if GHG emissions are not controlled, given the RCP 8.5 scenario, we will face an alarming loss of coral habitat. Therefore, it is vitally important to promote the development of policies that implement relevant conservation measures.

**Keywords:** reef, coral, zooxanthellae, symbiosis, climate change, global warming, RCPs, Pacific, modeling, potential distribution, niche, temperature.

## **Dedicatorias**

A Any, Tita y Miriam, mi inspiración.  
A Poli y Manuel, por la vida.  
Para Ali, Astrid, Karen y Erick, mi motivación.

A los corales, esos seres tan diminutos pero grandes al mismo tiempo, los héroes silenciosos e invisibles a los que les debemos tanto.

## Agradecimientos

Agradezco infinitamente al Dr. Daniel Martín Auliz Ortiz por dirigir la presente tesis, guiarme y acompañarme pacientemente a lo largo de todo el proceso. Gracias por su mentoría y guía en el camino de la ciencia. Por su paciencia, dedicación, disposición, entusiasmo e interés, así como por su gran comprensión a las situaciones personales que ocurrieron en estos años. Por todo su apoyo en los congresos. Sin duda alguna, no pude haber tenido un mejor mentor. Simplemente, gracias.

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional. Agradezco a mis padres, Poli y Manuel por darme tanto, por mis estudios y apoyarme siempre en mis decisiones. Gracias por traerme a este mundo para admirar la belleza de la vida.

Agradezco a mis hermanas, a quienes les debo tanto. Gracias por apoyarme y estar para mí desde mi primer día en este mundo, hasta el día de hoy. Gracias a Mimi por estar presente y cuidarme tanto en mis primeros años de vida. Gracias a Tita por siempre apoyarme y acompañarme a donde sea que vaya, gracias por cuidarme tanto y ser mi gran compañera de aventuras. Gracias a Any por su amor, sus ánimos y su apoyo incondicional, especialmente estos últimos años, sin ti, esta investigación no habría sido posible. Nada de lo que soy ni de lo que he alcanzado habría sido posible sin ustedes. Todos mis logros, son tuyos también, hasta mi último día.

Gracias a Ali, Astrid, Karen y Erick por motivar este trabajo e inspirarme a obrar en que vivan en un mundo mejor.

Gracias a mis amistades, por su acompañamiento a lo largo de este trabajo y creer en mí cuando yo no lo hago. Agradezco a Judith Pérez, mi gran amiga, por los ánimos, el apoyo incondicional, el amor y la amistad que me ha brindado todos estos años. Gracias por ser mi refugio en la tormenta. Gracias a Eva Sarahí, Paulina Ortíz y Natalia Granillo, por ser mis grandes amigas de la licenciatura. Por toda la ayuda, el compañerismo y apoyo que me han brindado, tanto como para sobrevivir a la universidad como a la vida adulta. Sin ustedes no habría llegado hasta aquí.

Gracias a todos mis profesores de la licenciatura, por formarme como bióloga y compartirme sus enseñanzas. Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Ciencias Naturales, por ser mi casa durante cinco años. Gracias a la Biología, por expandir mi mundo y visión, por enseñarme a amar la vida.

Agradezco infinitamente a todas las personas que hicieron posible este trabajo.

# Índice

Resumen.....	3
I. Introducción.....	13
1.1.Arrecifes de coral.....	13
1.1.1. Generalidades.....	13
1.1.2. Biología y ecología.....	14
1.1.3. Importancia biológica, ecosistémica y económica.....	16
1.2.Cambio climático.....	17
1.2.1. Bases del cambio climático.....	17
1.2.2. Efectos del cambio climático en los ecosistemas arrecifales.....	19
1.2.3. Escenarios climáticos .....	22
1.3.Modelos de distribución potencial.....	23
1.4. Antecedentes .....	25
II. Justificación.....	28
III. Hipótesis.....	28
IV. Objetivos.....	28
V. Metodología.....	30
5.1.Área de estudio.....	30
5.1.1. Pacífico Oriental Tropical.....	30
5.1.2. Área accesible M.....	30

5.2. Obtención de datos y limpieza de registros.....	33
5.3. Selección de variables ambientales.....	35
5.3.1. Descarga de datos.....	35
5.3.2. Selección de variables.....	36
5.4. Modelaje de distribución potencial.....	43
5.5. Determinación de cambios en la temperatura.....	46
5.6. Obtención de áreas de riqueza, presencia y ausencia.....	46
5.6.1. Mapas de distribución .....	48
5.6.2. Creación de mapas de riqueza.....	48
5.6.3. Determinación de las áreas perdidas .....	49
5.7. Análisis estadísticos .....	50
<b>VI. Resultados.....</b>	<b>52</b>
6.1.Mapas de cambio de temperatura.....	52
6.2.Distribución potencial .....	54
6.2.1. Presente .....	54
6.2.2. Futuro (año 2050) .....	56
6.3.Riqueza de especies.....	64
6.4.Pérdida de áreas de distribución estimada .....	68
6.5. Análisis estadísticos .....	71
<b>VII. Discusión .....</b>	<b>80</b>

VIII.	Conclusiones .....	87
IX.	Bibliografía .....	89

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Rango de factores requeridos para el desarrollo de corales.....	16
Cuadro 2. Número de registros por especie totales iniciales (obtenidos) y finales (filtrados) después de la limpieza de datos descrita en el texto.....	35
Cuadro 3. Porcentaje de contribución para cada variable analizada en la segunda etapa de acuerdo con índice de jackknife.....	41
Cuadro 4. Valores de umbral 10 percentil para cada especie bajo los dos escenarios climáticos.....	47
Cuadro 5. Valores AUC de la curva ROC por especie en cada escenario.....	55
Cuadro 6. Extensión de área (distribución potencial) y pérdida de área por especie de cada escenario de cambio climático con respecto al presente.....	69
Cuadro 7. Comparación de la probabilidad de pérdida de áreas de distribución por pares de especies en el escenario RCP 2.6.....	72
Cuadro 8. Relación de valores para Áreas invadidas en escenario RCP 2.6.....	73
Cuadro 9. Relación de valores para Áreas perdidas en escenario RCP 8.5.....	75
Cuadro 10. Relación de valores para Áreas invadidas en escenario RCP 8.5.....	78

## Índice de figuras

Figura 1. Gráfica elaborada por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) que muestra el incremento de la temperatura global desde 1880 hasta el año 2000.....	17
Figura 2. Esquema elaborado por Baird (2009) que muestra el proceso de blanqueamiento coralino.....	19
Figura 3. Temperatura global promedio de la superficie oceánica de acuerdo con Meinshausen y colaboradores (2011).....	22
Figura 4. Diagrama BAM elaborado por Barve y colaboradores (2011) que representa los factores A (abióticos), B (bióticos) y M (movimiento).....	24
Figura 5. El área de estudio para el escenario presente.....	31
Figura 6. Grupo de prueba #1 de correlación de variables.....	36
Figura 7. Grupo 2.1. Productividad primaria, clorofila y fitoplancton vs coeficiente de atenuación.....	37
Figura 8. Grupo 2.2. Productividad primaria, fitoplancton y clorofila vs oxígeno disuelto.....	37
Figura 9. Grupo 3.1. oxígeno, temperatura, fosfatos y nitratos.....	38
Figura 10. Oxígeno, temperatura, hierro y silicatos.....	39
Figura 11. Coeficiente de Atenuación promedio y clorofila correlacionadas con un valor de 0.71.....	41
Figura 12. Rango de incremento de temperatura de los escenarios futuros para el año 2050.....	51
Figura 13. Mapa de cambios en la temperatura en el escenario RCP 2.6.....	52
Figura 14. Mapa de cambios en la temperatura en el escenario RCP 8.5.....	53
Figura 15. Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de <i>Porites panamensis</i> (izquierda) y <i>Pocillopora verrucosa</i> (derecha).....	57
Figura 16. Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de <i>Pocillopora damicornis</i> (izquierda) y <i>Pocillopora capitata</i> (derecha).....	59
Figura 17. Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de <i>Pavona gigantea</i> (izquierda) y <i>Porites lobata</i> (derecha).....	61
Figura 18. Distribución potencial de <i>Pocillopora meandrina</i> para los diferentes escenarios climáticos.....	63
Figura 19. Mapa de áreas de riqueza en el presente.....	65
Figura 20. Mapa de áreas de riqueza en el escenario 2.6.....	66
Figura 21. Mapa de áreas de riqueza en el escenario 8.5.....	67
Figura 22. Pérdida de especies.....	68

Figura 23. Comparación de la probabilidad promedio de perdida de distribución para las especies de corales en el escenario RCP 2.6.....	73
Figura 24. Comparación de la probabilidad de invadir nuevas áreas de distribución potencial por especie en el escenario climático RCP 2.6.....	75
Figura 25. Comparación de hábitat perdido para las especies de corales en el escenario RCP 8.5.....	77
Figura 26. Comparación de nuevas áreas de distribución potencial invadidas por especie en el escenario climático RCP 8.5.....	79
Figura 27. Comparación de probabilidad de pérdida de hábitat por escenario climático.....	79

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Arrecifes de coral

#### 1.1.1. Generalidades

Un arrecife es una formación marina de sustratos duros y compactos, ya sea de origen geológico o biológico, que aflora sobre el litoral o sublitoral en la cual se interrelacionan diversos organismos. En la actualidad los arrecifes de mayor relevancia son los arrecifes de coral (Templado et al, 2009).

Por su parte, los corales son cnidarios que pertenecen a la clase Anthozoa, la cual se divide en 2 subclases: Alcyonaria (Octocoralaria) y Zoantharia (Hexacoralaria); los primeros corresponden a los llamados “corales blandos” o ahermatípicos, en tanto que los segundos son denominados “corales duros”, “corales pétreos” o hermatípicos (Torruco & González-Solís, 2012). A su vez, octocoralaria se compone de 3 órdenes: Alcyonacea (abanicos de mar), Pennatulacea y Helioporacea (McFadden, 2006); en tanto que Hexacoralaria presenta 6 órdenes: Actiniaria (anémonas de mar), Antipatharia (corales negros), Ceriantharia (anémonas de tubo), Scleractinia (corales pétreos), Corallimorpharia (corallimorpharianos) y Zoanthidea (Daly et al, 2003).

Así, se calcula en la actualidad existen de 6,142 a 7,500 especies de corales, de las cuales en México hay 20 especies de corales blandos y 60 especies de corales duros formadores de arrecifes, cuyo mayor centro de diversidad se encuentra en el Golfo de Mexico y en el Caribe medio (Torruco & González-Solís, 2012), sin embargo, el conteo de especies actuales de corales se encuentra en rezago, ya que se calcula que faltan alrededor de 1 millón de especies por describir (Patrón, 2008). Por otro lado, no todos los corales son importantes para la formación de arrecifes, ya que, aunque los corales blandos pueden llegar a formar colonias, no presentan esqueleto calcáreo, a diferencia de los corales duros, que es lo que les permite formar la matriz arrecifal, uno de los ecosistemas más importantes del mundo en cuanto a diversidad biológica (Lazcano-Pérez, 2020). Es por ello que en el presente trabajo se abordan únicamente especies de corales hermatípicos, ya que son las constructoras de arrecife.

### **1.1.2. Biología y ecología**

El ciclo de vida de los antozoos se caracteriza por iniciar con una larva plánula de vida libre, la cual, al igual que en el resto de los cnidarios, inicialmente se sostiene gracias a sus reservas energéticas, que determina no solo su supervivencia sino también la capacidad de la larva para desplazarse y dispersarse a sitios diferentes de su lugar de origen. A continuación, la larva se implanta en el sustrato para comenzar su metamorfosis a pólipo y dar inicio a su vida sésil (Lazcano-Pérez, 2020). Una vez que comienza su metamorfosis, se reorganizan los tejidos, comenzando a formarse un esqueleto externo con la deposición de carbonato de calcio de los restos de organismos que secretan este compuesto, tales como los propios corales, algas, etc. de modo que el calcio se va acumulando, compactando y solidificando hasta formar arrecifes (Torruco & González-Solís, 2012). Esta deposición sigue y el esqueleto continúa creciendo por el resto de la vida del pólipo. En estos casos es cuando en la unión de individuos en los corales coloniales llegan a formarse los arrecifes (Lazcano-Pérez, 2020).

De igual manera, una vez que la larva se asienta y el pólipo comienza su vida sésil desarrolla una boca, por la cual pueden capturar zooplancton y completar la alimentación suplementaria para el caso de los corales de aguas someras (Lazcano-Pérez, 2020). Esta alimentación es complementaria ya que los corales hermatípicos se caracterizan por encontrarse en una relación simbiótica con microalgas llamadas comúnmente zooxantelas, mismas que pertenecen el género *Symbiodinium* y que se encuentran viviendo dentro de los tejidos del coral, en donde llevan a cabo el proceso de fotosíntesis. Las zooxantelas proporcionan oxígeno, azúcares, aminoácidos y energía al pólipo, así como también les aporta la coloración, a cambio el pólipo le brinda a la zooxantela, además de protección del ambiente exterior, dióxido de carbono, fosfatos y nitratos (Torruco & González-Solís, 2012). De esta manera, gran parte de la nutrición de cada pólipo se lleva a cabo gracias a la asociación simbiótica que mantienen con las microalgas en su interior, que les aportan entre 70% y el 90% de sus requerimientos energéticos (Borneman, 2001).

Así, los corales formadores de arrecifes se caracterizan por distribuirse en regiones tropicales y subtropicales, debido a que requieren una alta cantidad de luz, que precisamente se encuentra en estas áreas en aguas poco profundas (Sheppard et al, 2018), sin embargo, también existen arrecifes coralinos a profundidades mayores entre los 30 y los 150 metros (Baker et al, 2016). Así, los corales que se encuentran a menos de 50 metros de profundidad son considerados someros, y a más de 50 metros, entre 50 y 150 metros o en profundidades aún mayores se encuentran los corales de aguas profundas, incluso se han registrado corales escleractinios a 1,626 metros (Auscavitch, et. al., 2020). Sin embargo, la asociación pólipos-zooxantela termina a alrededor de los 77 metros de profundidad (Trujillo-Ortegón, 2020).

En el Océano Pacífico, la latitud más norteña en la cual se distribuyen los corales es a los 31°N en las islas japonesas, sin embargo, es en las Islas Bermudas en el Océano Atlántico donde se encuentran distribuidos los corales en la latitud más alta hacia el norte, a 32°30'N. Esto ocurre debido a que las corrientes de agua que van hacia los polos cargan consigo a las larvas plánulas, lo cual hace que los corales salgan de los trópicos y lleguen a estas zonas norteñas, en donde encuentran las condiciones apropiadas para habitar. Sin embargo, en estas áreas marginales, los corales no sólo enfrentan las presiones ambientales para sobrevivir y prevalecer, sino también deben crecer rápidamente para competir contra las macroalgas que se encuentran en estos lugares, por ejemplo, además, la diversidad de los corales disminuye en estas regiones (Sheppard et al, 2018). Por otro lado, los corales necesitan de ciertas condiciones ambientales (ver cuadro 1), tales como temperatura, salinidad, sustrato estable e iluminación (Sheppard et al, 2018). Sin embargo, condiciones extremas como altas temperaturas y alto nivel de salinidad restringen la distribución y desarrollo de los corales, por lo cuál solo pueden existir en ciertos intervalos (Sheppard et al, 2018). De acuerdo con Gómez (2015), los arrecifes prosperan entre los 27° C a 30° C, y de 33 a 36 UPS (Unidades Prácticas de Salinidad), así como niveles de pH que van de 16 a 8.5 (ver cuadro 1). De esta manera, la distribución y supervivencia de los corales está determinada por los rangos de tolerancia a los factores bióticos y abióticos anteriormente discutidos.

**Cuadro 1.** Rango de factores requeridos para el desarrollo de corales

Factor	Valor/rango	Unidad (es)
Temperatura	27-30	°C
Salinidad	33-36	UPS
pH	6.5 - 8.5	
Producción de carbonatos	0.14	kg CaCO <sub>3</sub> m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
Clorofila	>2	mg m <sup>-3</sup>
Productividad primaria	1.4 - 2.1	g C m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup>
Omega de aragonita	2.9	

### 1.1.3. Importancia biológica, ecosistémica y económica

Los arrecifes de coral proveen una serie de servicios ecosistémicos muy importantes. Por ejemplo, contribuyen a la captura de dióxido de carbono o carbono azul, el cual es absorbido por los corales, así como la subsecuente emisión de oxígeno, que es posible gracias a la simbiosis polípo-zooxantela (Rodríguez-Salcié, 2022). Aunado a esto, contribuyen a reducir la erosión de la costa al absorber la energía del oleaje, así como también la de huracanes, ciclones e inclusive tsunamis, protegiendo de esta manera a los asentamientos humanos que se encuentran cerca de la costa, atenuando el impacto de las tormentas sobre estos (Robles-Zavala, 2008). Además, los arrecifes de coral proporcionan beneficios económicos, ya sea de manera directa o indirecta. Entre ellos se encuentran las pérdidas monetarias que se evitan cuando los arrecifes actúan como barreras y reducen el impacto de tormentas sobre la costa, disminuyendo así pérdidas económicas en términos materiales (es decir, en bienes inmuebles y patrimonios) para los asentamientos costeros durante dichas tormentas. De igual manera, directa e indirectamente, los corales proporcionan la pesca, ya que esta se realiza tanto dentro de estos ecosistemas, como también fuera de estos, pero al final, los recursos pesqueros provienen de los arrecifes de coral, porque son refugio y lugar de cría de peces, de modo que mantienen el stock pesquero por ser zonas de protección para los peces, proveyendo así especies para comercio (Robles-Zavala, 2008).

Por otro lado, actividades turísticas recreativas tales como el buceo, los recorridos en embarcaciones y las guías de snorkel generan remuneración económica a las agencias, y son posibles gracias al atractivo que estas zonas generan (Robles-Zavala,

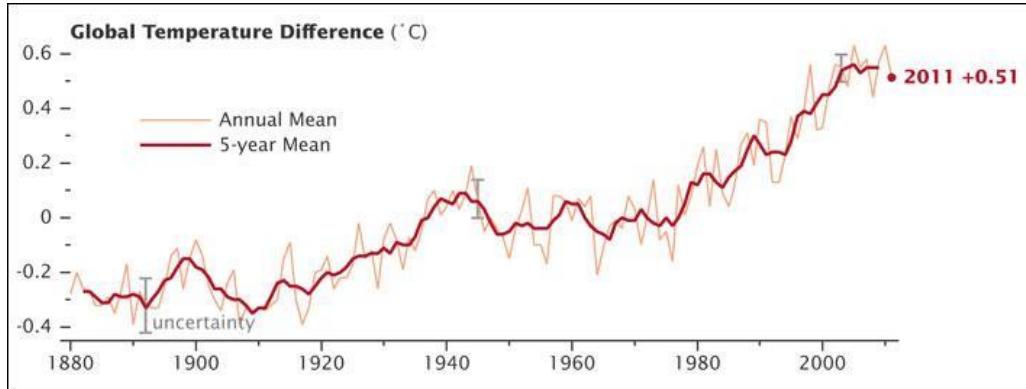
2008). De esta manera, de acuerdo con César y colaboradores (2003), tomando en cuenta las ganancias por las actividades turísticas, la pesca, la protección costera, y la protección a la biodiversidad, la derrama económica neta que representan los arrecifes de coral alrededor del mundo es de 30 billones de dólares anuales. Estas retribuciones benefician principalmente a los pobladores que se encuentran en las zonas costeras, que muchas veces pertenecen a países en vías de desarrollo, por lo cual, su subsistencia depende en gran medida de estos ecosistemas, de ahí su relevancia para las poblaciones humanas (César et al, 2003).

Pese a su gran importancia, los arrecifes de coral están sometidos a una serie de amenazas que ponen en riesgo su diversidad biológica y por conseciente, los vastos servicios ecosistémicos antes descritos. Algunos de los principales problemas que enfrentan los arrecifes de coral, tanto a nivel mundial como en México son la destrucción del hábitat, la sedimentación, contaminación, sobrepesca, introducción de especies exóticas, el blanqueamiento de coral, la acidificación del océano, aparición de enfermedades, el cambio climático, entre otros, los cuales ejercen presión sobre estos ecosistemas de diferentes maneras (Juárez, 2021).

## **1.2 Cambio climático**

### **1.2.1. Bases del cambio climático**

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el cambio climático se define como cualquier cambio en las normales atmosféricas ocurrido a lo largo del tiempo, ya sea de manera natural o debido a la actividad humana, que pueda ser identificado por cambios en la variación de sus propiedades y que persiste durante un determinado periodo de tiempo, usualmente décadas o más tiempo (United States Congress House Committee on Science and Technology, 2007). Por otro lado, Hussain y colaboradores (2020) se refieren al cambio climático como a la alteración de la situación ambiental global (que puede ser observada a través de la temperatura, precipitación, presión atmosférica y humedad, (ver Figura 1.1) ocasionada por fenómenos naturales, o bien, por alteraciones humanas (Hussain et al, 2020).



**Figura 1.** Gráfica elaborada por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) que muestra el incremento de la temperatura global desde 1880 hasta el año 2000.

Las principales causas del cambio climático son de origen antropogénico, debido en gran medida al cambio de uso de suelo (deforestación) y a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas, los cuales se usan en las actividades de diferentes sectores, como la industria, el transporte, la construcción, la energía eléctrica, la agricultura, etc. (Paricahua-Choque, 2021). Esto debido a los Gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono, vapor de agua, óxido de nitrógeno, metano, etc, producto de estas actividades humanas, que ocasionan que la concentración de estos gases en la atmósfera incremente, lo cual en conjunto con el efecto invernadero ocasiona el incremento de la temperatura global (calentamiento global) y el consecuente cambio climático (Paricahua-Choque, 2021; López-Díaz et al, 2022).

Algunos de los principales efectos del cambio climático, que ya se están observando en la actualidad, y que se estima continúen en el futuro, incluyen el incremento en la frecuencia de sequías, y de incendios forestales, el derretimiento de los glaciares, la pérdida de las capas de hielo, el incremento del nivel del mar, el incremento y la prolongación de las olas de calor, el cambio en el patrón de precipitación, el incremento de la temperatura, el cambio en el patrón de huracanes y tormentas tropicales, etc. (Callery, 2023). Ante estos efectos, se prevé que los diferentes grupos de seres vivos se vean afectados también, ocurriendo cambios en su hábitat, dinámicas, relaciones, comportamiento, fisiología, y por supuesto, en su distribución (Bellard et al, 2012).

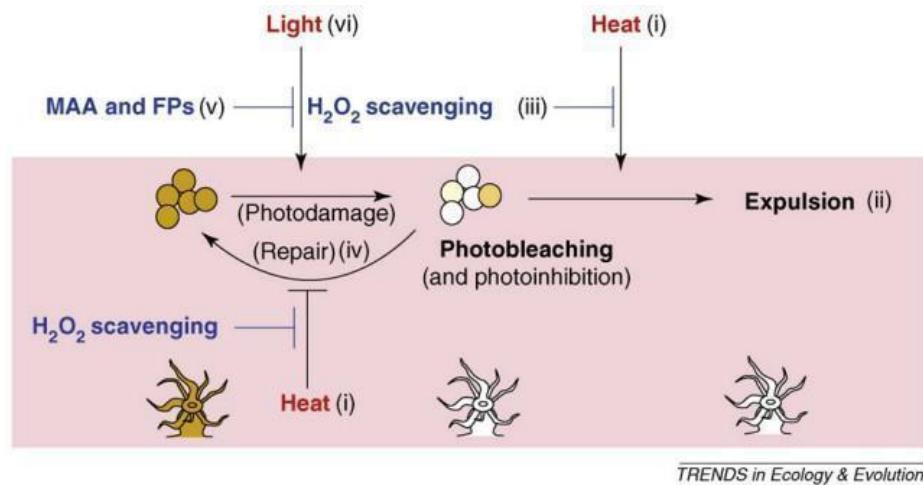
## **1.2.2. Efectos del cambio climático en los ecosistemas arrecifales**

Una de las amenazas que ha cobrado especial atención por parte de la comunidad científica es el cambio climático, debido a que modifica múltiples factores ambientales, como los eventos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y la temperatura oceánica, los cuales juegan papeles importantes para influir la distribución de los corales, y que es el desencadenante de la aparición de otras amenazas, como el blanqueamiento, la acidificación del océano y la aparición de enfermedades (Martínez-Castillo et al, 2022). En este sentido, el calentamiento global, que es el incremento en la temperatura global anual, repercute directamente en los arrecifes de coral, debido a la alta capacidad del océano para almacenar calor. Esto afecta a la simbiosis pólipos-zooxantela, ya que, de manera general, la microalga sólo tolera un incremento de uno a dos grados centígrados con respecto a la temperatura mensual promedio del sitio donde se encuentra el coral, una vez rebasado este límite, la zooxantela sale del cuerpo del pólipos (Juárez, 2021).

Estos lugares de aguas superficiales en los cuales se presenta un incremento mayor a 1 °C por encima de la temperatura promedio durante el mes más cálido son denominados “Hotspots”, y sirven como indicadores de blanqueamiento de coral. Una consecuencia de la pérdida de zooxantelas es la pérdida de color por parte del coral, tornándose de la tonalidad blanca del esqueleto (por ello el nombre de blanqueamiento del coral), dejándolo vulnerable a enfermedades, depredadores y otras amenazas (véase figura 2) (Thomas-Goreau & Hayes, 2023).

En este estado de blanqueamiento, el coral puede sobrevivir si la temperatura disminuye y regresa a la temperatura mensual promedio del sitio, caso en el cual el coral recupera nuevas zooxantelas (Anderson-King et al, 2023). Sin embargo, a largo plazo, si la temperatura del agua continúa incrementándose, se genera un efecto acumulativo de estrés térmico en estos sistemas biológicos que contribuye a que el coral no pueda recuperarse y puede llegar incluso a su muerte, ya que, como se mencionó anteriormente, en algunos casos la mayor parte de los nutrientes de los corales provienen de la zooxantela (Van Woesik et al, 2022). Este efecto acumulativo de estrés térmico se mide en un índice denominado “Degree heating week” (DHW) que indica el número de grados (de temperatura) que se acumulan en una localidad, que rebasan por al menos 1°C a la temperatura promedio del mes más cálido (de un periodo de 12

semanas). Si antes o al finalizar el periodo, una localidad alcanza un DHW superior a 8°C-semanas, lo cual implica, tener temperaturas >2°C por encima del umbral durante 4 semanas diferentes. En este caso, es muy probable que el blanqueamiento se extenderá y habrá mortalidad de corales (Liu et al, 2003).



**Figura 2.** Esquema elaborado por Baird (2009) que muestra el proceso de blanqueamiento coralino: el estrés térmico acelera la producción de peróxido de hidrógeno en las microalgas, interrumpe el ciclo de Calvin. A continuación, el peróxido de hidrógeno se esparce a las células del coral, activando una respuesta autoinmune que ocasiona la expulsión del alga. Aunado a esto, el peróxido de hidrógeno inhibe la reparación del foto daño, acelerando el blanqueamiento.

Otra consecuencia del cambio climático para los corales es el desbalance y modificación de eventos climáticos, tales como tormentas y huracanes. Como consecuencia, ocurren más frecuentemente, y provocan daños a los arrecifes, tales como rompimiento debido a las olas que los alcanzan, o asfixia ocasionada por la sedimentación que dejan las tormentas y huracanes (Juárez, 2021). Si bien estos eventos ocurren de manera natural, el cambio climático ocasiona que ocurran más frecuentemente, dificultando que los corales puedan recuperarse como lo harían en condiciones normales (Martínez-Castillo et al, 2022).

Por otra parte, el océano es uno de los principales lugares de captura del dióxido de carbono producido como consecuencia de las actividades antropogénicas que contribuyen al cambio climático, lo cual ocasiona cambios en el pH del agua, acidificándola; a su vez, esta acidificación del océano ocasiona cambios que afectan a los corales de distintas maneras, principalmente, reduciendo su tasa de crecimiento y de construcción, y occasionando la erosión de los arrecifes, así como la pérdida de su diversidad (Hill & Hoogenboom, 2022).

De acuerdo a la ONU, en los últimos 14 años se ha observado una pérdida del 14% de los corales del mundo debido al incremento de la temperatura de la superficie oceánica (UNEP, 2017). Por otra parte, de acuerdo con el sexto informe de cambio climático emitido por el IPCC, en un escenario climático con un incremento de temperatura de 1.5°C por sobre la media global de la era preindustrial, la riqueza de especies de coral declinaría a nivel mundial en un 70% al 90% (IPCC, 2023).

Asimismo, bajo un escenario crítico de calentamiento global, se prevé que países con grandes áreas de extensión de arrecifes de coral, incluido México, se vean especialmente afectados con blanqueamientos anuales antes del 2030 (UNEP, 2017).

Finalmente, de acuerdo con Camp (2018), la distribución de los corales también podría verse afectada debido a los efectos del cambio climático. En este sentido, los antozoos zooxantelados que usualmente se encuentran en aguas superficiales, pero tienen un amplio rango de tolerancia a la luz, es decir, que también pueden habitar en arrecifes mesofóticos (más profundos) podrían desplazarse a estos lugares considerados marginales, o arrecifes con aguas más turbias, que se caracterizan por presentar condiciones adversas de baja luminosidad y presencia de sedimentos. De igual manera, los hábitats mesofóticos han sido propuestos como refugios del impacto antropogénico y del blanqueamiento del coral que ocurre en las regiones someras, de manera que estos reducirían el impacto y proveerían un stock genético para que los corales que forman simbiosis con zooxantelas puedan volver a reproducirse y crecer después de eventos estresantes (Camp et al, 2018). Sin embargo, esto no estaría ocurriendo únicamente en términos de profundidad, sino que también estos nuevos hábitats o refugios estarían avanzando a nuevas latitudes, de acuerdo a diferentes autores, como se verá más adelante.

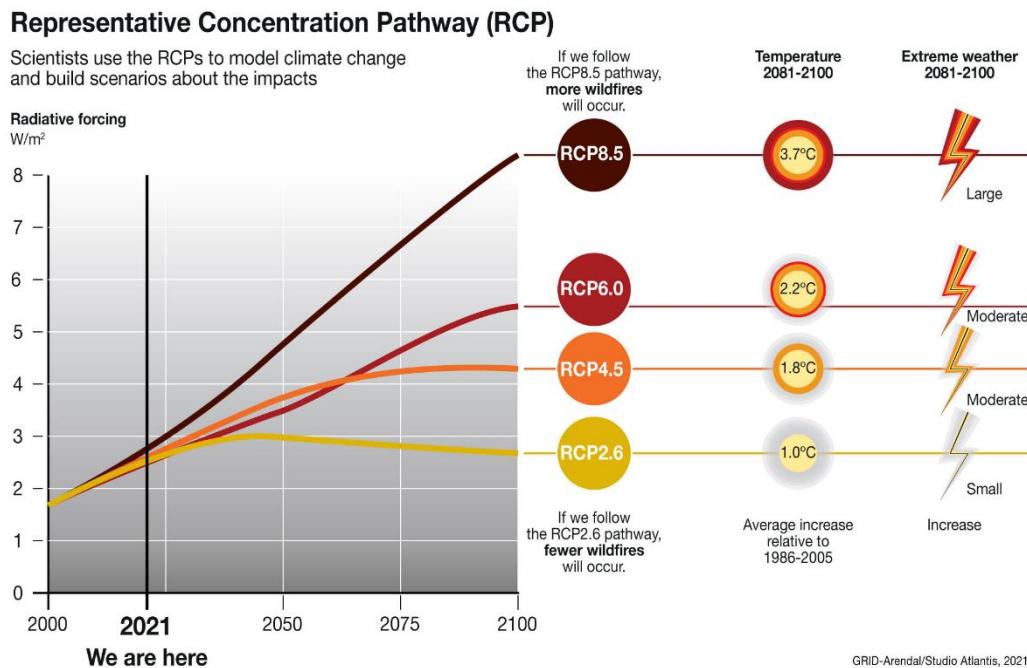
### **1.2.3. Escenarios climáticos**

El forzamiento radiativo se refiere al cambio en el flujo de energía dirigido del Sol a la superficie de Tierra (a la altura de la troposfera) medido en watts por metro cuadrado, resultado de cambios en la composición de la atmósfera o cambios en el aporte de energía solar, de modo que los forzamientos radiativos positivos resultan en temperaturas terrestres calientes, y los forzamientos radiativos negativos dan como resultados temperaturas frías (López-Díaz et al, 2022).

De este modo, las Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs por sus siglas en inglés) son conjuntos de proyecciones consistentes de los componentes de forzamiento radiativo que presentan y sirven para realizar modelaje climático, es decir, son escenarios climáticos establecidos por el IPCC (López-Díaz et al, 2022). Así, los RCP son proyecciones que se basan en el desarrollo socioeconómico para describir posibles escenarios climáticos, considerando el crecimiento de la sociedad y el uso de combustibles y fuentes de energías, es decir, el IPCC realiza proyecciones para establecer escenarios climáticos tomando en cuenta el uso de combustibles fósiles conforme al desarrollo social y económico. Existen 4 escenarios climáticos, todos nombrados de acuerdo con las estimaciones de forzamiento radiativo hasta el año 2100, basado en el forzamiento de GEI y otros forzamientos (López-Díaz et al, 2022). Así, los cuatro RCP's son RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, a continuación, se describe cada uno de ellos (ver figura 3).

El escenario RCP 2.6 es el escenario de mitigación, en el cual se darían las emisiones de CO<sub>2</sub> más bajas, y considera la probabilidad de mantener el incremento de la temperatura global menor a 2°C con respecto a las temperaturas preindustriales (IPCC, 2018), en el cual hay un pico de emisiones de GEI en el año 2100 y posteriormente declina (López-Díaz et al, 2022). En este mismo escenario se proyecta que la cobertura de hielo en el hemisferio norte disminuiría en un 7% para finales del siglo, en tanto que para el escenario RCP 8.5 disminuiría en un 25% (Rodríguez-Camino et al, 2014). Este último escenario es considerado el posible escenario más catastrófico, en el cual no se logran controlar las emisiones y ocurriría el mayor incremento en la concentración de GEI en la atmósfera que continuaría en aumento incluso después del año 2100, por lo cual es muy probable que la temperatura incremente entre 1.5°C a 2°C

(con respecto a las temperaturas preindustriales) para el año 2100 bajo este supuesto (IPCC, 2018; López-Díaz et al, 2022; Rodríguez-Camino et al, 2014). Por otro lado, existen dos escenarios intermedios: RCP 4.5 y RCP 6.0, en los cuales las emisiones de GEI se estabilizan después del año 2100 (López-Díaz et al, 2022) y para los cuales el probable incremento de la temperatura global es 1.5°C (RCP 4.5) o entre 1.5°C y 2°C (RCP 6.0) (IPCC, 2018).



**Figura 3.** Temperatura global promedio de la superficie oceánica de acuerdo con Meinshausen y colaboradores (2011). La línea amarilla muestra un incremento de temperatura de 1°C para el futuro, que resultaría en un escenario climático RCP 2.6., en tanto que la línea carmín muestra el aumento de temperatura de 3.7°C, que correspondería a el escenario RCP 8.5. Entre estos dos, se presentan los escenarios intermedios RCP 4.5 y RCP 6.0 con incrementos de temperatura de 1.8°C y 2.2°C respectivamente.

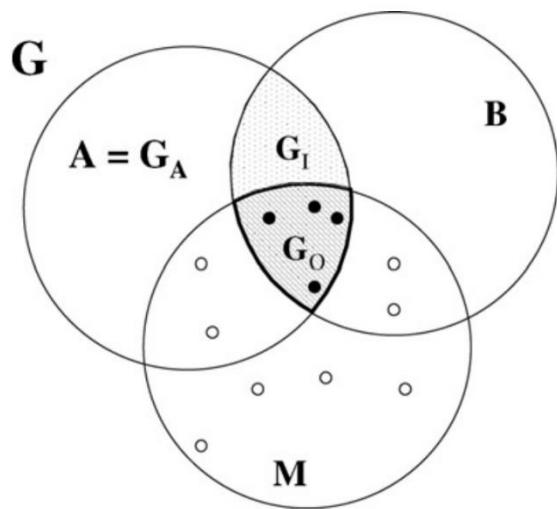
### 1.3. Modelos de distribución potencial

Los modelos de predicción de la distribución de las especies se encargan de correlacionar la distribución conocida de las especies con las variables ambientales,

obtenidos de bases de datos, y analiza patrones para identificar áreas en las cuáles el grupo se pueda encontrar (Tetetla, 2012). De este modo, se pueden crear mapas de distribución y hábitat potencial, abundancia y riqueza de especies (Calixto, 2017).

Estas herramientas permiten estimar distribución de especies en lugares que aún no han sido muestreados, así como también hábitats potenciales para la biodiversidad (Calixto, 2017). Además, son útiles para detectar especies invasoras, para determinar procesos como la dispersión, adaptación, competencia, sucesión, presiones, etc. (Calixto, 2017). Así, la utilidad de los modelos de distribución radica en su funcionalidad para ser aplicados en la guía de políticas públicas de manejo y conservación de la biodiversidad (Calixto, 2017).

De esta manera, para el modelaje de distribución potencial de especies se consideran múltiples factores diferentes agrupados en tres clases diferentes: clase 1, clase 2 y clase 3, de acuerdo con Barve y colaboradores (2011) (ver figura 4). La clase 1 agrupa variables ambientales independientes de la presencia o abundancia de las especies, ya que poseen sus propias dinámicas intrínsecas, tales como pueden ser la radiación solar, el clima y la topografía. De acuerdo con Barve (2011), la clase 1 se representa con la expresión “A”, que representa el nicho potencial o nicho fundamental, que representa el conjunto de condiciones ambientales en las cuales una especie puede sobrevivir. La clase 2 incluye factores bióticos en la naturaleza, como recursos limitados de comida, presencia e influencia de depredadores, competidores, mutualistas, etc., y está representada por la letra B. Representa el conjunto de condiciones bióticas necesarias para la supervivencia de las especies. Por otro lado, la clase 3 se refiere al área accesible, simbolizada con la letra “M”. Está corresponde a las regiones alrededor del mundo que han sido accesibles a las especies a través de dispersión en períodos de tiempo previos están. De este modo, la intersección de las clases anteriores ( $B \cap A \cap M$ ) es el área ocupada, de las especies en cierto tiempo, y se encuentra representada por el símbolo  $G_0$  (Barve et al, 2011).



**Figura 4.** Diagrama BAM elaborado por Barve y colaboradores (2011) que representa los factores A (abióticos), B (bióticos) y M (movimiento) que se necesitan para que se dé la intersección  $G_0$  (área ocupada) , que determina la región donde se pueden encontrar especies. Los círculos en blanco representan las poblaciones sumidero, y los negros representan la población de origen. El área denotada con  $G_1$  corresponde al área invadible.

### 1.5. Antecedentes

Junior (2013) modeló la distribución potencial actual de dos especies invasoras originarias del Océano Pacífico: *Tubastrea coccinea* y *Tubastrea tagusensis*. Para esto, recurrió a Maxent, y usó las variables ambientales: concentración promedio de calcita, salinidad promedio, oxígeno disuelto promedio, radiación fotosintéticamente activa máxima, pH promedio, concentración media de nitrato y concentración máxima de clorofila, y fueron descargadas de Bio Oracle (Junior, 2013). De igual manera, utilizó el lenguaje de programación R, con el fin de probar la capacidad de predicción de los modelos generados (Junior, 2013). Así, encontró que las zonas de potencial invasión de *T coccinea* son áreas asociadas al incremento de la concentración de calcita y con bajos niveles de fitoplancton (Junior, 2013).

Otro trabajo de investigación sobre modelaje de antozoos en México que también se han enfocado en distribución potencial es el realizado por Ulate-Naranjo (2016), en el cuál modeló el nicho ecológico de especies de corales representativas del Golfo de

California usando el algoritmo Maxent. Estimó la distribución potencial de especies del género *Pavona*, *Pocillopora*, *Porites* y *Psammocora*, considerando la batimetría, temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila a como las principales variables ambientales implicadas en la distribución de macroinvertebrados. Obtuvo que los corales en el Golfo de California se encuentran principalmente distribuidos hacia la región sur, entre los 23°N y 22°N, en donde está el 20% de las especies. Por otro lado, *Porites panamensis* es la especie dominante tanto en la región Central como al Norte del Golfo, a profundidades de 5 metros. En tanto que, en la región sur, *Pocillopora elegans* y *Pavona gigantea* son los corales dominantes, al igual que *Porites panamensis*, presentando este una distribución dominante en todas las regiones (Ulate-Naranjo, 2016).

Reyes-Bonilla y colaboradores (2013), usaron Maxent para determinar la distribución potencial del coral azooxantelado constructor de arrecifes *Dendrophyllia oldroydae*; encontrando una alta probabilidad de ocurrencia para la especie en las costas de Sinaloa; sus resultados fueron hallados usando las variables: temperatura, salinidad, concentración de oxígeno, nitratos, fosfatos y silicatos, productividad primaria, omega de aragonita (que es un indicador de la saturación de carbonato de calcio), profundidad, profundidad de la zona eufótica y tipo de sustrato en la zona costera (Reyes-Bonilla et al, 2013).

Por otro lado, Oliveira (2019) también usó Maxent para analizar la distribución potencial presente y futura de especies de coral en las costas de Brasil, considerando el impacto ocasionado por el cambio climático. El autor encontró una reducción actual de los hábitats potenciales que pueden brindar áreas adecuadas a los antozoos para sobrevivir. Los modelos de distribución potencial a futuro predicen el desplazamiento de corales a aguas más profundas, siendo la temperatura la variable que más contribuye a estos cambios (Oliveira et al, 2019).

Stranges (2019) modeló con Maxent la distribución potencial de 10 especies del género *Pocillopora* para el Pacífico Oriental Tropical, tomando en cuenta las variables: temperatura superficial del mar, salinidad, pH, omega de aragonita, fosfatos, silicatos, radiación fotosintéticamente activa, atenuación de la luz, batimetría y tipología de fondo marino. Se modeló bajo tres escenarios de cambio climático: un escenario de reducción

de gases de efecto invernadero, uno de estabilidad, y uno agresivo con incremento de GEI. Bajo el escenario de estabilidad, las especies mantienen su área de distribución, y en condiciones óptimas, las especies incrementan su área de distribución, siendo *P. meandrina* la que tendría el mayor incremento. Sin embargo, en el peor escenario, se reduce la distribución de especies, y las condiciones óptimas se expanden a latitudes más altas, y los hábitats actualmente considerados marginales, persisten para el año 2050. A la fecha, dicho trabajo es el único de modelos de predicción y de distribución potencial que se ha enfocado en los efectos del cambio climático para corales en las aguas correspondientes al territorio mexicano (Stranges et al, 2019).

## **II. JUSTIFICACIÓN**

Los arrecifes coralinos distribuidos a lo largo de la costa del Océano Pacífico en México son de gran relevancia para la fauna y vida marina que habita en esta franja, además, brindan importantes servicios ecosistémicos y económicos. Sin embargo, en los últimos años, en arrecifes de todo el mundo, incluida la zona mencionada anteriormente, se ha observado un acelerado blanqueamiento y reducción de la cobertura coralina como consecuencia del calentamiento global y el cambio climático. Como consecuencia, es posible que haya modificaciones de los patrones de distribución de los corales actualmente y que esto continúe a futuro. Por ello, es de vital importancia estudiar la distribución potencial de los corales en la actualidad, así como para el futuro, mediante modelos de distribución potencial. Hacer esto ayudaría a impulsar el desarrollo de decisiones, acciones y políticas que tomen las medidas de conservación pertinentes.

## **III. HIPÓTESIS**

Debido al incremento de la temperatura ocasionado por el cambio climático, en el 2050 la distribución potencial de los corales cambiará con respecto al presente, perdiéndose áreas en mayor medida en el escenario RCP 8.5 con respecto al RCP 2.6, y migrando hacia latitudes más altas los cuales son hábitats actualmente considerados con condiciones marginales para su supervivencia y desarrollo.

## **IV. OBJETIVOS**

**Objetivo general:** Evaluar los cambios potenciales de la distribución de las principales especies de coral constructoras de arrecifes en el Pacífico mexicano, como respuesta al cambio climático bajo dos escenarios (RCP 2.6 Y RCP 8.5) para el año 2050.

### **Objetivos específicos**

- Identificar la distribución potencial para el tiempo presente
- Identificar los cambios en la composición y distribución de las especies de corales

del pacífico mexicano para el año 2050 tomando en consideración las variables ambientales y las proyecciones climáticas bajo los escenarios RCP 2.6 Y RCP 8.5 de cambio climático.

- Identificar los cambios en las temperaturas para el año 2050 bajo los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 con respecto al presente.
- Determinar y comparar las áreas de distribución perdidas y ganadas dentro del área de estudio para cada especie bajo los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 con respecto a su distribución potencial presente.
- Identificar las especies con mayor susceptibilidad de pérdida de hábitat debido al cambio climático.

## **V. METODOLOGÍA**

### **5.1 Área de estudio**

#### **5.1.1. Pacífico Oriental Tropical**

El Océano Pacífico, cuyos límites se encuentran entre el continente americano, asiático, antártico y Oceanía, es el cuerpo de agua más grande del mundo, con un área de 160 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales, se considera al menos 2.3 millones de kilómetros cuadrados corresponden al territorio mexicano, que cuenta con 7,146 kilómetros de costa. El fondo marino del Pacífico Mexicano se caracteriza por ser irregular, con una profundidad máxima registrada de 6,000 metros en la Fosa de Tehuantepec, en el territorio correspondiente a las costas de Chiapas y Oaxaca (Espinosa, 2004). Los arrecifes de coral del Pacífico albergan una gran biodiversidad marina, siendo refugio de moluscos, esponjas, cnidarios, poliquetos, equinodermos, peces, etc. (López-Pérez et al, 2019). En cuanto a corales hermatípicos se refiere, de acuerdo a diferentes autores, los principales corales constructores de arrecifes del Océano Pacífico son los géneros *Pocillopora*, *Porites* y *Pavona* (Glynn et al, 2016; Martínez-Castillo et al, 2020; López-Pérez et al, 2019). Según Medellín-Maldonado y colaboradores (2016), algunos de los principales corales del Pacífico que construyen arrecifes incluye a las especies *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pavona gigantea*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora verrucosa* y *Pocillopora capitata*, siendo Cabo Pulmo, Islas Marietas y Huatulco, los lugares que albergan los principales arrecifes del Pacífico en México (Robles-Zavala & Reynoso, 2018). En esta región, los arrecifes coralinos se caracterizan por ser pequeños y estar geográficamente aislados, además, a diferencia de los corales del Golfo de México, las redes tróficas son consideradas más simples.

#### **5.1.2 Área accesible: M**

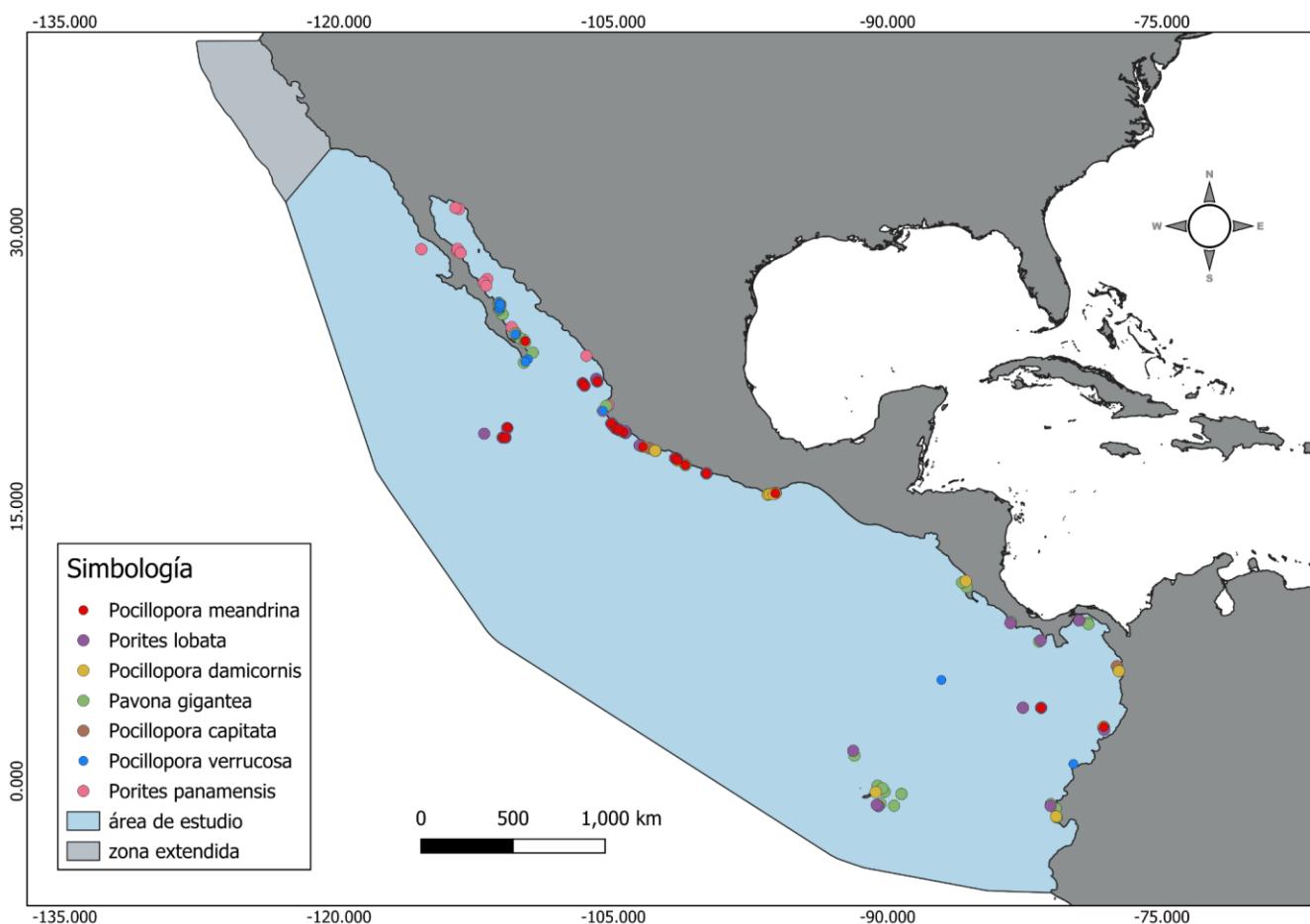
Como se estableció previamente, para llevar a cabo los modelos de distribución potencial es necesario establecer un área geográficamente accesible de las especies (M). Esto es importante porque previos estudios han señalado que la determinación de

la M puede influir en las evaluaciones de los modelos, en donde áreas M demasiado grandes y poco ajustadas a la biología de los organismos pueden magnificar el ajuste de los modelos de distribución dando datos erróneos (Barve et al, 2011). La M se definió creando un polígono que contuviera la mayor cantidad de registros para las especies estudiadas basado en la información obtenida en las bases de datos de libre acceso GBIF Y OBIS (ver detalles de esto más adelante). Así, el polígono que comprende la M se extiende a lo largo de parte de la línea de costera del Océano Pacífico en el continente americano, desde a la altura de las costas de Los Ángeles, Estados Unidos, pasando a lo largo de toda la franja mexicana del Pacífico e incluyendo el Mar de Cortés, hasta llegar a las costas más norteñas de Lima, Perú, y posteriormente dirigiéndose hacia la Isla Clipperton. Otra de las razones por las cuales se elaboró de esta manera el polígono como área de estudio fue debido a que se buscaba incluir áreas estratégicas como la Isla de Clipperton, que contiene un Atolón, así como la Isla Galápagos y las Islas Revillagigedo, los cuales son importantes centros de biodiversidad y que, de acuerdo a Glynn (2017), son sitios de avistamiento de las especies de corales que se abordan en este estudio, por lo cual son sitios con gran potencial de distribución de corales y áreas relevantes que podrían contener un porcentaje significativo de la distribución.

Finalmente, se buscó que el área de estudio contuviera la mayor cantidad de Regiones Biogeográficas posibles. Esto debido a la importancia que estas regiones tienen para la distribución de la biodiversidad, ya que al ser zonas que se caracterizan por tener características ecológicas diferentes, incrementa la posibilidad de que contengan especies de corales distintas por los diferentes rangos de requerimientos físicos del hábitat de cada una. De esta manera, el polígono formado para la zona de estudio elegida contiene 14 regiones biogeográficas: Cortés, Isla de Cocos, Clipperton, Chiapas-Nicaragua, Oeste de Isla Galápagos, Sur de Ensenada de California, Revillagigedo, Ensenada de Panamá, Norte de Isla Galápagos, Nicoya, Pacífico Tropical Mexicano, Transición Magdalena, Guayaquil, y Este de las Islas Galápagos (Spalding et al, 2007).

Así, se presenta a continuación la M definida para presente trabajo (véase figura 5). De igual manera se presenta también el área de estudio extendida, que corresponde a la distribución potencial estimada para los escenarios futuros, la cual se encuentra

extendida hasta los 6° sur y hacia el norte, hacia los -125.86, 39.51. Esto se realizó basado en los antecedentes donde las proyecciones futuras indican una modificación de la distribución hacia zonas marginales, que para el presente corresponden a latitudes mayores (Stranges et al, 2019), por lo cual se extiende la zona de estudio hacia el norte, en una región que actualmente tiene condiciones limitantes para la distribución de estas especies pero que en el futuro podría ser una zona de distribución.



**Figura 5.** El área de estudio para el escenario presente (que corresponde a la M definida) se extiende por el pacífico mexicano desde las costas de Baja California Norte, hasta las costas de Ecuador, formando un polígono con las Islas Revillagigedo y Galápagos, e incluye El Mar de Cortés, las cuales son áreas del Pacífico Oriental Tropical, que se caracterizan por su gran biodiversidad y presencia de corales. Se muestran los registros encontrados para cada especie estudiada. Asimismo, la zona extendida (gris) donde se prevé distribución de especies bajo los modelos de proyección en los escenarios climáticos RCP2.6 y RCP8.5 futuros, y registros obtenidos de base de datos para cada una de las especies estudiadas,

## **5.2. Obtención de datos y limpieza de registros**

Se eligieron las especies a modelar de acuerdo con los criterios y el proceso que se explica a continuación. Se realizó una búsqueda bibliográfica en los repositorios Google Scholar, Researchgate, Redalyc y SciELO, entre otros, de los corales hermatípicos en las costas mexicanas del Pacífico; se especificaron corales hermatípicos ya que estos son el grupo de corales que contiene las principales especies de coral constructoras de arrecifes, por lo cual son considerados los de mayor relevancia ecológica, en comparación con los corales ahermatípicos, o corales blandos, que no construyen arrecifes.

Así, de acuerdo con Reyes-Bonilla (2005), las especies de coral del Océano Pacífico con la distribución más amplia en costas mexicanas son *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora capitata*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora verrucosa*, *Porites panamensis*, *Pavona gigantea*, *Astrangia haimei* y *Tubastrea coccinea*. Sin embargo, estos dos últimos se descartaron al tratarse de corales ahermatípicos. Por otro lado, las especies constructoras de arrecifes más importantes son *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora capitata*, *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pavona gigantea* y *Pavona varians*, según Medellín (2016). Esto concuerda con otros trabajos, en los cuales las principales especies constructoras de arrecifes son *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora capitata*, *Porites lobata*, *Pavona gigantea*, *Pocillopora meandrina*, *Psammocora stellata*, *Pavona clavus* y *Fungia curvata* (López-Pérez et al, 2012; Reyes-Bonilla & Pérez, 1998; Glynn & Morales, 1997; Pérez & Ballesteros, 2004;). Así, usando los criterios de: mayor relevancia ecológica (de acuerdo con la bibliografía) y distribución más amplia, se descargaron los registros de las especies anteriormente mencionadas de las bases de datos GBIF (GBIF.org, 2023) y OBIS (OBIS, 2023).

Se descargaron los datos tomando en cuenta los registros de ocurrencia, especímenes vivos, observación y observación humana, desde el año 1980 hasta la fecha, considerando que estos son los más confiables por su origen y por el desarrollo de la tecnología. Posteriormente, para evitar problemas de autocorrelación espacial se procedió a limpiar los datos utilizando el programa R con los paquetes Tidyverse, raster

y sf (R core team, 2023). Así, se eliminaron primero los registros duplicados y, a continuación, se aplicaron filtros espaciales utilizando el paquete *thin* de R para remover registros que se encontraban muy cercanos entre sí, de tal forma que si había registros a menos de ~9.3 km de distancia entre sí (la resolución de las capas ráster), se borraron los necesarios para que permaneciera solo uno que represente a ese conjunto. De tal forma, solamente se conservaron registros a distancias mayores de ~9.3 km, no duplicados y cuya ubicación no estuviera dentro del continente.

De esta manera, después de la depuración de datos, debido que la cantidad de registros confiables fue reducida significativamente en todas las especies, se eligieron como objeto de estudio aquellas que contaran con al menos 20 registros, con el fin de trabajar con la mayor cantidad de especies posibles, las cuales fueron *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora capitata*, *Pavona gigantea*, *Pavona clavus* y *Pocillopora stellata*. A continuación, se muestran los registros obtenidos para las especies procesadas, incluyendo las no seleccionadas, antes y después de la depuración de datos (véase cuadro 2).

**Cuadro 2.** Número de registros por especie totales iniciales (obtenidos) y finales (filtrados) después de la limpieza de datos descrita en el texto

Especie	Registros obtenidos	Registros filtrados
<i>Pavona gigantea</i>	2305	51
<i>Porites panamensis</i>	314	44
<i>Pocillopora verrucosa</i>	5319	35
<i>Pocillopora capitata</i>	26066	34
<i>Porites lobata</i>	51185	28
<i>Pocillopora damicornis</i>	65968	24
<i>Pocillopora meandrina</i>	19159	20
<i>Psammocora stellata</i>	5373	13
<i>Pavona clavus</i>	3636	11

Así, se elaboró un Sistema de Información Geográfica mediante el programa QGIS 3.16.3, se exportaron los registros (ya filtrados) para cada especie seleccionada, usando la proyección geográfica WGS 84(EPSG:4326).

## **5.3. Selección de variables ambientales**

### **5.3.1. Descarga de datos**

Se descargaron las variables de la plataforma Bio Oracle data base, la cual contiene las capas ambientales: temperatura oceánica, salinidad, velocidad de corriente, dirección de corriente, nitratos, fosfatos, silicatos, oxígeno molecular disuelto, hierro, productividad primaria, pH, clorofila, grosor de capa de hielo, cobertura de hielo, cobertura de nubes, profundidad de capa, temperatura del aire, radiación fotosintéticamente activa, coeficiente de atenuación, batimetría, pendiente topográfica, aspecto topográfico, índice de posición topográfica e índice de rugosidad de terreno (Bio Oracle v1.0 data base, 2024). Para cada variable se encuentra disponible el valor mínimo, promedio y máximo, así como también el valor de comparación máximo, mínimo y el rango. De igual manera, estas se encuentran disponibles en los escenarios presente (década de 2000-2010, década de 2010-2020) y futuro (décadas desde el 2020 al 2100) bajo los diferentes escenarios climáticos RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Finalmente, los datos se encuentran disponibles en dos capas diferentes: capas superficiales y capas bentónicas, y todas las variables se encuentran disponibles en formato tiff y ascii.

Para fines de este trabajo se consideraron inicialmente la temperatura, ph, calcita, salinidad, fosfatos, silicatos, nitratos, hierro, oxígeno disuelto, fitoplancton, clorofila, productividad primaria y coeficiente de atenuación, esto de acuerdo con los antecedentes y bibliografía consultada previamente, en donde las variables más utilizadas son las mencionadas anteriormente, como se menciona en los trabajos de Junior (2013), Ulate-Naranjo (2016), Oliveira (2019), Reyes-Bonilla (2013) y Stranges (2019), utilizaron dichas variables. De este modo, se descargaron las variables superficiales en formato tiff tanto para el escenario presente, usando la década 2010-2020, como el futuro, en el periodo de tiempo que va de 2040 a 2050 bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, tomando en cuenta que ambos escenarios se consideran el mejor, y el que podrían tener las consecuencias más devastadoras respectivamente.

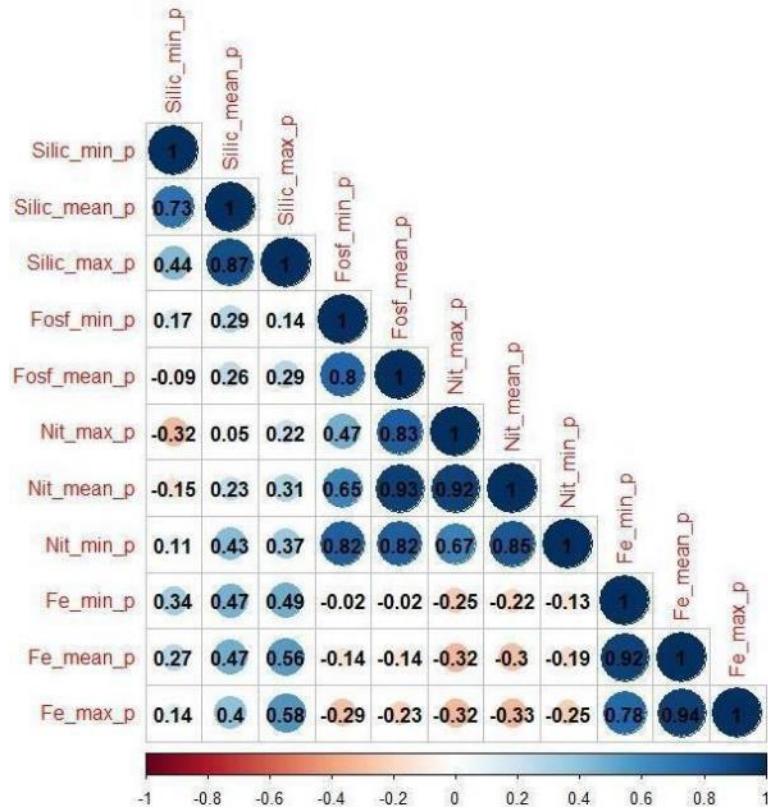
### **5.3.2. Selección de variables**

Una vez descargadas las variables, se consideraron dos aspectos para la elección de las variables a utilizar en el trabajo: las pruebas de autocorrelación realizadas en R para descartar variables correlacionadas entre sí, y el porcentaje de contribución de las variables, el cual se obtuvo al realizar las pruebas de modelaje con el índice de Jackknife.

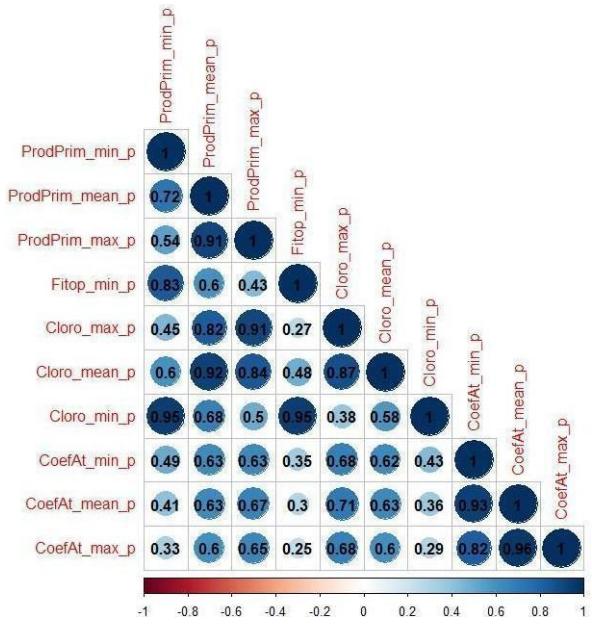
A continuación, se procesaron en R para su depuración, generando gráficas de correlación usando los paquetes “tidyverse”, “terra”, “sf”, y “corrplot”, con el fin de descartar las variables que no fueran necesarias de utilizar y que podrían estar influyendo en otras variables. Así, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre variables y se generaron gráficas para visualizarlas. Se tomó como referencia el valor 0.75 para determinar si dos variables están correlacionadas entre sí, considerando que un índice de correlación de Pearson mayor a 0.7 indica una alta correlación entre dos variables (CITA).

Sin embargo, debido a que no es posible visualizar el valor de correlación entre las variables, al introducir todas estas en una sola gráfica, se optó por realizar el análisis por grupos de variables (véase figuras 6 a 11). De este modo, para fines de esta investigación, por su importancia y relevancia de los efectos que tienen la temperatura, calcita y el pH sobre los arrecifes y sus procesos como el blanqueamiento y muerte o pérdida de coral, se eligieron estas como variables a utilizar en este trabajo. Por otro lado, para analizar el hierro, silicatos, fosfatos, nitratos, productividad primaria, clorofila, coeficiente de atenuación, oxígeno disuelto y salinidad, se organizaron en dos grupos principales. Por un lado, con el fin de descartar los nutrientes y compuestos químicos que pudieran estar correlacionados entre sí, en el primer grupo se realizó una prueba de correlación entre las variables hierro, silicatos, fosfatos y nitratos (ver figura 6). Por el otro lado, se consideró a la productividad primaria, clorofila, fitoplancton, coeficiente de atenuación y oxígeno disuelto en otro grupo separado para analizar las variables asociadas a la productividad, y descartar las innecesarias, para lo cual, se realizaron dos análisis, uno en el cual se incluyó productividad primaria, clorofila, fitoplancton y coeficiente de atenuación (grupo 2.1, véase figura 7), y otro en el cual se analizó la productividad primaria, clorofila, fitoplancton y oxígeno disuelto (grupo 2.2, ver figura 8),

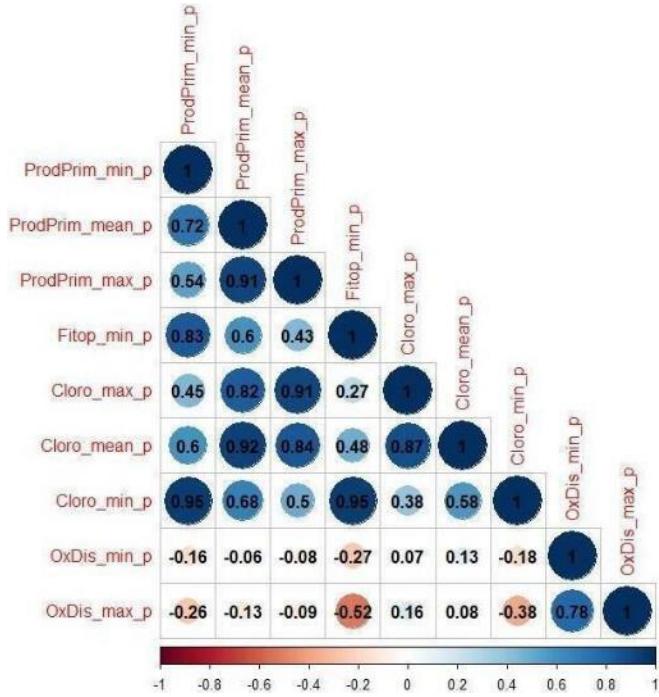
con el fin de elegir entre el coeficiente de atenuación y el oxígeno disuelto. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas.



**Figura 6.** Grupo de prueba #1 de correlación de variables. De acuerdo al índice 0.75 de correlación establecido previamente, hierro no está correlacionado con nitratos, fosfatos ni silicatos. Nitrato no está correlacionado a silicatos, y los valores de nitrato mínimo y promedio no están correlacionados a fosfato mínimo pero sí a fosfatos promedio. Fosfatos y silicatos no están correlacionados.

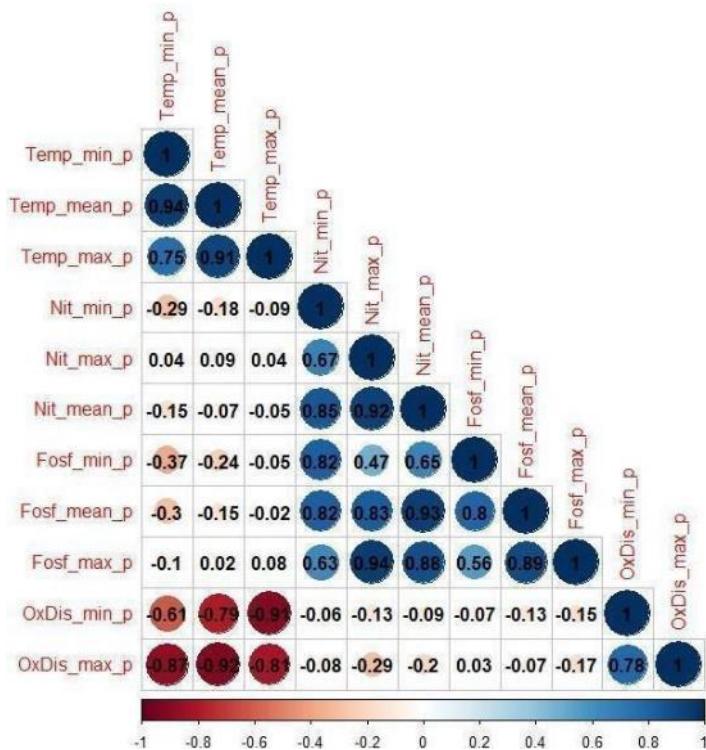


**Figura 7.** Grupo 2.1. Productividad primaria, clorofila y fitoplancton vs coeficiente de atenuación. Coeficiente de atenuación promedio y clorofila están correlacionados. Clorofila está correlacionada tanto a productividad primaria como a fitoplancton. El valor mínimo de Fitoplancton está correlacionado al valor de productividad primaria mínimo.

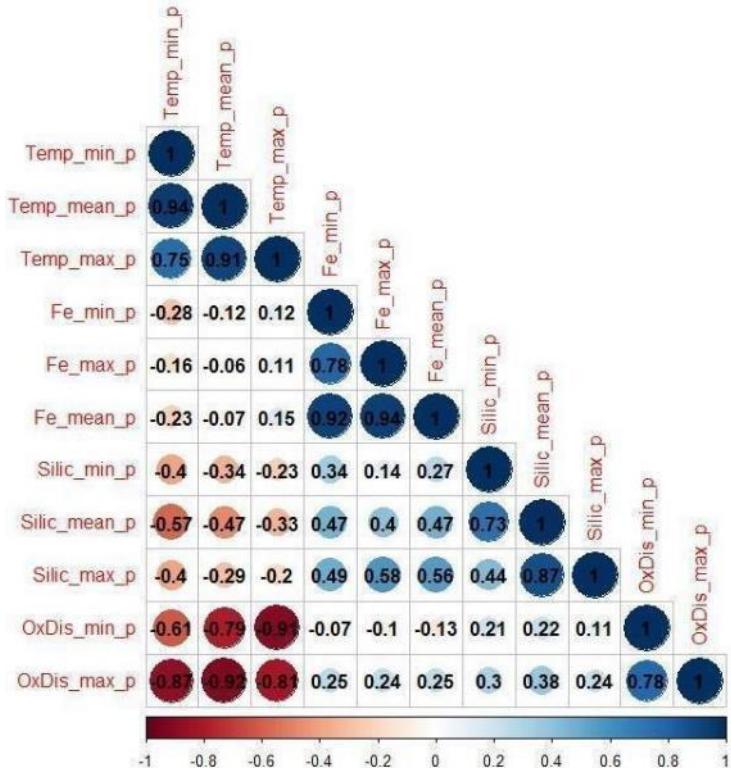


**Figura 8** Grupo 2.2. Productividad primaria, fitoplancton y clorofila vs oxígeno disuelto. Oxígeno disuelto no se encuentra correlacionado a ninguna otra variable. Valor mínimo de clorofila está correlacionado a fitoplancton (0.95)

De este modo, de acuerdo con los resultados de la prueba de correlación anteriores, se realizaron 2 pruebas más a partir de este. Al ser el oxígeno disuelto la variable que menos se encontraba correlacionada a las otras en el segundo grupo de prueba, a comparación con el coeficiente de atenuación, se seleccionó esta variable para las siguientes pruebas con el fin de analizar si los nutrientes tienen correlación con esta variable y con la temperatura. Así, se realizaron dos pruebas más, en las cuáles se analizaron dos grupos de variables: oxígeno, temperatura, fosfatos y nitratos (grupo 3.1, véase figura 9); y el grupo 3.2 en el que se revisó la correlación entre oxígeno, temperatura, hierro y silicatos (figura 10).



**Figura 9.** Grupo 3.1. oxígeno, temperatura, fosfatos y nitratos. El oxígeno disuelto y la temperatura se encuentran altamente correlacionados, al igual que los valores de fosfato con nitrato pero no a la temperatura ni el oxígeno.



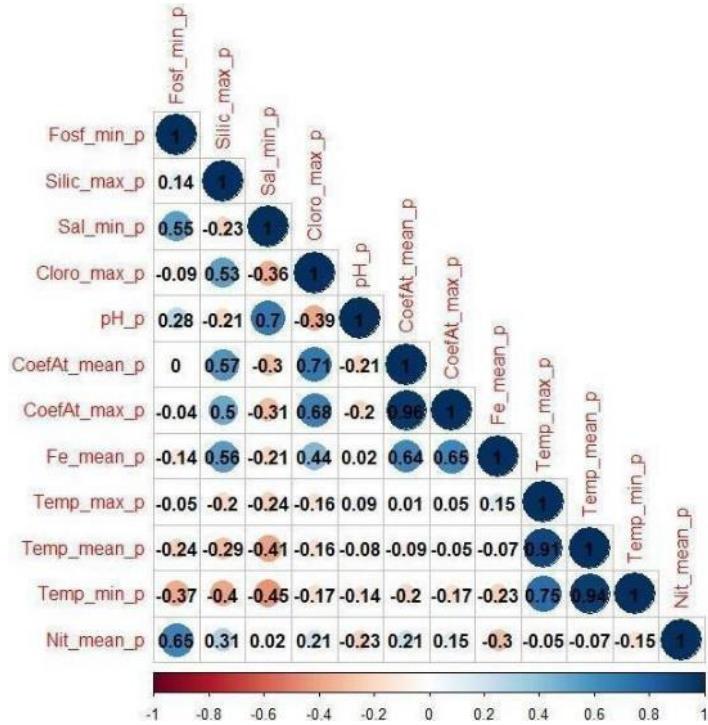
**Figura 10.** Oxígeno, temperatura, hierro y silicatos. Al igual que en la prueba 3.1, el oxígeno y la temperatura se encuentran altamente correlacionados (valores entre 0.79 y 0.92, mayores al coeficiente admisible de 0.7), sin embargo, ninguna de estas variables se encuentra correlacionada a hierro y silicatos.

Así, de acuerdo con los resultados anteriores, se descartó el uso de oxígeno como variable, al encontrarse estrechamente correlacionada a la temperatura, la cual, como se ha mencionado anteriormente, es una variable imprescindible para este trabajo. De igual forma se descartaron el fitoplancton y la productividad primaria como variables, al encontrarse correlacionados a la clorofila. En consecuencia, se procedió a realizar las pruebas de modelaje utilizando las siguientes variables seleccionadas a partir de las pruebas de correlación descritas anteriormente: Temperatura, ph, salinidad, silicatos, hierro, nitratos, fosfatos, clorofila y coeficiente de atenuación. De esta manera, se obtuvo el índice de Jackknife para las 4 especies con mayor cantidad de registros, con el fin de determinar el porcentaje de contribución de cada variable al modelo y descartar entre las variables correlacionadas, como nitratos y fosfatos, y determinar cuál es más relevante para el estudio (véase cuadro 3).

De igual manera, se tomó en cuenta la velocidad de corriente como variable en este nuevo análisis, considerando que el presente trabajo abarca tanto la distribución potencial presente de los corales como la distribución potencial futura, extendida a nuevas áreas de colonización, para lo cual, de acuerdo con diversos autores, tales como Sundahl (2020), Decarlo (2020), Dorschel (2007) y Bryan (2006), la velocidad de corriente es un factor ambiental importante en la distribución de los corales. Asimismo, a la par de estos análisis, se realizó otra prueba de correlación en el programa R studio, de acuerdo con la metodología que se ha descrito anteriormente (véase figura 11).

**Cuadro 3.** Porcentaje de contribución para cada variable analizada en la segunda etapa de acuerdo con índice de jackknife.

Variable	<i>Porites Panamensis</i>	<i>Pocillopora verrucosa</i>	<i>Pocillopora capitata</i>	<i>Pavona gigantea</i>	Total
<b>Hierro promedio</b>	54.2	49.1	41	61	205.3
<b>Coeficiente de atenuación promedio</b>	5.5	14.1	33.9	11.2	64.7
<b>Nitrato promedio</b>	11.7	9.6	1.8	3.1	26.2
<b>Clorofila máxima</b>	2	4.3	7	4.8	18.1
<b>Coeficiente de atenuación máximo</b>	16.4	0.1	0.1	0.1	16.7
<b>Temperatura máxima</b>	3.7	6.9	1.1	4.6	16.3
<b>pH</b>	2.3	5.6	2.7	2.3	12.9
<b>Calcita promedio</b>	0.4	0.6	2.3	8.6	11.9
<b>Salinidad mínima</b>	0.9	1.2	5	3.1	10.2
<b>Velocidad de corriente promedio</b>	2.2	2.2	3.8	0.4	8.6
<b>Fosfato máximo</b>	0.2	3.7	0.1	0	4
<b>Silicatos máximo</b>	0.2	0.3	0.4	0.2	1.1



**Figura 11.** Coeficiente de Atenuación promedio y clorofila correlacionadas con un valor de 0.71. No se encontraron otras variables correlacionadas. Seguir mismo formato de los primeros pies de figura.

De esta manera, el silicato y los fosfatos son las variables con menor porcentaje de contribución, por lo que se descartaron ambas variables, al igual que la clorofila, al encontrarse correlacionada al coeficiente de atenuación promedio, la cual es una variable que tiene un porcentaje de contribución mayor a la clorofila. Asimismo, se incorporaron los valores promedio y mínimo de temperatura, al ser el factor ambiental fundamental más importante de este estudio, se considera todos los valores disponibles de esta variable deben incluirse en el presente trabajo, con el fin de analizar los efectos del calentamiento global sobre los arrecifes tomando en cuenta todos los posibles valores de temperatura. De esta manera, las variables finales elegidas son: hierro promedio, temperatura mínima, temperatura promedio, temperatura máxima, coeficiente de atenuación promedio, nitrato promedio, velocidad de corriente promedio, salinidad mínima, calcita promedio y pH.

Asimismo, se recortaron en el programa QGIS las capas ambientales de las variables mencionadas (hierro promedio, temperatura mínima, temperatura promedio,

temperatura máxima, coeficiente de atenuación promedio, nitrato promedio, velocidad de corriente promedio, salinidad mínima, calcita promedio y pH) y añadiendo las capas ambientales descargadas de Bio Oracle en formato tiff, se cortaron con una capa máscara que corresponde a M (el área accesible descrita con anterioridad), y se exportaron en formato ascii.

#### **5.4. Modelaje de distribución potencial**

Se modeló la distribución de las especies utilizando las variables ambientales elegidas anteriormente mencionadas, tanto para el presente como para la distribución potencial futura, bajo los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5 usando el algoritmo de máxima entropía (Maxent). Maxent es una técnica de Machine learning que permite realizar inferencias o predicciones a partir de información incompleta (Phillips et al, 2006), es decir, cuando solo se tienen registros de presencia (y no de ausencia) de ciertos lugares que sí han sido muestreados, a pesar de las áreas sin información (no muestreadas). Así, Maxent relaciona los sitios de presencia de la especie y el área de estudio, compara las características relevantes e idoneidad de los sitios de registro y estima una distribución potencial, encontrando la probabilidad de distribución de la máxima entropía, que es la más extendida (Phillips et al, 2006). De esta manera, Maxent obtiene la distribución potencial de las especies a partir de los registros de presencia iniciales (los cuales a su vez han sido obtenidos de los sitios del área de estudio que han sido muestreados) y los valores de las variables ambientales en los sitios de registro de las especies.

La principal razón por la cual se decidió utilizar Maxent es debido a sus diversas funciones, no solo en modelaje de distribución de especies, sino también para encontrar la respuesta de las variables ambientales, mapear distribuciones actuales y predecir distribuciones en diferente tiempo y espacio. Aunado a esto, Maxent es capaz de utilizar únicamente datos de presencia, como es el caso de esta investigación, que no toma en cuenta los datos de ausencia. Además, Maxent se caracteriza por generar modelos de predicción altamente competitivos y es uno de los algoritmos más ampliamente utilizados

(Elith et al, 2011).

De esta forma, se utilizó la versión 3.4 del algoritmo Maxent: “Maximum Entropy Species Distribution Modelling, version 3.4.4”, el cual contiene dos apartados principales: Samples, en el cual se introducen todos los registros a utilizar de todas las especies juntas contenidos en un solo archivo de formato csv, y Environmental layers, en el cual se selecciona el directorio donde se encuentran las capas ambientales para el escenario a modelar. De este modo, se conjuntaron todos los registros de las especies *Porites panamensis*, *Porites lobata*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora damicornis*, *Pocillopora capitata* y *Pavona gigantea*, en un solo archivo usando el programa Excel y se convirtió a formato csv, para cargarlos en el espacio Samples.

Se cargaron en Maxent las capas ambientales recortadas como Environmental layers. En la pantalla principal de Maxent, se muestran las opciones de salida de los modelos como Directorio de salida, en el cual se eligió la carpeta para guardar las capas producto del modelo. En la pestaña “Archivo”, se seleccionan las capas ambientales de un dado escenario, que se utilizarán para la modelación, que en este caso corresponden a: velocidad de corriente promedio, temperatura mínima, temperatura promedio, temperatura máxima, salinidad mínima, pH, nitrato promedio, hierro promedio, coeficiente de atenuación promedio y calcita promedio, en formato ascii.

En el apartado de capas de proyección, se selecciona las variables para los escenarios futuros RCP 2.6 y RCP 8.5. Para fines de este trabajo, se consideraron únicamente los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5, ya que, al ser los escenarios extremos, el analizar estos se puede obtener una idea general de los resultados aproximados que se podrían obtener o lo que podría ocurrir para los escenarios intermedios también. Esto tomando en cuenta que muchos de los estudios de modelaje de distribución potencial que utilizan los 4 escenarios RPC arrojan resultados similares para los escenarios intermedios y el escenario RCP 8.5, tal como se puede ver en el trabajo de Stranges (2019). De este modo, modelando los escenarios extremos RCP 2.6 y RCP 8.5 se pueden obtener resultados similares a los que se obtendría modelando los escenarios intermedios.

Por otra parte, el Algoritmo de Máxima Entropía presenta las siguientes opciones de configuración: crear curvas de respuesta, hacer ilustraciones de predicciones, hacer la medición de Jackknife para la importancia de variables. Para la realización de los modelos se seleccionaron las tres opciones. Asimismo, existen diferentes opciones de salida, entre las cuales se encuentran los formatos de salida Cloglog, logístico, cumulative y raw, en tanto que los tipos de archivo de salida disponibles son asci, mxe, grd y bil. En este caso, para los modelos generados se configuró la salida de tal manera el formato de salida sea Cloglog y el tipo de archivo de salida sea ascii. De igual manera se eligió la creación de las curvas de respuesta con el fin de analizar el comportamiento de cada variable y su influencia en el modelo

Finalmente, el Algoritmo de Máxima Entropía presenta otras características como parte de la configuración del modelo que incluyen: la elección del número de réplicas, el porcentaje de prueba aleatoria, elegir el número máximo de interacciones, si hacer clamping y extrapolación, agregar muestras al fondo, creación de gráficas, crear cuadrículas de salida, remover registros duplicados, hacer análisis MESS en las proyecciones, hacer cuadrícula de clamp al proyectar, etc. Para lo cual, para el modelaje se seleccionaron los siguientes parámetros básicos: 20% de porcentaje de prueba aleatorio, 10000 puntos como background, 5 réplicas, tener porcentaje de prueba aleatoria, 500 máximas interacciones, remover registros duplicados, hacer análisis MESS en las proyecciones y hacer cuadrícula de clamp al proyectar.

Así, una vez generados los modelos, se aplicó un procedimiento post hoc. De la base de datos GEBCO (Gridded Bathymetry Data) (GEBCO, 2024), se descargó la variable batimetría en formato tiff, para el escenario presente. A continuación, en el programa Qgis, se abrieron las capas generadas en los modelos y la capa tiff de la variable batimetría, la cual se aplicó como capa máscara a las capas generadas del modelo usando la herramienta Calculadora ráster, y se estableció un umbral de 200 metros, con el fin de descartar las áreas mayores a esta profundidad donde los arrecifes no pueden encontrarse por la propia biología de la especie.

## **5.5. Determinación de cambios en la temperatura**

Usando el programa Qgis, se cargaron en formato raster las capas de temperatura promedio para el presente y el futuro (RCP 2.6 y RCP 8.5). A continuación, mediante la herramienta calculadora ráster se introdujeron las capas de la temperatura promedio presente y del futuro con la siguiente operación: “temperatura futuro - temperatura presente”, es decir, se obtuvieron las diferencias entre las predicciones de la temperatura para el año 2050 con respecto a la temperatura presente. Esta operación se realizó para cada escenario RCP y con ello se buscó obtener una visualización de las áreas donde se observan los mayores cambios de temperatura, y comparar con respecto a las áreas donde se esperan menores incrementos de temperatura. De esta manera, una vez creadas las nuevas capas de diferencia de temperatura, se ajustaron sus propiedades para crear dos mapas diferentes: uno que mostrara el rango de incremento de temperatura para cada escenario futuro, de modo que se pudieran apreciar las diferencias entre estos, y otro en el cual se observara de manera comparativa las áreas de incremento o disminución de temperatura. Para el primer caso, se usó un renderizador pseudocolor monobanda, usando 9 clases de modo continuo. En tanto que para el segundo set de mapas se ajustaron las propiedades a un renderizador pseudocolor monobanda, de modo que se observaran los datos en 9 clases de intervalos iguales con valores que van de entre -2 a 2. A continuación se crearon los mapas usando el mismo programa QGIS.

## **5.6. Obtención de áreas de riqueza, presencia y ausencia**

Una vez obtenidos los modelos y predicciones, se obtuvieron las capas de presencia y ausencia para cada especie para determinar las áreas donde las especies se encuentran presentes en los tres escenarios: presente, RCP 2.6 y RCP 8.5. Para esto, se utilizó el umbral de percentil 10%. Este umbral asume que el 10% de los registros de presencia pueden estar en condiciones subóptimas para la existencia de las especies y que, por tanto, deben ser omitidas para determinar la presencia de las especies. Estos registros en condiciones subóptimas serían aquellos con los menores valores de idoneidad según los modelos. De este modo, el valor de idoneidad utilizado para definir

si una especie está presente o ausente en un área corresponde a aquel que resulta menor dentro de los registros de las especies una vez excluido el 10% con menor valor. Así, una vez generados los modelos de distribución, se identificaron los valores de 10 percentil para cada especie. A continuación, se usó el programa R studio para procesar el umbral de cada especie, de modo que se cargaron los datos obtenidos del modelaje, y se usaron los paquetes “tidyverse”, “sf” y “terra”. De este modo, con la función “nrow”, se obtiene el producto del 10 percentil por la cantidad total de datos de la especie. Se ordenaron los datos de mayor a menor con base en los valores de idoneidad ambiental por cada especie, y se identificó el valor que corresponde al percentil 10 (ver cuadro 4).

**Cuadro 4.** Valores de umbral 10 percentil para cada especie bajo los dos escenarios climáticos

Especie	RCP 2.6	RCP 8.5
<i>Pavona gigantea</i>	0.184	0.184
<i>Porites panamensis</i>	0.174	0.145
<i>Porites lobata</i>	0.072	0.07
<i>Pocillopora verrucosa</i>	0.095	0.099
<i>Pocillopora meandrina</i>	0.143	0.126
<i>Pocillopora damicornis</i>	0.008	0.007
<i>Pocillopora capitata</i>	0.015	0.01

Posteriormente, en el programa QGIS se utilizó la herramienta “calculadora raster” para aplicar el valor del umbral correspondiente a cada especie. Cargando la capa que contiene todos los datos de cada especie, se multiplicaron los datos de dicha capa por el valor obtenido de percentil 10% (de acuerdo con el caso de cada especie). Con esto se crearon las capas de presencia/ausencia para cada especie.

### **5.6.1. Mapas de distribución**

Una vez obtenidas las capas de distribución, se ajustaron las propiedades de las capas con el fin de obtener una mejor visualización de las áreas con potencial presencia o ausencia. Para esto se modificaron las propiedades de visualización: se seleccionó un renderizador con valores en paleta únicos, de modo que se obtuvieron dos valores únicamente, 0, que indicaría la ausencia, para la cual se eligió un color blanco, y 1, que indica la presencia, representada por color rojo. Esto se realizó para cada especie. Finalmente, se aplicó el umbral de batimetría a 200 metros como prueba *post hoc*, con el fin de obtener una distribución lógica, basado en la bibliografía, tomando en cuenta que la plataforma continental, que es el área donde se distribuyen los corales, termina alrededor de los 200 metros de profundidad. De este modo, se creó en QGIS una capa máscara de batimetría que considerara solo las áreas de distribución en las cuales los datos de presencia de las especies se encuentran a un máximo 200 metros de profundidad. Esto se realizó con la calculadora ráster, cargando la variable de batimetría como capa e indicando mediante la operación “ $> = -200$ ” que solo se consideraran los datos con una profundidad menor o igual a 200 metros. A continuación, usando la calculadora ráster se multiplicó la capa de batimetría por las capas de presencia y ausencia de las especies, descartando así los datos con profundidades mayores a 200 metros, que se encontrarían fuera de la plataforma continental, que es el área hasta la cual se encuentran los corales.

### **5.6.2. Creación de mapas de riqueza**

A continuación, se obtuvieron los mapas de riqueza. Usando el programa QGIS, se cargaron las capas de presencia de todas las especies, y usando la herramienta Calculadora ráster, se sumaron las capas mediante la función: “+”. De este modo, se crearon las capas de Riqueza de especies para cada escenario (presente, escenario futuro RCP 2.6 y RCP 8.5). Se ajustaron las propiedades de las capas con el fin de obtener una mejor visualización, utilizando un renderizador de valores de paleta o únicos, y se usó una rampa de color roja con tonalidades que van del color blanco al color carmesí, de modo que el color blanco representa la ausencia de las especies, y el color carmesí representa las áreas con mayor riqueza donde se encuentran las 7 especies. A

continuación, se aplicó la prueba *post hoc*. Se aplicó el umbral de batimetría a 200 metros a las capas de riqueza de especies generadas: mediante la calculadora ráster se multiplicó la capa máscara de batimetría creada previamente (descrita en la sección anterior) por la capa de riqueza de cada escenario. Una vez generada la nueva capa post prueba *post hoc*, se ajustaron las propiedades de la capa a un renderizador con valores en paleta únicos y en una rampa de colores rojos, y se crearon las composiciones (mapas) en el mismo programa QGIS.

### **5.6.3. Determinación de las áreas perdidas**

Usando las capas de presencia y ausencia de especies, se usó el programa QGIS para determinar las áreas perdidas y ganadas en cada escenario futuro con respecto a las proyecciones presentes. En la calculadora ráster, a las capas de presencia y ausencia de los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 se les restó la capa de presencias y ausencias del presente, con el fin de obtener las nuevas zonas de distribución, o bien, las zonas de distribución ganadas para los escenarios futuros del año 2050. Asimismo, se obtuvieron las áreas de distribución en las que se proyectan pérdidas para el futuro con respecto a la distribución potencial presente. Para esto, se recurrió nuevamente al uso de la calculadora ráster, restándole a las capas de presencia y ausencia del presente, las capas de presencia y ausencia de los escenarios futuros. Esto se realizó para cada especie.

De igual manera, se ajustaron las propiedades de las capas generadas, usando un renderizador de valores en paleta, de modo que los valores se organizaran en 4 clases diferentes, teniendo así 4 valores diferentes: -1, 0, 1 y 2. El valor -1, representado en color gris, simbolizaría las áreas de distribución perdidas, el 0 las áreas en las cuales nunca estuvo presente la especie, 1 las áreas que permanecen sin pérdida en el futuro, y 2 las zonas a las cuales se extendió la especie (nuevas áreas de distribución).

A continuación, se integraron los datos de pérdida de cada especie dentro de una sola capa, con el fin de observar de manera general las mayores áreas de pérdida dentro del área de estudio. Para ello se usó una fórmula en la calculadora ráster que sumara todos los valores de -1 de todas las capas (todas las especies), que es el valor que representa la pérdida de distribución; de esta manera, la fórmula usada fue: “(especie 1 = -1) + (especie 2 = -1) + (especie n = -1)”. Finalmente, se aplicó el umbral de batimetría

y se creó el mapa en QGIS.

## 5.7. Análisis estadísticos

Se realizaron análisis estadísticos con el fin de averiguar si hay diferencias significativas entre las áreas invadidas por cada especie, y entre la pérdida de su hábitat. Para ello, en QGIS se sembraron puntos de manera regular en la capa del Área de estudio. Esto se realizó con la herramienta “Regular points”, usando la proyección “Lambert Conical Conformance”, ya que esta permite crear los puntos con una distancia de separación de 9 kilómetros entre ellos. Esta distancia corresponde a la resolución de los píxeles, recogiendo la información en cada píxel de la zona de estudio. A continuación, se extrajo la información sobre la presencia o ausencia de cada una de las siete especies por cada escenario (escenario Presente, RCP 2.6, y RCP 8.5). De este modo, en cada píxel del área de estudio se identificó si las especies tenían ausencia, asignada con valor 0, o presencia (valor 1), por cada escenario y se integró una base de datos con esta información.

En la base de datos se identificó si existían cambios de la presencia de cada especie por cada píxel comparando los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 con el tiempo presente. De este modo, si un píxel se denotaba con presencia para determinada especie en el presente, pero en alguno de los escenarios futuros se identificaba como ausencia, ello implicaba un área de distribución perdida para ese escenario y especie. Si, por el contrario, un pixel tenía ausencia en el presente, pero luego presencia en un escenario futuro, ello implicaba un área invadida. De esta forma, se denotó por cada especie, cada píxel y cada escenario con un valor de 1 cuando existía pérdida de áreas de distribución y con 0 cuando esto no ocurría. Lo mismo se hizo con las áreas invadidas. Como resultado, se obtuvo una base de datos con 797,860 observaciones.

A continuación, cargando esta base de datos, se realizaron los análisis estadísticos, usando Rstudio. Para esto, se usó la técnica estadística Modelos Lineales Generalizados (MLG), los cuales son una técnica estadística que permite analizar datos con una distribución no normal. En este estudio, se recurrió a MLG usando la familia binomial, dado que las variables de respuesta son de tipo binario, es decir, en estos

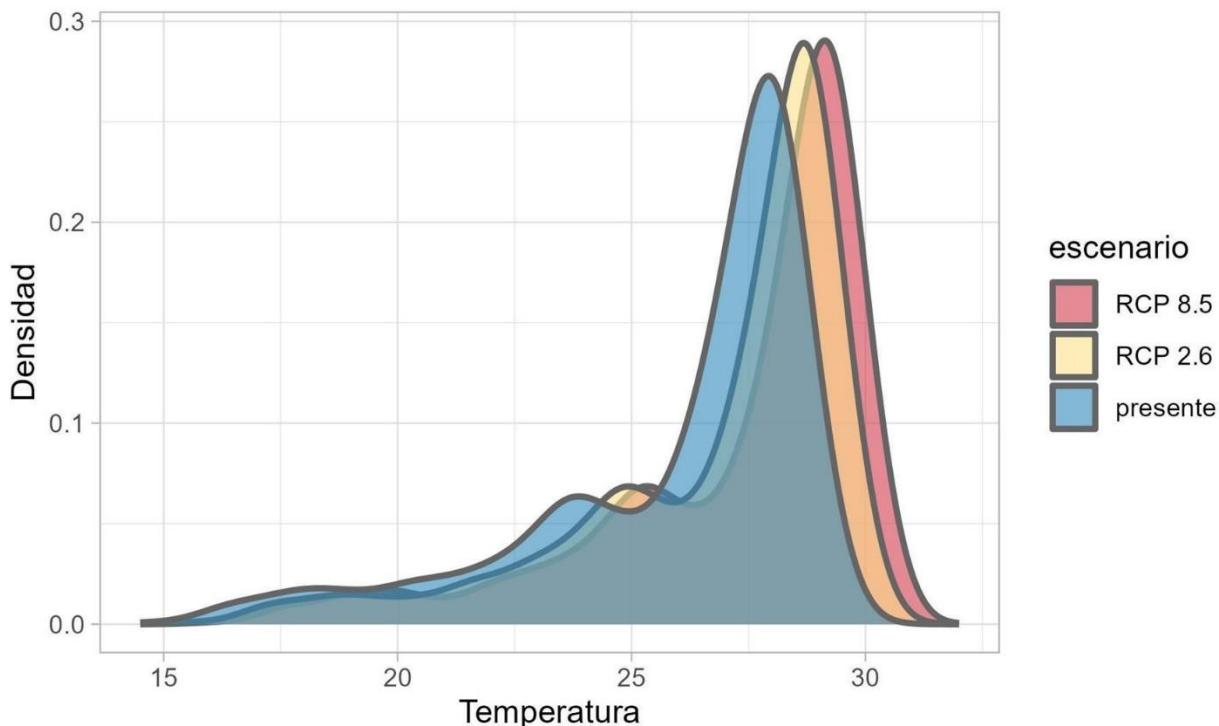
análisis las variables sólo consideran dos categorías, por ejemplo, solo presencia o ausencia. Se usaron los paquetes *tidverse*, *emmeans* y *ggeffects*. Para determinar si existían diferencias entre los escenarios de cambio climático, se tomó como variable independiente los escenarios (RCP 2.6 o RCP 8.5), y las variables dependientes fueron las áreas perdidas e invadidas. Para determinar si existían diferencias en la susceptibilidad entre especies, se utilizó en un segundo modelo a las especies como variable independiente. En este segundo modelo las variables dependientes fueron las mismas que en el anterior.

Se dividió la base de datos en dos para el análisis de las áreas perdidas y las áreas invadidas y se crearon las gráficas. Para una mejor interpretación, se utilizó el paquete *ggeffects* para crear gráficos sobre la predicción de los modelos. Finalmente, se obtuvieron los valores de los coeficientes y el valor de p para identificar si los efectos eran significativos.

## VI. RESULTADOS

### 6.1. Mapas de cambio de temperatura

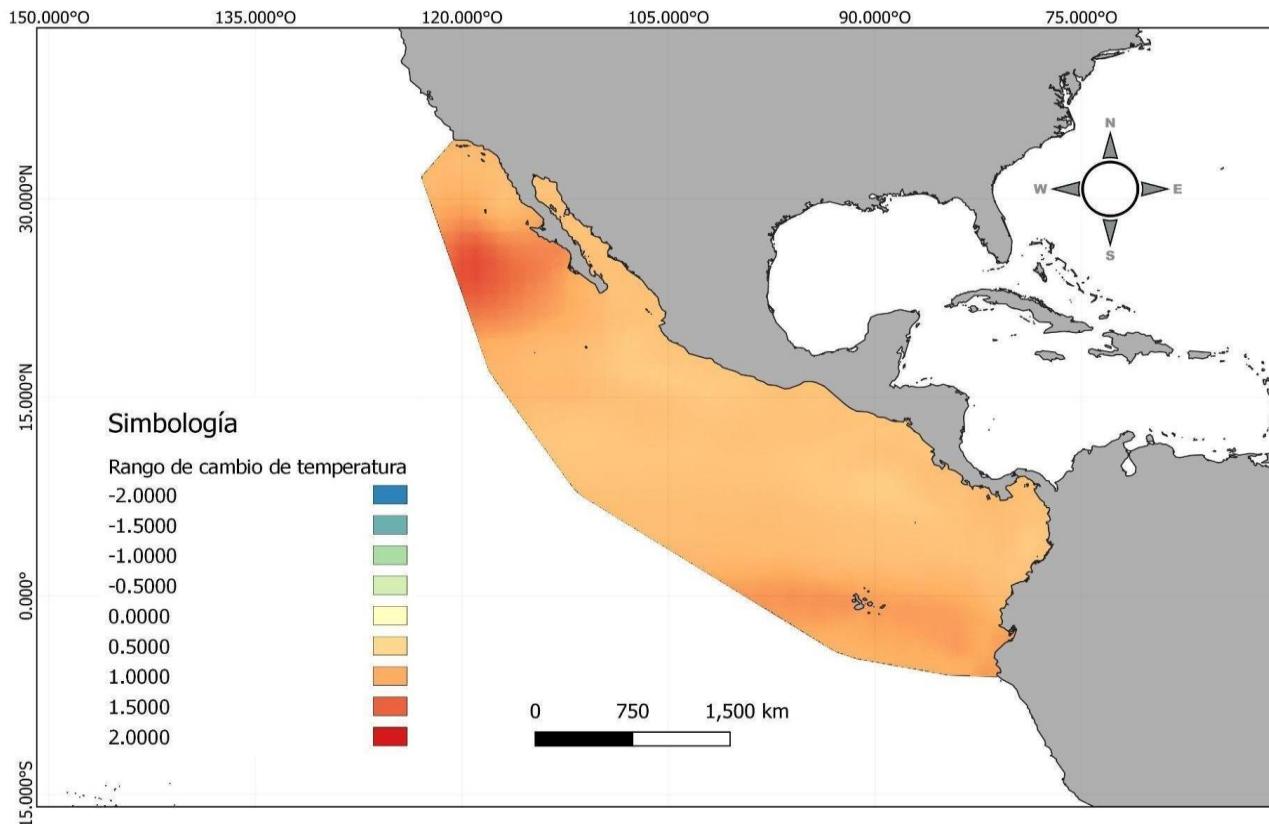
De manera general, se observa que la temperatura proyectada para el año 2050 no disminuye en ninguno de los escenarios en ninguna región del área de estudio, por el contrario, incrementa. Bajo el escenario RCP 2.6 (que es el mejor de los escenarios) para el año 2050 se proyecta un incremento de temperatura de 0.6 a 1.6 °C con respecto a la temperatura actual (véase figura 12). En tanto que bajo el escenario climático RCP 8.5, el más devastador, el incremento de la temperatura iría de 1.06 a 1.9 °C (ver figura 12).



**Figura 12. Rango de incremento de temperatura de los escenarios futuros para el año 2050.** El escenario RCP8.5 es el que presenta el incremento de temperatura más alto con respecto al escenario RCP2.6.

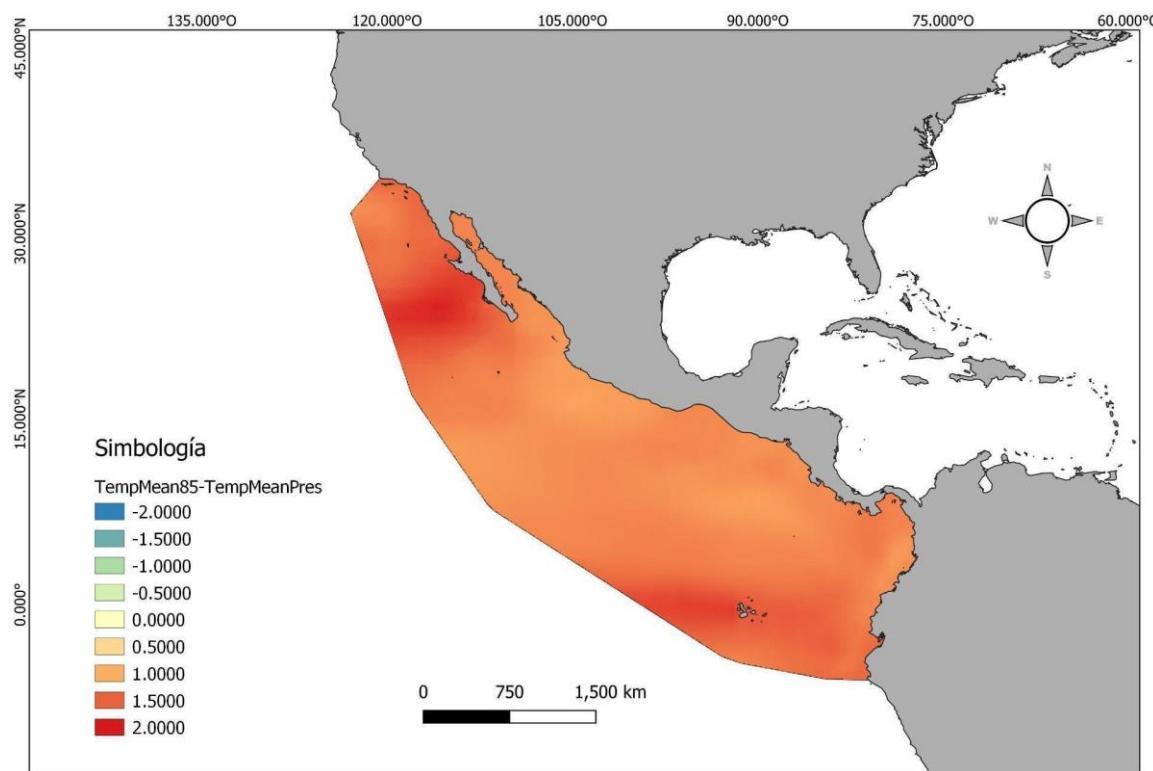
De igual manera, se observa que bajo el escenario climático RCP 2.6 la región del pacífico a la altura de Baja California Sur (alrededor de los 24°N, 124°O), en mar abierto alejado de la costa, es la que presenta el mayor incremento de temperatura, incrementando alrededor de 1.5°C (véase figura 13). De forma similar, a los 0.65°N , a la altura de las islas Clipperton, se observa una franja horizontal a lo largo de los 91

longitud con otro incremento de temperatura mayor a 1°C, sin embargo, para todo el resto del área el incremento de la temperatura es igual o menor a 1°C.



**Figura 13. Mapa de cambios en la temperatura en el escenario RCP 2.6.** En la figura se observa la diferencia en la temperatura del escenario futuro RCP 2.6 con respecto al presente. En la simbología, los colores cálidos que tienden al rojo representan el incremento a la temperatura hasta los 2°C, el valor 0 representado en color amarillo este asignado a las áreas en donde la temperatura se mantiene igual y las tonalidades azules son usadas para representar las áreas con diminución en la temperatura (hasta 2°C).

De igual manera, para el escenario RCP 8.5, las áreas con el mayor incremento de temperatura proyectado son las mismas que para el escenario RCP 2.6, sin embargo, el incremento sería mayor para estas áreas: de 2°C, y para el resto del área de estudio sería de alrededor de 1.5°C (véase figura 14).



**Figura 14. Mapa de cambios en la temperatura en el escenario RCP 8.5.** En la figura se observa la diferencia en la temperatura del escenario futuro RCP 8.5 con respecto al presente. En la simbología, los colores cálidos que tienden al rojo representan el incremento a la temperatura hasta los 2°C, el valor 0 representado en color amarillo esta asignado a las áreas en donde la temperatura se mantiene igual y las tonalidades azules son usadas para representar las áreas con disminución en la temperatura (hasta 2°C).

Así, como se aprecia en los mapas, ambos escenarios presentan grandes diferencias observables en cuanto a sus respectivos incrementos de temperaturas. Asimismo, en ninguno de los escenarios se observa disminución de la temperatura.

## 6.2. Distribución potencial

### 6.2.1. Presente

Los modelos mostraron ser precisos pues los valores de Área Bajo la Cúrcula (AUC por sus siglas en inglés) ROC tuvieron un valor promedio de 0.971 para el tiempo

presente y de 0.939 y 0.940 para los escenarios RCP 2.6 y 8.5 respectivamente, en tanto que la desviación estándar fue  $\pm 0.015$  para el escenario presente,  $\pm 0.027$  para el RCP 2.6 y  $\pm 0.026$  para el RCP 8.5 (Véase Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Valores AUC de la curva ROC por especie en cada escenario.

Especie	Escenario		
	Presente	RCP 2.6	RCP 8.5
<b><i>Porites panamensis</i></b>	0.986	0.975	0.976
<b><i>Pocillopora verrucosa</i></b>	0.980	0.939	0.957
<b><i>Pocillopora capitata</i></b>	0.975	0.973	0.954
<b><i>Pavona gigantea</i></b>	0.968	0.948	0.950
<b><i>Porites lobata</i></b>	0.936	0.888	0.893
<b><i>Pocillopora meandrina</i></b>	0.977	0.921	0.941
<b><i>Pocillopora damicornis</i></b>	0.976	0.935	0.910
<b>Promedio</b>	0.971	0.939	0.940

A continuación, se muestran los resultados de la distribución potencial presente obtenida a partir del modelaje para las 7 especies de coral (ver figura 15 a 18).

*Pavona gigantea* se encuentra presente a lo largo de toda la costa del Pacífico, desde las costas de Sonora hasta Chiapas, y se distribuye hacia las costas sudamericanas, llegando al norte de Perú. Sin embargo, presenta pequeñas áreas de ausencia hacia el sur de Colombia y entre el sur de Sonora y el norte de Sinaloa. De igual manera se encuentra ausente en las costas de Baja California norte, tanto del lado del Pacífico como de la Península (ver figura 17).

Por otra parte, *Pocillopora meandrina* (ver figura 18) se encuentra desde el alto Golfo de California, del lado de Sonora, hasta las costas del norte de Ecuador, presentando ausencia en las costas de Baja California Norte, tanto del lado del Mar de Cortés como del Pacífico. Asimismo, *Pocillopora capitata* se encuentra distribuida a lo largo de toda el área de estudio, únicamente muestra ausencia al llegar al norte del Mar y el océano Pacífico de costas de Baja California Norte, siendo una de las especies que mayor distribución presenta (ver figura 16).

De igual manera, *Pocillopora damicornis* es una de las especies que mayor área de distribución presenta, ya que mostró una distribución similar a *Pocillopora capitata*, con la misma área de ausencia, sin embargo, a diferencia de esta, continúa distribuyéndose en las costas del Pacífico de Baja California Norte hacia las costas de estados Unidos a lo largo del área de estudio (ver figura 16).

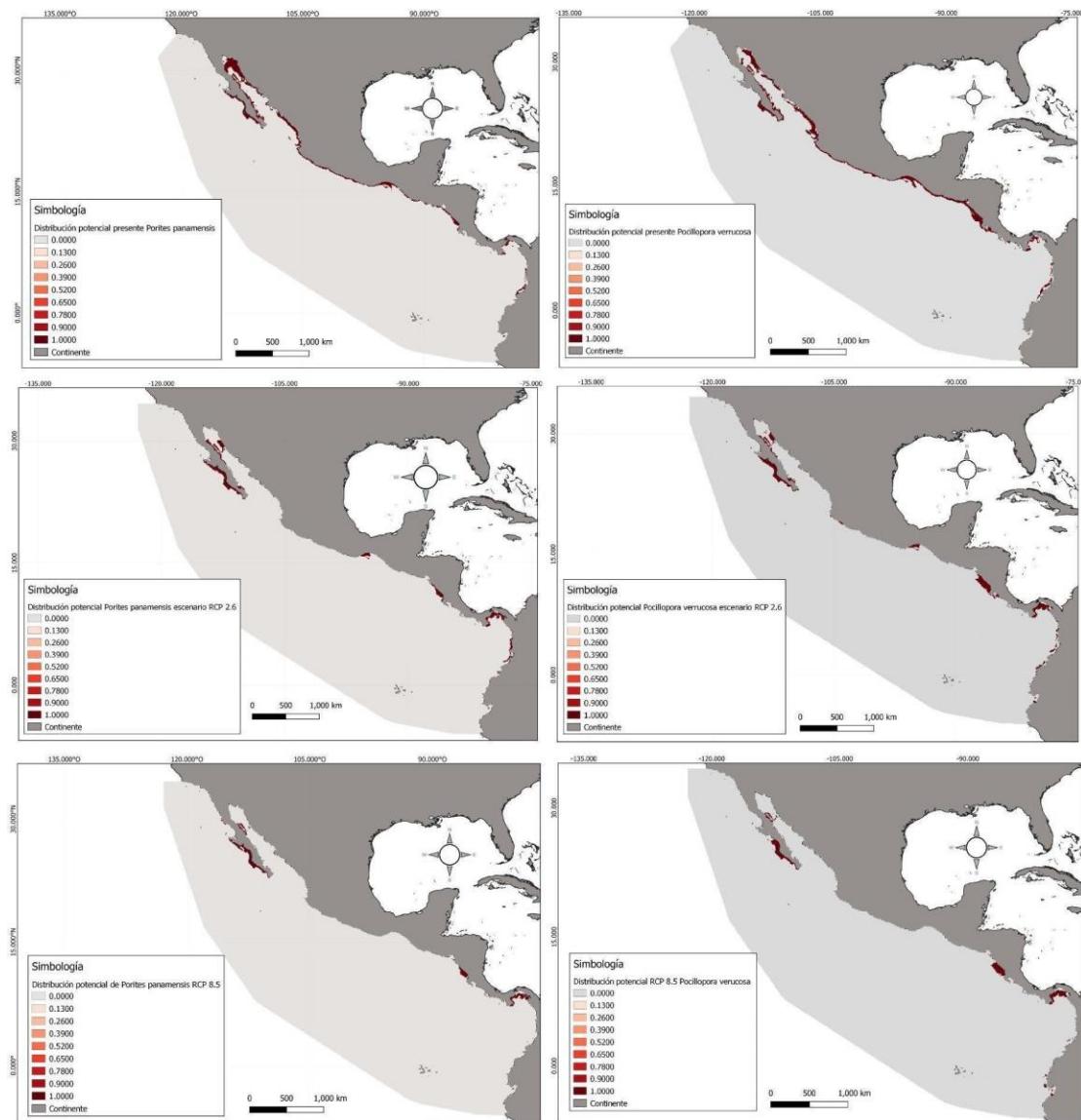
*Pocillopora verrucosa* por su parte, aunque también presenta distribución desde el alto golfo a lo largo del pacífico, solo llega hasta las costas de Colombia, y su área de ausencia se encuentra del lado del Pacífico sobre la costa de Baja California Norte (ver figura 15). De manera similar, *Porites lobata* también presenta ausencia en la misma zona, y su zona de distribución es la misma, sin embargo, en esta se extiende hasta Ecuador (ver figura 17).

#### **6.2.2. Futuro (año 2050)**

Por otro lado, se detalla a continuación los cambios en la distribución potencial de cada especie para el año 2050, de acuerdo con las predicciones obtenidas dado el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5.

Para el futuro, la principal área de distribución de *Porites panamensis* bajo el escenario climático RCP 2.6 se proyecta para ser en las costas del Pacífico de Baja California Sur, con remaches en el golfo de California del lado de Baja California Norte y Sinaloa, alrededor de los 112.95° norte, en Oaxaca (95.20°N), Costa Rica (86.19°N), Panamá y Colombia. En tanto que bajo el escenario RCP 8.5 se distribuiría únicamente en Baja California Sur y en pequeñas áreas de Baja California Norte, Costa Rica y

Panamá, de las áreas mencionadas en el escenario anterior. En este sentido, los resultados concuerdan con la bibliografía existente que explica el movimiento de las especies hacia áreas marginales, ya que el área donde mejor logra conservar el hábitat es en el Pacífico de Baja California Sur, la cual en la actualidad es una región que podría considerarse es una área marginal ya que además de que no presenta tantos registros en la actualidad, y su distribución potencial presente no es la más grande o extensa, sino lo es la línea de costa desde el alto Golfo hasta Nicaragua y Costa Rica (véase figura 15).

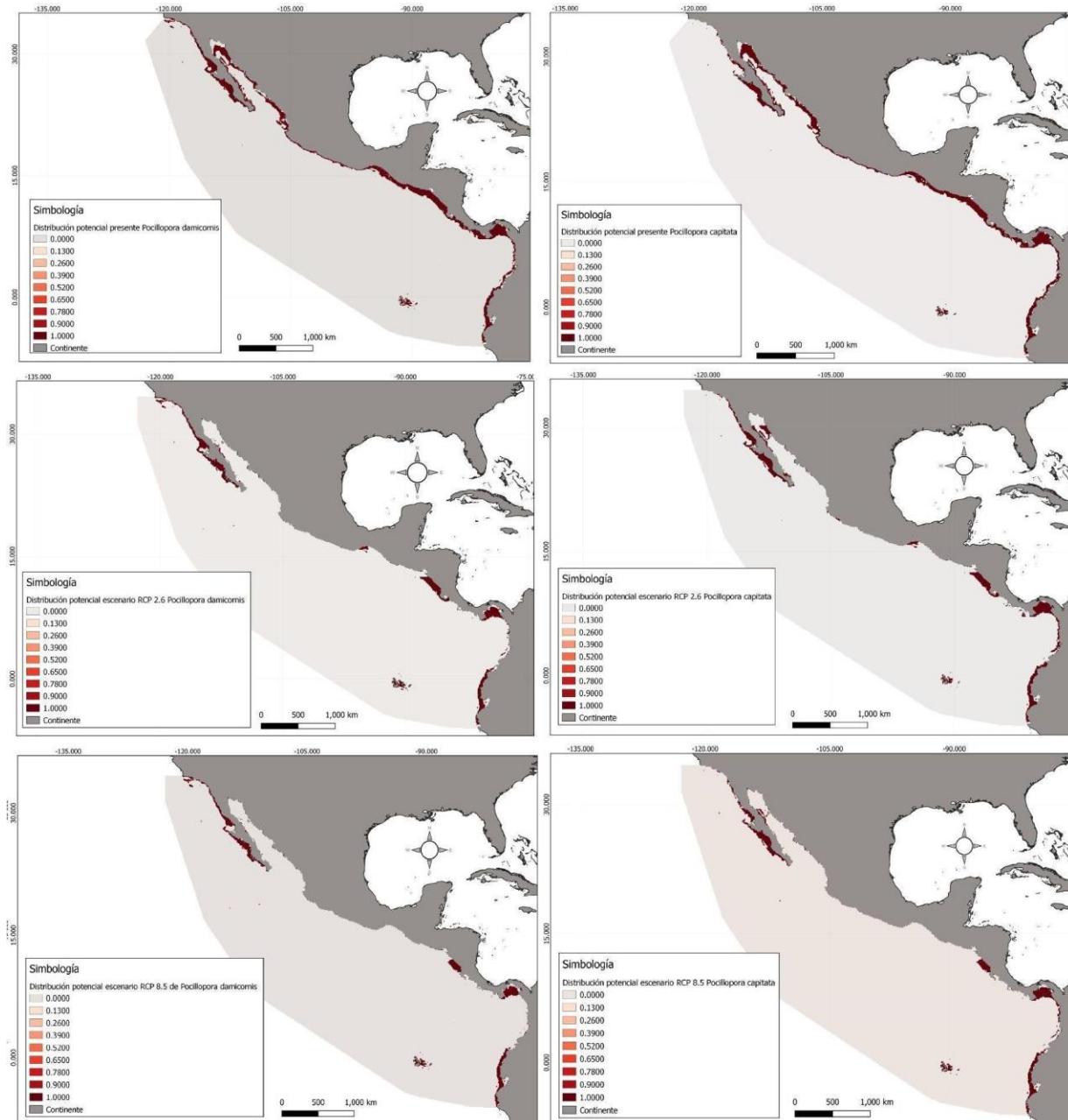


**Figura 15.** Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de *Porites panamensis* (izquierda) y *Pocillopora verrucosa* (derecha). Los colores indican la idoneidad ambiental estimada por Maxent.

Por otro lado, para *Pocillopora verrucosa* se observa una gran pérdida en la línea de costa desde el alto Golfo de California a Chiapas bajo el escenario RCP 2.6 con respecto a la distribución potencial presente, quedando únicamente pequeñas áreas remanentes a los 29.67° norte en Sinaloa, Jalisco (19.15° norte a 19.36° norte) y Oaxaca (16.15° norte). De igual manera, del lado del Mar de Cortés, se pierde la zona costera de Baja California Sur, quedando únicamente una pequeña área a los 24.37° norte y la zona correspondiente a la intersección del Mar de Cortés con el Océano Pacífico en el municipio de Los Cabos. Por el otro lado, del lado del Pacífico, se conservan las costas de Baja California Sur desde los 23.19° norte a los 24.86° norte. Sin embargo, bajo este escenario, se observan también ganancia de hábitat en nuevas áreas de distribución potencial que no se muestran en el presente, de modo que, si se hay expansión a áreas marginales, extendiéndose el área del Pacífico en Baja California Sur hasta los 27.02° norte (mientras que en el presente el área de distribución potencial abarcaba hasta los 24.86° norte). En tanto que para áreas fuera de México, se observa una tendencia de expansión hacia el sur (en Centroamérica), creciendo el área que se encuentra de los 10.93° norte a 11.94° norte (a la altura de Nicaragua y Costa Rica) y la que se encuentra en Panamá con respecto al presente. Por otro lado, en el escenario RCP 8.5 se reducen las áreas de expansión anteriormente mencionadas en el escenario RCP 2.6, y se perderían completamente las áreas remanentes del mismo escenario en Sinaloa, Jalisco, Oaxaca y Baja California Sur (del lado del Golfo de California), quedando únicamente una pequeña área en el Mar de Cortez en las costas de Baja California Norte (alrededor de los 27.98° norte) y la anteriormente mencionada en el Pacífico de Baja California Sur, acortándose hasta los 26.11° norte (véase figura 15).

Por otro lado, en el caso de *Pocillopora damicornis*, al igual que con las anteriores especies, bajo el escenario RCP 2.6 el área de distribución desde el alto Golfo a Chiapas se perdería casi por completo, quedando únicamente un área remanente dentro de México a la altura de Oaxaca alrededor de los 15.95° norte. En tanto que el área mejor conservada sería la costa del Pacífico de Baja California Norte y Baja California Sur, ya que se conserva de manera muy similar a la distribución presente, en tanto que para el lado del Mar de Cortés hay una pérdida casi total de distribución sobre la línea de costa, quedando únicamente una pequeña área entre los 27.51 y 28.55° norte. Por otro lado,

en el escenario RCP 8.5, se reduciría el área de distribución potencial de Baja California norte y sur en el Pacífico con respecto a la distribución en el escenario RCP 2.6 y se perdería completamente la línea de costa del alto Golfo hasta Chiapas, incluyendo el área remanente de Oaxaca que en el RCP 2.6 se lograba mantener (véase figura 16).

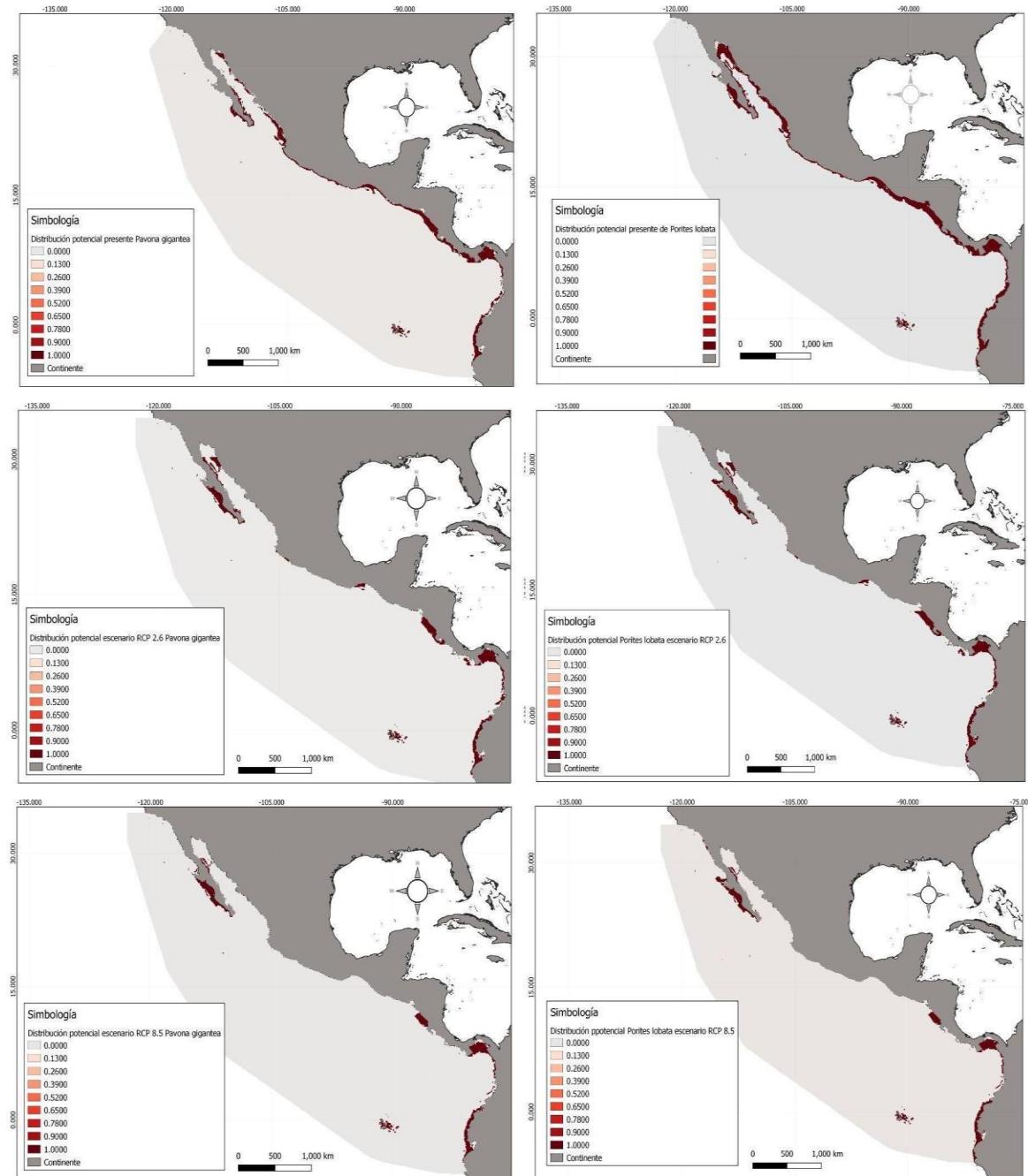


**Figura 16.** Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de *Pocillopora damicornis* (izquierda) y *Pocillopora capitata* (derecha). Los colores indican la idoneidad ambiental estimada por Maxent.

Por otro lado, para *Pocillopora capitata* (véase Figura 16), bajo el escenario RCP 2.6 se perdería la línea de costa desde el alto Golfo hasta Chiapas casi en su totalidad, quedando dos áreas remanentes a la altura de Sinaloa (alrededor de los 27.69° norte) y Oaxaca (16.15° norte). De igual manera, se pierde el área de Baja California Sur entre los 23.40° y 26.64° norte, quedando una única zona remanente a los 24.23° norte, con respecto al presente. Asimismo, en este escenario se observa una movilización del área de distribución potencial hacia zonas más norteñas, hacia los 30.15° norte para el Mar de Cortés y hasta costas estadounidenses (34.33° norte) para el Pacífico que inicialmente abarcaba únicamente las costas de Baja California Norte y Sur. Por otro lado, en el escenario RCP 8.5 se perdería completamente toda la línea de costa desde al alto Golfo hasta Chiapas, a diferencia del RCP 2.6 en el cual aún se lograrían conservar algunas áreas remanentes, y lo mismo ocurriría con las zonas en Baja California norte (29.87° norte) y Baja California Sur (23.13° a 24.33° norte). En tanto que las zonas del escenario RCP 2.6 que se conservan en Baja California norte y sur del lado del Pacífico se reducirían en el RCP 8.5, abarcando una mejor amplitud de plataforma continental.

Para *Pavona gigantea* (véase figura 17) se observa que en el escenario climático RCP 2.6 se perdería la mayoría del área de distribución potencial desde el alto golfo hasta Chiapas, quedando únicamente pequeñas áreas remanentes en Sinaloa (29.03° a 20.07° norte), Jalisco (18.95° y 19.73° norte) y Oaxaca (16.02° a 15.87° norte) con respecto al presente. En tanto que para el Mar de Cortez se observa posible migración bajo este mismo escenario siendo que el área de distribución que se encuentra en el presente de los 23.08° a los 27.52° norte, abarcando Baja California Sur, en el escenario RCP 2.6 se mueve a Baja California Norte (de los 27.52° a los 30.13° norte) y a la Isla Ángel de la Guarda, en la cual se observa una gran área de distribución potencial no existente en el escenario presente. Por el otro lado en la costa del Pacífico en Baja California Sur se observa una extensión del área de distribución potencial hasta los 26.94° norte, con respecto al presente. Por el otro lado, en el escenario RCP 8.5 no quedaría ninguna área remanente en la costa del alto Golfo a Chiapas. Para las costas de Baja California Norte y Sur se conservaría la misma área de distribución potencial del lado del Pacífico que en RCP 2.6, y se presentaría otra pequeña migración a los 27.99°

norte en el océano correspondiente a Baja California Norte. En tanto que, en el Mar de Cortés, se observaría una menor migración con respecto a la que podría ocurrir bajo el escenario RCP 2.6, abarcando de los 28.04° a 29.55° norte en Baja California Norte, sin embargo, se conservaría la misma área de distribución en la Isla Ángel de la Guarda que en el RCP 2.5.

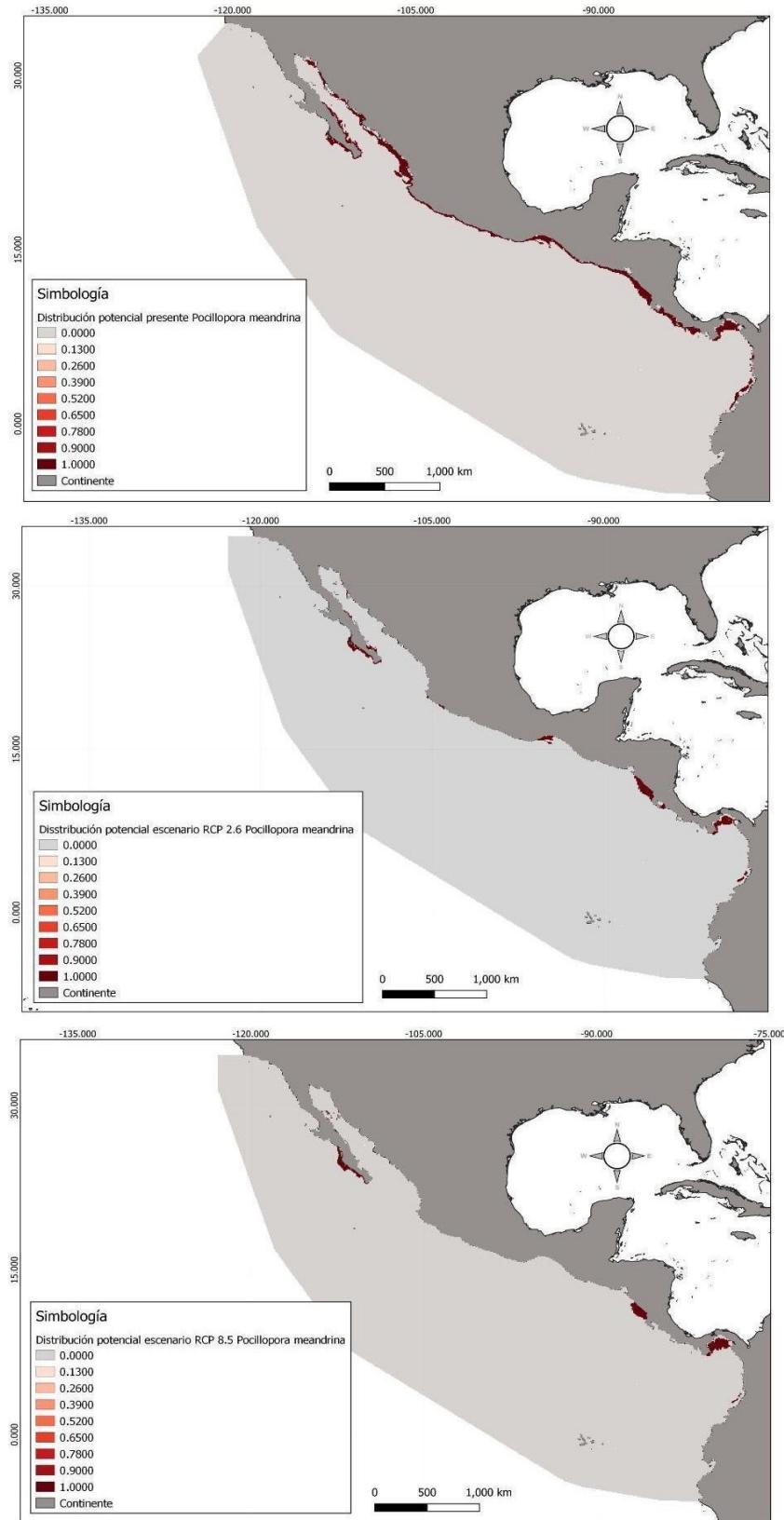


**Figura 17.** Distribución potencial presente y bajo escenarios futuros del año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.5) de *Pavona gigantea* (izquierda) y *Porites lobata* (derecha). Los colores indican idoneidad ambiental estimada por Maxent.

Para la especie *Porites lobata* (véase figura 17) se observaría una pérdida de distribución potencial desde el alto Golfo hasta Chiapas con respecto al presente, quedando pequeñas áreas remanentes en Sinaloa, Jalisco y Oaxaca en el escenario climático RCP 2.6, en tanto que para Baja California Sur se observa una ampliación de su distribución potencial con respecto al presente, extendiéndose hasta el sur de Baja California norte a los 27.93° norte y a una pequeña zona en costas estadounidenses a los 31.75° norte. Por el otro lado, en el Mar de Cortez, la Isla del Ángel de la Guarda se conserva igual que en el presente, al igual que una pérdida de área potencial en el centro de Baja California Sur y en una zona al sur a los 23.34° norte, pero también se observa una migración hacia el norte de los 27.20° a los 30.13° norte. Por otra parte, bajo el escenario RCP 8.5 se conservaría el mismo hábitat potencial de las costas de Baja California Norte y Sur del Pacífico que en el RCP 2.6, sin embargo, se reduciría la distribución para estos mismos estados del lado del Mar de Cortez con respecto al presente, quedando únicamente una pequeña área al Sur de Baja California Norte. De igual manera, se conservaría la distribución potencial de la Isla Del Ángel de la Guarda. Aunado a esto, se observa la misma migración que en escenario RCP 2.6 hacia las costas de Estados Unidos, además de una segunda migración a los 32.63° norte. No obstante, bajo este escenario se perdería en su totalidad la línea de costa desde Sinaloa hasta Chiapas.

Finalmente, se presentan los posibles cambios por escenario futuro para *Pocillopora meandrina* (véase figura 18). Bajo el escenario climático RCP 2.6, en la línea de costa que va de Sinaloa a Chiapas se conservan únicamente pequeñas áreas remanentes en Jalisco y Oaxaca, en tanto que para Baja California Sur se observa una disminución de área habitable, pero es la parte mejor conservada. Por el otro lado, en el Mar de Cortez, se observa gran pérdida del área de distribución potencial con respecto al presente para el estado de Baja California Sur, ya que solo se logra conservar una zona al norte del estado (27.52° norte) y otra al Sur (alrededor de los 24.33 ° norte). Por otra parte, en el RCP 8.5, la única área remanente sería la mencionada en el RCP 2.6 que se encuentra en la costa del Pacifico de Baja California Sur, sin embargo, en esta misma se observaría una expansión hacia el norte, hasta los 26.21° norte con respecto

a su extensión inicial en el presente que abarcaba hasta los 24.80°.

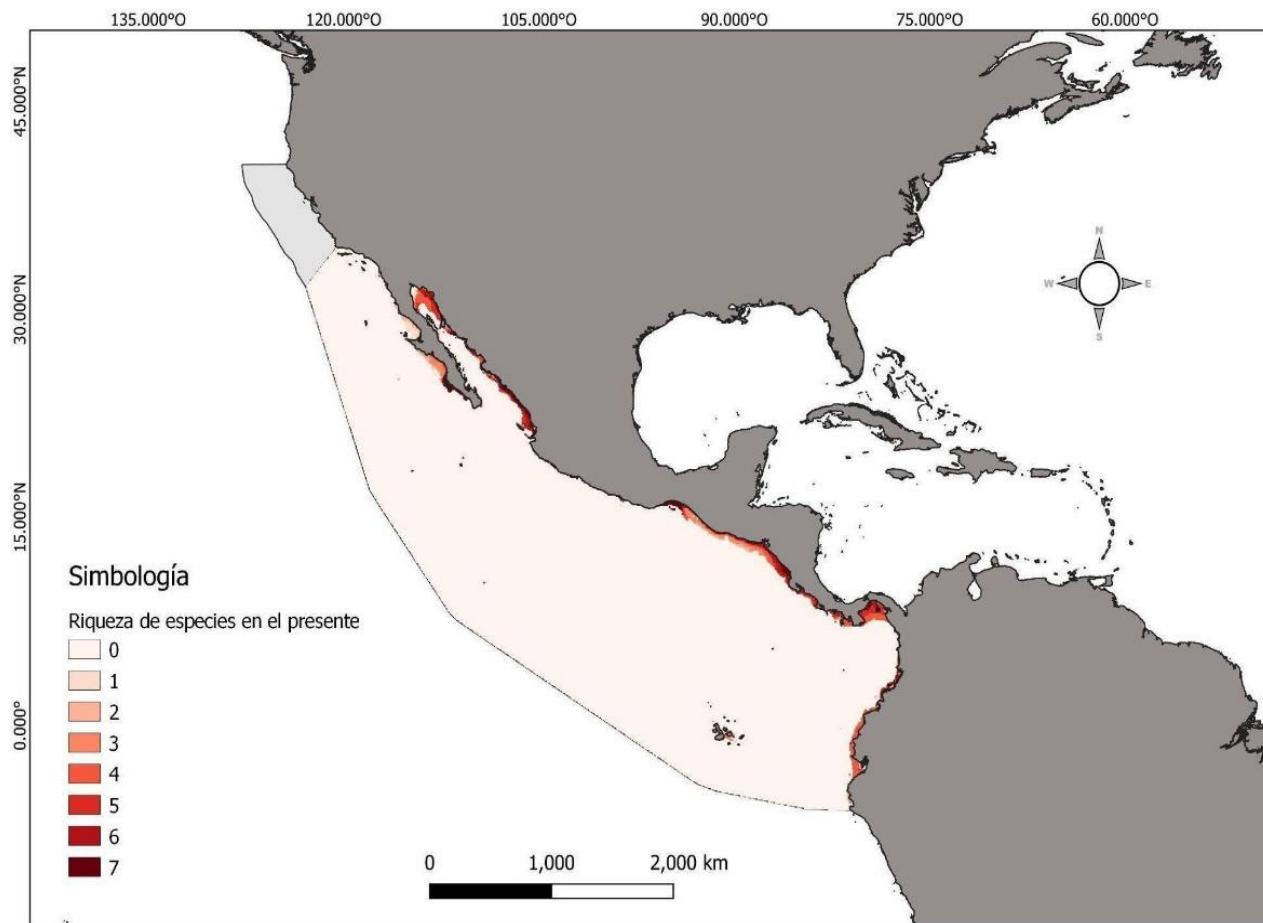


**Figura 18.** Distribución potencial de *Pocillopora meandrina* para los diferentes escenarios climáticos. Los colores indican la idoneidad ambiental estimada por Maxent.

Como se puede observar, existe una tendencia general de las especies a distribuirse potencialmente en las costas de Jalisco, Oaxaca y Sinaloa bajo los escenarios climáticos en el año 2050, especialmente bajo el escenario RCP 2.6, representando estas áreas, potenciales refugios que en el futuro contendrán las condiciones ambientales para que los corales se resguarden. De igual manera, otro patrón observado es el de la conservación de una mayor área de distribución potencial en el escenario RCP 2.6 a comparación con el escenario climático RCP 8.5, lo cual se observa claramente en todas las especies.

### **6.3. Riqueza de especies**

Como se puede visualizar en los mapas (véase figura 19 a figura 22), aunque hay zonas que se conservan, de manera general se proyecta una pérdida de la riqueza de especies para el año 2050 con respecto a la riqueza estimada en el presente. De igual manera, en el escenario RCP 8.5, se observa una menor estimación de riqueza de especies de coral con respecto al escenario RCP 2.6 en el área de estudio. Como se puede ver en la imagen, a lo largo de toda la costa del Pacífico, desde el alto Golfo de California hasta el sur de El Salvador, se encuentra una franja oscura que representa la riqueza de especies más alta, así, entre más cercana es el área a la costa, se encuentra la mayor riqueza de especies de coral.

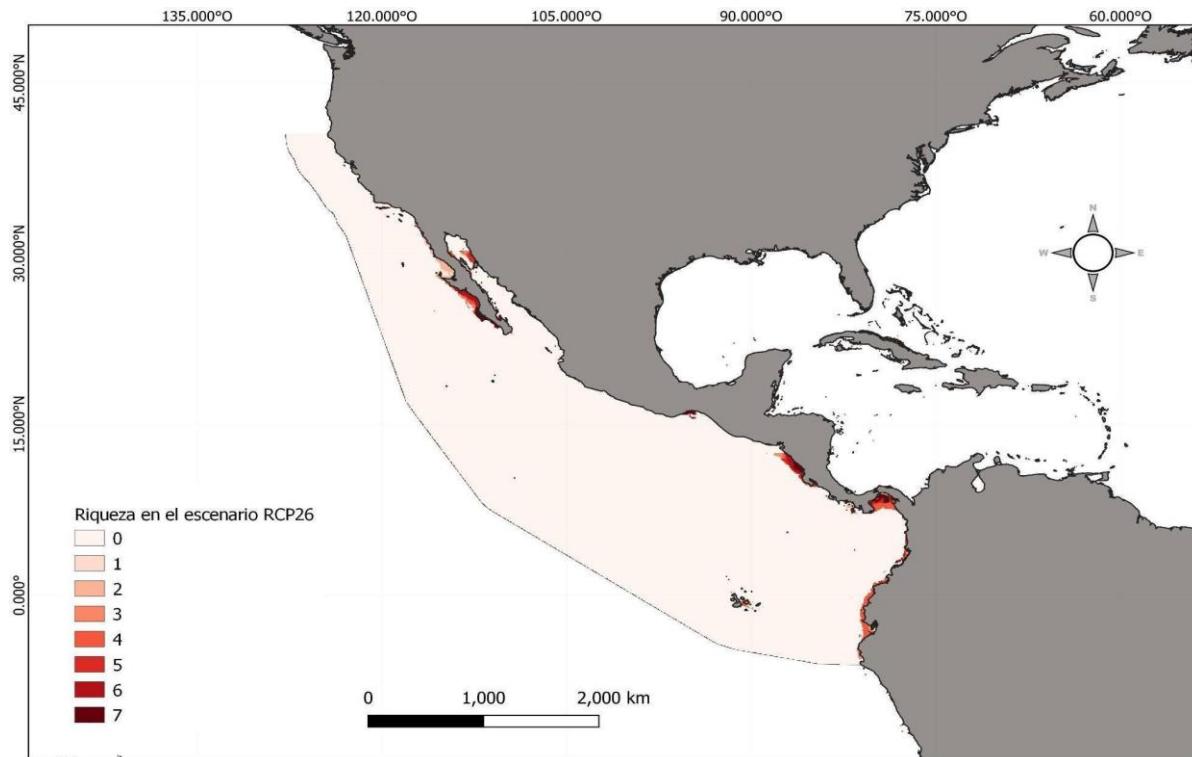


**Figura 19. Mapa de áreas de riqueza en el presente.** Los colores más oscuros representan las regiones con mayor riqueza de especies, siendo la tonalidad más oscura, el rojo carmín, el que representa las zonas con mayor riqueza, presentando las 7 especies. En tanto que las tonalidades más claras representan las áreas con menor riqueza de especies, siendo 0 (color blanco) las áreas donde no se encuentra presente ninguna especie.

De igual manera se observan dos grandes áreas importantes: las áreas más oscuras sobre el Pacífico se encuentran entre los 20° y 24° Norte, a la altura de las costas de Nayarit, al igual que entre los 14° y 15° N (al sur de Oaxaca), que son los puntos de mayor riqueza en el área de estudio (véase figura 19). De igual manera se observa la franja sobre la costa de Baja California Sur, tanto como del lado del Mar de Cortés, como del lado del Océano Pacífico.

Por otro lado, las proyecciones bajo el escenario RCP 2.6 para el año 2050 muestran que las áreas con gran riqueza en el presente, que se encuentran a lo largo

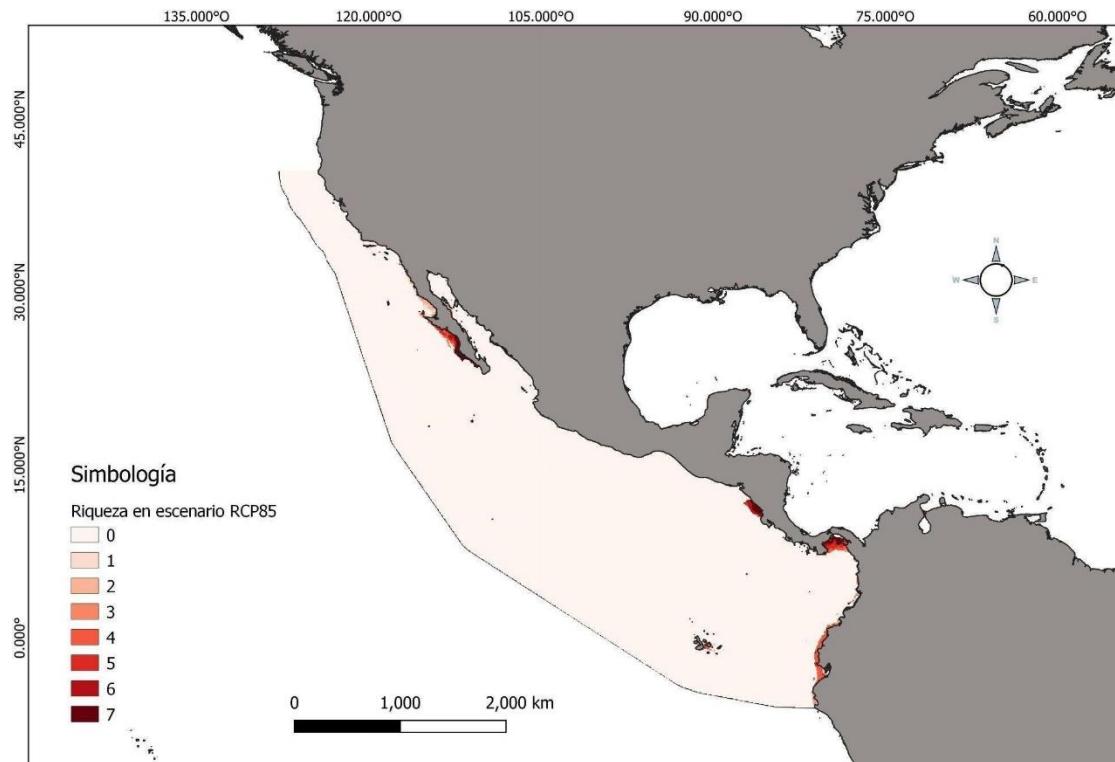
de la costa mexicana en el Pacífico, se pierden completamente, ya que la franja que en el presente iba desde el alto Golfo hasta El Salvador ya no existe en el RCP 2.6, quedando únicamente áreas remanentes a la altura del sur de Oaxaca, en el Sur del Salvador, y en el canal de Panamá. De igual manera, la zona mejor conservada en este escenario es la costa del Pacífico de Baja California Sur, en donde la riqueza de especies de coral se proyecta que reducirá, no obstante, las especies que permanecen en la región guardan más o menos la misma área como habitable (véase figura 20).



**Figura 20. Mapa de áreas de riqueza en el escenario 2.6.** Los colores más oscuros representan las regiones con mayor riqueza de especies, siendo la tonalidad más oscura, el rojo carmín, el que representa las zonas con mayor riqueza, presentando las 7 especies. En tanto que las tonalidades más claras representan las áreas con menor riqueza de especies, siendo 0 (color blanco) las áreas donde no se encuentra presente ninguna especie.

Finalmente, bajo el escenario RCP 8.5 se proyectan mayor reducción de las áreas de distribución de las especies con consecuencias severas sobre la riqueza de especies. En este escenario, se proyecta que las condiciones dejan de ser propicias para las especies de coral en las porciones del alto Golfo de California y el Sur de Oaxaca, donde el escenario RCP 2.6 identificaba buenas condiciones para varias

especies. De igual manera, se pierde parte de las áreas en las costas de El Salvador y el Canal de Panamá, sin embargo, a diferencia de las áreas anteriormente mencionadas, que desaparecen completamente, en estas todavía quedan las áreas con las condiciones de distribución para las 7 especies. En este escenario, las áreas mejor conservadas son las costas del Pacífico de Baja California Norte y Baja California Sur. Baja California Norte en donde a pesar de que las especies sufren una reducción del área habitable, la riqueza se mantiene (alrededor de 2 especies presentes en el área); en tanto que Baja California Sur se proyecta que las especies mantienen aproximadamente la misma área habitable que en el escenario RCP 2.6 el número de especies presentes disminuiría con respecto a este escenario y el presente.



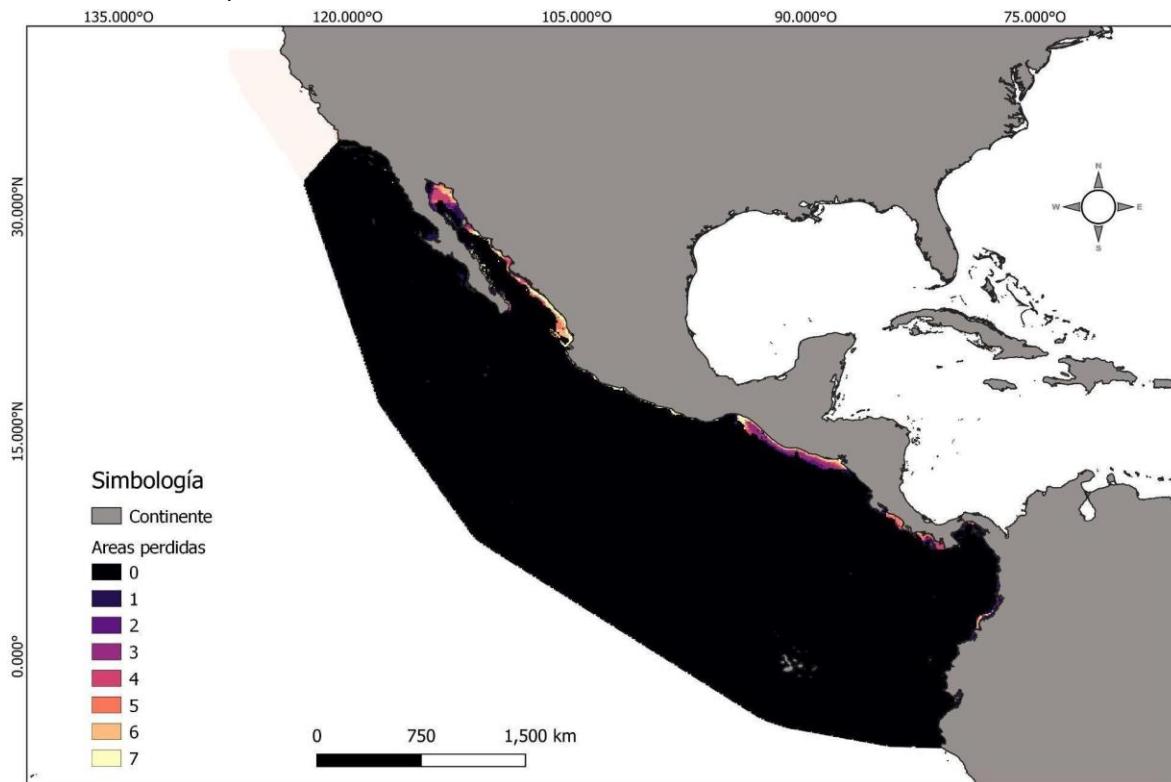
**Figura 21. Mapa de áreas de riqueza en el escenario 8.5.** Los colores más oscuros representan las regiones con mayor riqueza de especies, siendo la tonalidad más oscura, el rojo carmín, el que representa las zonas con mayor riqueza, presentando las 7 especies. En tanto que las tonalidades más claras representan las áreas con menor riqueza de especies, siendo 0 (color blanco) las áreas donde no se encuentra presente ninguna especie.

De igual manera, otras áreas que logran mantener condiciones propicias para las especies de coral en el futuro son las Islas Clipperton y la costa de Ecuador (entre los 5° sur y 1.30° norte), las cuales, bajo ambos escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, conservan

la misma área habitable y riqueza de especies (de 2 a 4 especies presentes en esta área).

#### 6.4. Pérdida de áreas de distribución estimada

De manera general, se observa que las áreas con mayor pérdida de hábitat se encuentran en dos regiones principales; entre los  $20.5^{\circ}$  y  $28^{\circ}$  N sobre las costas del Pacífico correspondientes a Sinaloa y gran parte de Sonora; y, de los  $12.51$  a los  $16^{\circ}$ N, sobre Chiapas, Guatemala y El Salvador (véase figura 22). Por otro lado, en la línea de costa que va desde Jalisco hasta Guerrero se observa un área de menor amplitud de 10,000 a 12,000 metros de distancia desde la línea de costa hacia el mar, en tanto que la distancia para las dos áreas de mayor pérdida de hábitat mencionadas anteriormente es de 18,264 m (a distancia mínima) a 31,599 metros (distancia máxima) para la primera, en tanto que para la segunda es de 4,633 m (distancia mínima) a 64,817 m (distancia máxima).



**Figura 22. Pérdida de especies.** Las áreas con menor cantidad de especies perdidas se muestran en negro (0 especies perdidas) y disminuye la tonalidad del color hasta llegar a la tonalidad blanca, que representa las áreas con la mayor pérdida de especie

Finalmente, se muestran el porcentaje y extensión de área que los modelos proyectan que las especies perderán bajo los efectos del cambio climático, para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (véase cuadro 6), siendo el primero el escenario con las proyecciones más alentadoras en el cuál la temperatura global incrementa de 1.5°C a 2°C únicamente, y siendo el último el de las consecuencias más severas, con un incremento de más de 4°C (IPCC, 2023).

**Cuadro 6.** Extensión de área (distribución potencial) y pérdida de área por especie de cada escenario de cambio climático con respecto al presente.

Especie	Área (km2) potencial presente			Área perdida					
	Presente	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	km2	%	RCP 8.5	km2	%
<i>Porites panamensis</i>	163,857.73	86,029.08	58,214.50	77,828.65	47.5		105,643.23		64.47
<i>Pocillopora verrucosa</i>	189,888.02	105,552.78	64,276.65	84,335.24	44.41		125,611.37		66.15
<i>Porites lobata</i>	400,993.57	213,512.58	157,437.67	187,480.98	46.75		243,555.90		60.74
<i>Pocillopora meandrina</i>	185,608.85	61,958.77	53,489.58	123,650.08	57.75		132,119.27		71.18
<i>Pocillopora damicornis</i>	403,935.49	185,341.40	153,247.65	218,594.09	54.12		250,687.84		62.06
<i>Pocillopora capitata</i>	378,527.94	222,694.96	159,933.85	155,832.98	41.17		218,594.09		57.75
<i>Pavona gigantea</i>	257,374.04	189,353.12	139,696.96	68,020.92	26.43		117,677.08		45.72

La especie con la distribución potencial más amplia para el presente es *Pocillopora damicornis*, que presenta un área de distribución de 403,935.4934 km<sup>2</sup>. Sin embargo, esto cambia en el futuro, ya que enfrenta una gran pérdida de su área: 218,594.0918 km<sup>2</sup> en el escenario RCP 2.6, lo que corresponde al 54.1% de su área, y para el escenario RCP 8.5 enfrenta una pérdida aún mayor, perdiendo el 62.06% de su distribución potencial original, que corresponde a 250,687.841 km<sup>2</sup>. Por otro lado,

*Porites Panamensis* es la especie con la menor área de distribución potencial para el presente ( $163,857.7296 \text{ km}^2$ ).

Bajo el escenario climático RCP 2.6, *Pocillopora capitata* es la especie con la mayor distribución potencial ( $222,694.9597 \text{ km}^2$ ), sin embargo, en el escenario RCP 8.5 pierde gran parte de su cobertura inicial:  $218,594.09 \text{ km}^2$ , es decir, el 57.74% con respecto al área de distribución potencial en el presente. En este mismo escenario RCP 2.6, *Porites panamensis* es la especie con menor distribución potencial ( $86,029.07 \text{ km}^2$ ), perdiendo el 47.49% de su distribución original en el presente (lo que equivale a  $77,828.65 \text{ km}^2$ ). Sin embargo, a pesar de que es la especie con la menor extensión bajo este escenario climático, no es la que presenta la mayor pérdida de su extensión, sino *Pocillopora verrucosa*, que pierde  $123,650.08 \text{ km}^2$ , es decir, el 57.74% de su distribución potencial original. A esta, le siguen *Pocillopora damicornis*, la especie que tenía la distribución más amplia, pierde el 54.11% de su área de presencia, y *Porites panamensis*, que pierde el 47.49%.

Por el otro lado, *Pavona gigantea* es la especie que mejor se mantiene en este escenario, perdiendo únicamente el 26.42% de su distribución original ( $68,020.91 \text{ km}^2$  de los  $257,374.0387 \text{ km}^2$  de extensión para el presente), siendo esta, la menor pérdida de extensión que se observa de entre todas las especies en los dos escenarios analizados, ya que el resto de los porcentajes de pérdida se encuentran por encima del 41% (como lo es para *Pocillopora capitata* bajo este mismo escenario).

En cuanto al escenario RCP 8.5, *Pocillopora capitata* es la especie con mayor área de distribución en este escenario ( $159,933.85 \text{ km}^2$ ), sin embargo, para el futuro bajo el escenario RCP 2.6 pierde el 57.74% de su extensión, es decir,  $218,594.09 \text{ km}^2$ . Por otro lado, la especie con la distribución potencial más reducida en este escenario es *Pocillopora verrucosa* ( $53,489.58 \text{ km}^2$ ) y es precisamente esta la que mayor área pierde en este escenario con respecto a la distribución potencial presente, en el cual se extiende en un área de  $185,608.84 \text{ km}^2$ , pero para este escenario pierde  $132,119.26 \text{ km}^2$ , lo que corresponde al 71.18% de su distribución original, siendo esta la mayor pérdida de hábitat observada en ambos escenarios examinados. Por el contrario, *Pavona gigantea* es la especie que mejor se mantiene en este escenario que es el más catastrófico, perdiendo el 45.72% de su área de distribución potencial original ( $117,677.0804 \text{ km}^2$ ).

Así, de manera general se observa una gran pérdida de hábitat potencial en ambos escenarios climáticos, sin embargo, bajo el escenario RCP 8.5 los efectos son más devastadores, perdiéndose del 45.7% al 71.1% del hábitat potencial donde podían distribuirse las especies analizadas para el año 2050, en tanto que bajo el escenario RCP 2.6 los corales se enfrentan a una pérdida del 41.1% al 57.7%. Si bien estos resultados son alarmantes, ya que en la gran mayoría de los casos se pierde más del 50% de la distribución potencial para estas especies, no son tan devastadores como los predichos por el IPCC en el cual se pierde del 70% al 90% de los corales a nivel mundial, tan solo bajo el mejor escenario climático RCP 2.6.

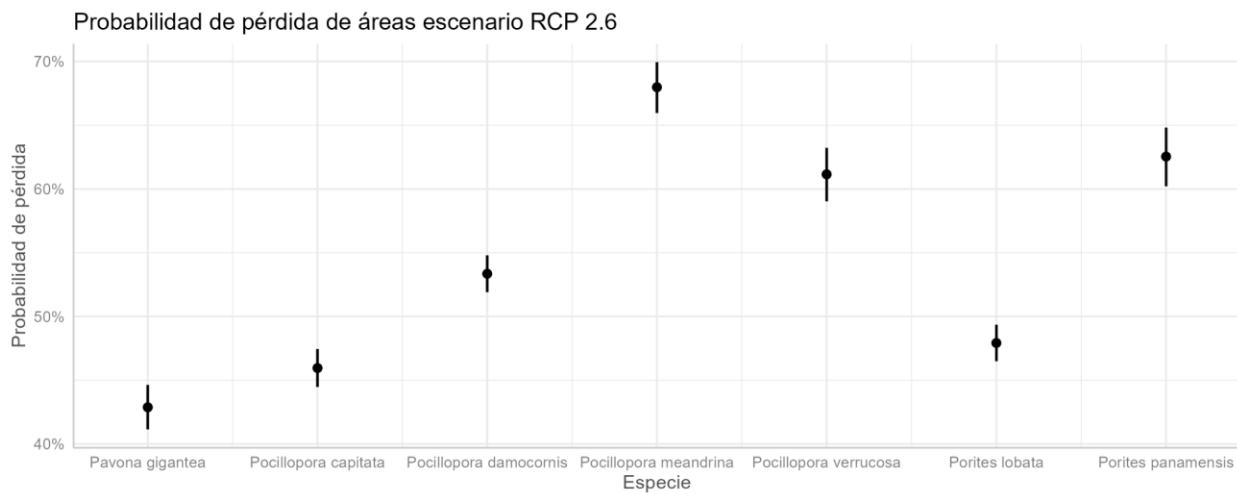
## 6.5. Análisis estadísticos

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de los análisis estadísticos realizados (ver figura 23 a 6.16). Los resultados muestran que existen diferencias significativas en la probabilidad de perder hábitat entre las especies como resultado de los cambios de las condiciones ambientales en el futuro ( $p<0.05$ , ver cuadro 7).

Como se puede observar en la figura 23, bajo el escenario RCP 2.6, la especie con la menor probabilidad de pérdida de distribución es *Pavona gigantea*, en tanto que *Pocillopora meandrina* es la especie que más probablemente enfrente pérdida de hábitat bajo este escenario climático, con una gran diferencia con respecto a las demás especies.

**Cuadro 7.** Comparación de la probabilidad de pérdida de áreas de distribución por pares de especies en el escenario RCP 2.6. Valores de p<0.05 indican diferencias significativas

contraste	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora capitata</i>	-0.1248	0.0474	Inf	-2.63	0.1169
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	-0.4212	0.0469	Inf	-8.987	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-1.04	0.0592	Inf	-17.559	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.7406	0.0579	Inf	-12.785	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.2037	0.0467	Inf	-4.364	0.0003
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.7996	0.062	Inf	-12.896	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	-0.2964	0.0425	Inf	-6.971	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.9152	0.0559	Inf	-16.386	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.6158	0.0545	Inf	-11.306	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.0789	0.0423	Inf	-1.866	0.5034
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.6749	0.0588	Inf	-11.479	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.6188	0.0554	Inf	-11.176	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.3194	0.054	Inf	-5.918	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites lobata</i>	0.2175	0.0417	Inf	5.219	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.3785	0.0583	Inf	-6.488	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	0.2994	0.065	Inf	4.606	0.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites lobata</i>	0.8363	0.0552	Inf	15.148	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites panamensis</i>	0.2404	0.0687	Inf	3.5	0.0084
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites lobata</i>	0.5369	0.0538	Inf	9.978	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.059	0.0675	Inf	-0.874	0.9764
<i>Porites lobata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.596	0.0582	Inf	-10.243	<.0001



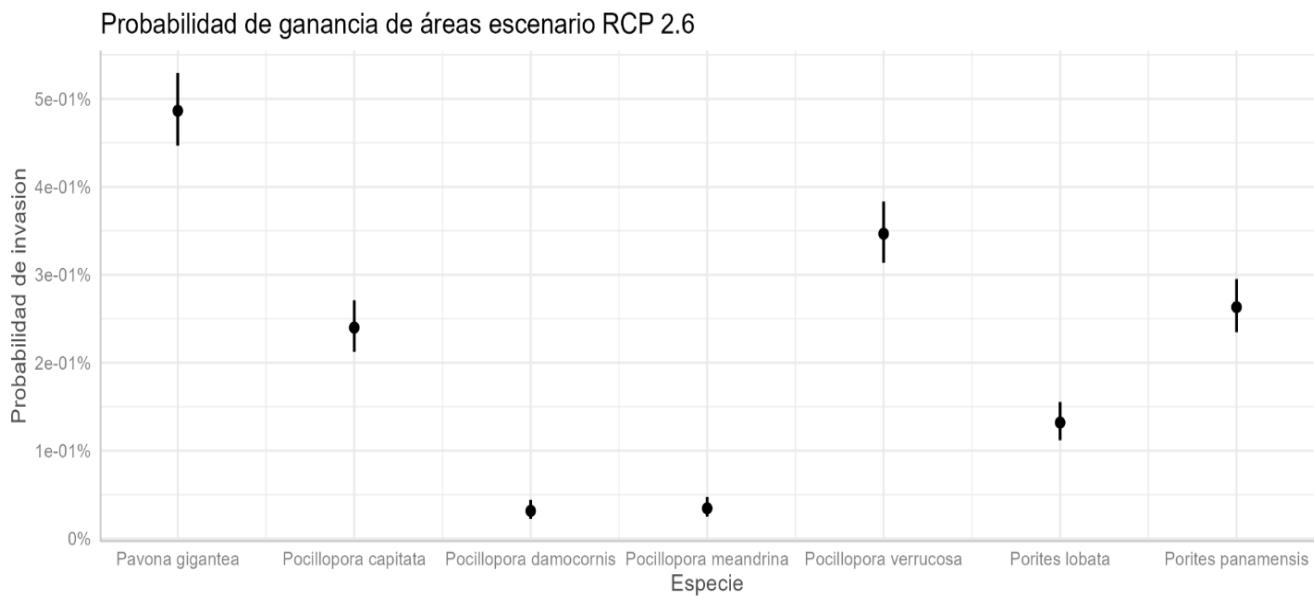
**Figura 23.** Comparación de la probabilidad promedio de perdida de distribución para las especies de corales en el escenario RCP 2.6. Las barras de error muestran los intervalos de confianza al 95%.

De igual manera, bajo este mismo escenario, *Pavona gigantea* es también la especie que tiene las mayores probabilidades de invadir nuevas áreas (véase figura 24), en tanto que *Pocillopora damicornis* sería la especie con la menor probabilidad de expandirse a otras áreas (ver cuadro 8).

**Cuadro 8.** Relación de valores para Áreas invadidas en escenario RCP 2.6

contraste	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora capitata</i>	0.70	0.07	Inf	9.34	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	2.73	0.17	Inf	15.48	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	2.65	0.16	Inf	15.78	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	0.34	0.06	Inf	5.05	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites lobata</i>	1.30	0.09	Inf	13.83	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites panamensis</i>	0.61	0.07	Inf	8.43	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	2.03	0.18	Inf	11.12	<.0001

<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	1.9417	0.174	Inf	11.176	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.3689	0.0806	Inf	-4.577	0.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites lobata</i>	0.5989	0.105	Inf	5.731	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.0927	0.0855	Inf	-1.083	0.9332
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.0885	0.236	Inf	-0.375	0.9998
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-2.3991	0.179	Inf	-13.404	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites lobata</i>	-1.4312	0.191	Inf	-7.496	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites panamensis</i>	-2.1229	0.181	Inf	-11.712	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-2.3107	0.17	Inf	-13.582	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites lobata</i>	-1.3428	0.183	Inf	-7.351	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites panamensis</i>	-2.0344	0.173	Inf	-11.792	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites lobata</i>	0.9679	0.0984	Inf	9.838	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites panamensis</i>	0.2763	0.0779	Inf	3.546	0.0072
<i>Porites lobata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.6916	0.102	Inf	-6.75	<.0001

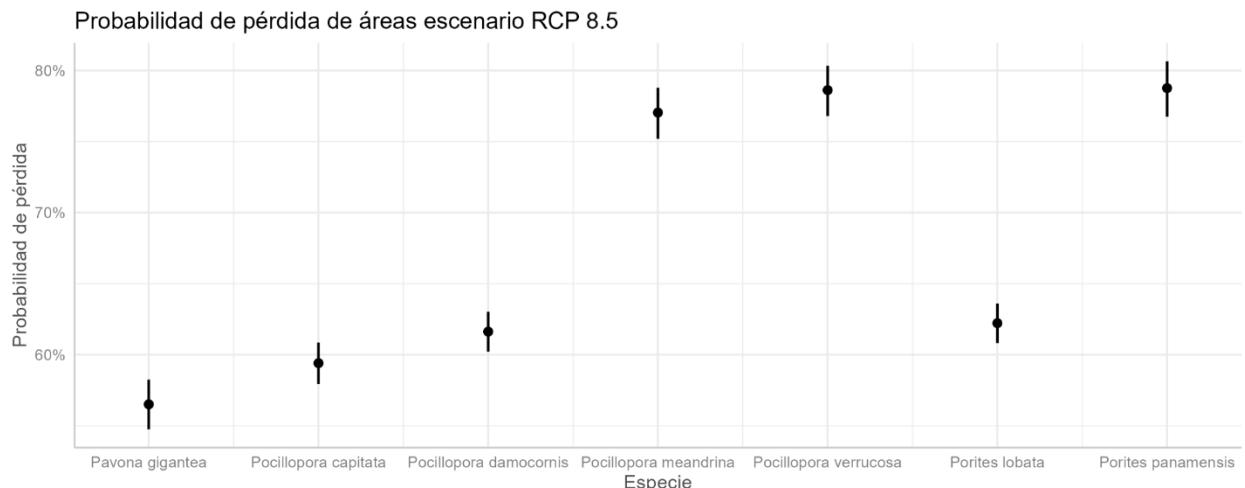


**Figura 24.** Comparación de la probabilidad de invadir nuevas áreas de distribución potencial por especie en el escenario climático RCP 2.6.

Por otro lado, bajo el escenario climático RCP 8.5, *Pavona gigantea* seguiría siendo la especie con la menor probabilidad de pérdida de hábitat, en tanto que, al igual que en el RCP 2.6 *Pocillopora meandrina* sería una de las especies más probables en enfrentar pérdida de hábitat. Sin embargo, a diferencia del escenario menos severo, en este escenario habría más especies con altas probabilidades de perder hábitat, como lo son *Pocillopora verrucosa* y *Porites panamensis* (ver cuadro 9 y figura 25).

**Cuadro 9.** Relación de valores para Áreas perdidas en escenario RCP 8.5

contraste	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora capitata</i>	-0.11896	0.0477	inf	-2.495	0.1609
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	-0.21172	0.0473	inf	-4.476	<0.0002
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.94848	0.0633	inf	-14.982	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-1.04005	0.0647	inf	-16.063	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.23704	0.0472	inf	-5.023	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites panamensis</i>	-1.04846	0.0697	inf	-15.053	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	-0.09276	0.0434	inf	-2.138	0.33
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.82952	0.0604	inf	-13.727	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.92109	0.0619	inf	-14.871	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.11808	0.0433	inf	-2.73	0.0908
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.9295	0.067	inf	-13.863	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.73676	0.0601	inf	-12.252	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.82833	0.0617	inf	-13.436	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.02533	0.0428	inf	-0.591	0.9971
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.83674	0.0668	inf	-12.529	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.09157	0.0746	inf	-1.227	0.8839
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites lobata</i>	0.71143	0.06	inf	11.849	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.09998	0.0789	inf	-1.267	0.8672
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites lobata</i>	0.803	0.0616	inf	13.044	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.00841	0.0801	inf	-0.105	1
<i>Porites lobata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.81141	0.0667	inf	-12.165	<.0001

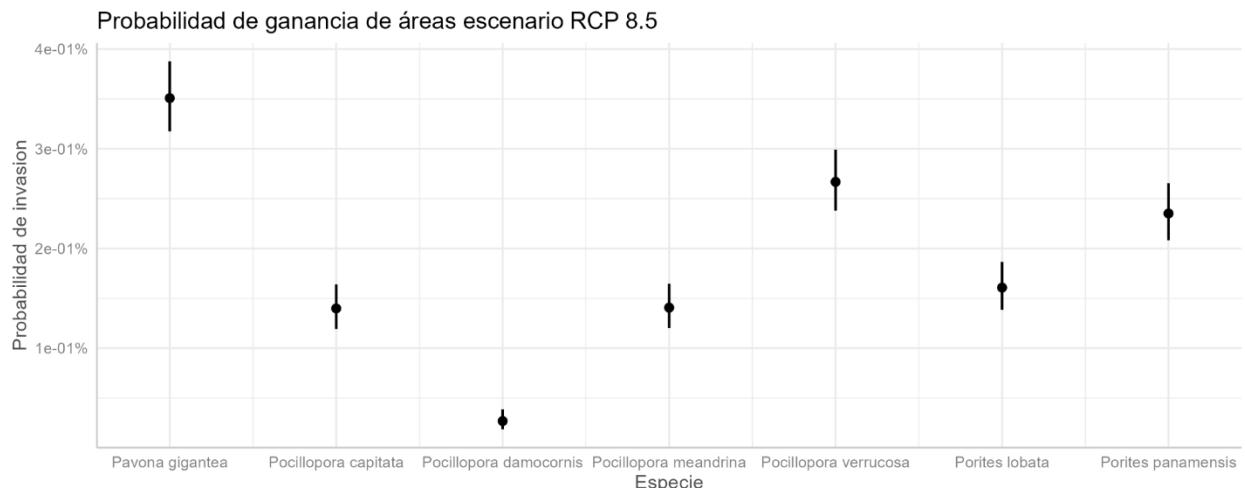


**Figura 25.** Comparación de hábitat perdido para las especies de corales en el escenario RCP 8.5.

Bajo este mismo escenario, se observa que las diferencias entre especies en cuanto a las probabilidades de invasión son similares a las que hubiera en el escenario RCP 2.6: la especie con la menor probabilidad de colonizar nuevas áreas es *Pocillopora damicornis* y *Pavona gigantea* sería también en este caso la especie con mayores probabilidades de invadir nuevas áreas (véase cuadro 10 y figura 26).

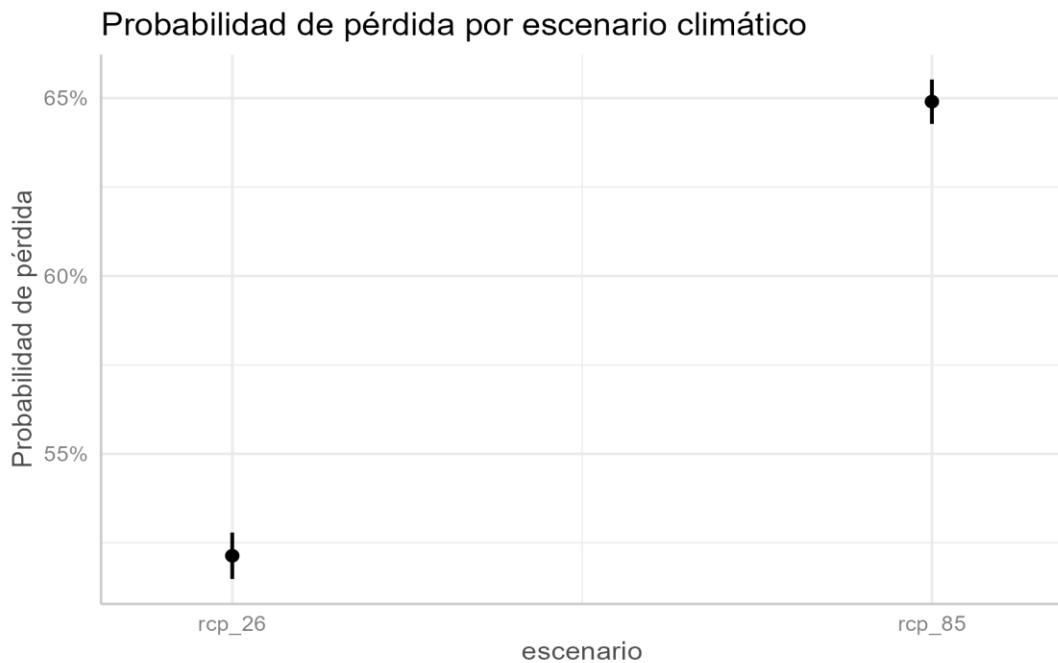
**Cuadro 10.** Relación de valores para Áreas invadidas en escenario RCP 8.5

contraste	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora capitata</i>	0.92153	0.0962	Inf	9.581	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	2.57028	0.193	Inf	13.349	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	0.9158	0.0953	Inf	13.349	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	0.27467	0.0777	Inf	3.537	0.0074
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites lobata</i>	0.78217	0.0917	Inf	8.529	<.0001
<i>Pavona gigantea</i> - <i>Porites panamensis</i>	0.40124	0.0805	Inf	4.986	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora damicornis</i>	1.64875	0.203	Inf	8.134	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-0.00573	0.114	Inf	-0.05	1
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.64686	0.1	Inf	-6.455	<.0001
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.13936	0.111	Inf	-1.25	0.8742
<i>Pocillopora capitata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.52029	0.102	Inf	-5.081	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora meandrina</i>	-1.65448	0.202	Inf	-8.179	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-2.29561	0.195	Inf	-11.797	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites lobata</i>	-1.78811	0.201	Inf	-8.914	<.0001
<i>Pocillopora damicornis</i> - <i>Porites panamensis</i>	-2.16904	0.196	Inf	-11.082	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Pocillopora verrucosa</i>	-0.64113	0.0994	Inf	-6.453	<.0001
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites lobata</i>	-0.13363	0.111	Inf	-1.207	0.8916
<i>Pocillopora meandrina</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.51456	0.102	Inf	-5.066	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites lobata</i>	0.5075	0.0959	Inf	5.291	<.0001
<i>Pocillopora verrucosa</i> - <i>Porites panamensis</i>	0.12657	0.0852	Inf	1.485	0.7541
<i>Porites lobata</i> - <i>Porites panamensis</i>	-0.38093	0.0982	Inf	-3.879	0.002



**Figura 26.** Comparación de nuevas áreas de distribución potencial invadidas por especie en el escenario climático RCP 8.5. *Pavona gigantea* es la especie con más probabilidades de obtener nuevas áreas de distribución en el futuro, en tanto que *Pocillopora damicornis* es la que menor probabilidad de ganar hábitat tiene.

Finalmente, cuando se comparó si la probabilidad de pérdida de áreas de distribución era diferente entre los escenarios climáticos, sin importar la especie que se modelara, se observó que el escenario 8.5 tiene significativamente mayor probabilidad rondando un promedio de 65%, en contraste con el escenario RCP 2.6 cuyo promedio de probabilidad es cercano al 52%, como se puede observar en la figura 27.



**Figura 27.** Comparación de probabilidad de pérdida de hábitat por escenario climático. En el escenario RCP 8.5, las especies enfrentarían una mayor probabilidad de pérdida de hábitat (65%) que en el RCP 2.6.

## VII. DISCUSIÓN

### Distribución potencial presente

De manera general, la distribución potencial obtenida para el presente se extiende a lo largo de todo el Pacífico Mexicano: en las costas de Baja California Norte y Sur, y desde El Alto Golfo en Sonora hasta el sur en Chiapas, así como también en las Islas Revillagigedo y las Islas Galápagos. Esto concuerda con los registros que existen en el Pacífico Central de México, entre los 15° y 22° norte, ya que de acuerdo al Atlas de Corales Pétreos (Reyes-Bonilla et al, 2005) y la plataforma GBIF, las especies se encuentran desde el Sur de las costas de Sinaloa, pasando por Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y hasta el centro de Oaxaca. De igual manera, el área de distribución potencial encontrada es congruente con los registros en el Mar de Cortés, entre los 22° y 30° Norte, que van desde el centro de las costas de Baja California Norte hasta el Sur de Baja California Sur (véase figura 1.3). En cuanto a las islas, tanto las Islas Galápagos como la Isla Revillagigedo cuentan con registros de todas las especies estudiadas, como lo muestra Reyes-Bonilla (2005) en su Atlas de Corales Pétreos del Pacífico, respaldando los resultados encontrados. Además, de manera general, los resultados para *Pocillopora damicornis* indican que es la especie con la distribución potencial más amplia en el presente, lo cual tiene sentido con los registros actuales, ya que es la especie con la mayor cantidad de registros.

Aunado a esto, las áreas de distribución potencial para las especies en el alto Golfo de California concuerdan con los resultados de Ulate-Naranjo (2016) para las especies *Pavona gigantea*, *Pocillopora damicornis*, *P capitata*, *P meandrina* y *Porites panamensis*, que tienen afinidad a ciertas regiones del Mar de Cortés. De igual manera, la distribución potencial de *Pocillopora damicornis* es congruente con la distribución obtenida por Stranges (2019), que también encontró área de distribución potencial en el Alto Golfo.

Sin embargo, los resultados muestran también áreas de distribución potencial de las especies (en el presente), en sitios donde no hay registros actualmente. Por ejemplo, las áreas de distribución potencial anteriormente mencionadas (en las costas de Baja California Norte y Baja California Sur) y en el Sur del Pacífico Mexicano (Chiapas y Este de Oaxaca), si bien coinciden con las áreas también obtenidas por Ulate-Naranjo (2016) y Stranges (2019), no cuentan con registros en la plataforma GBIF, a pesar de que estas áreas potenciales se observan en todas las especies. Esto puede deberse, por una parte, a la falta

de muestreo para el caso de Baja California Norte y Sur, siendo sus costas del Pacífico un lugar de difícil acceso por sus aguas abiertas.

Por otra parte, de acuerdo con Reyes-Bonilla (2003), de las comunidades coralinas más importantes del Pacífico, la más norteña es la Isla Carmen, que se encuentra en el Mar de Cortés a los 25° norte, y la más sureña es Huatulco, a los 15° norte, justo en donde ocurren los últimos registros de corales en el sur del área de estudio. Ahora bien, tomando en cuenta que los corales de grandes escalas (como las comunidades anteriormente mencionadas) tienden a formar sistemas cerrados con poca migración (Kool et al, 2010), se sugiere una posible falta de conectividad entre el Pacífico Central con el Pacífico Norte y el Pacífico Sur, que empobrece el flujo genético tanto hacia el Alto Golfo como hacia el Sur en las costas de Chiapas. Esto, aunado a que particularmente el Alto Golfo no se caracteriza por su riqueza en especies de corales, probablemente debido a su alta carga de sedimentos que dificulta el establecimiento de comunidades arrecifales (Reyes-Bonilla, 2003), podrían ser la principal razón por la cuál en estas áreas de distribución potencial no hay registros aún. De este modo, aunque existan las condiciones favorables para que las especies estudiadas habiten, en el presente no han migrado ni se han asentado por las razones explicadas previamente, sin embargo, tienen el potencial de hacerlo de ser necesario en algún momento dado.

### **Cambios de temperatura en el futuro**

Los resultados confirman un incremento marcado de la temperatura para el Pacífico Oriental bajo los escenarios de cambio climático. De acuerdo con el modelo obtenido, para el año 2050 en el escenario RCP 2.6 se proyecta un incremento de temperatura de 0.6 a 1.6 °C con respecto a la temperatura actual, en tanto que bajo el escenario climático RCP 8.5, el incremento de la temperatura iría de 1.06 a 1.9 °C. Si bien otros trabajos predicen valores diferentes de incremento de temperatura, los resultados son congruentes con estos. Por ejemplo, Sáenz y colaboradores (2010) predicen un incremento de temperatura promedio de 2.3° C para el 2060 para México y alrededores, es decir de 0.4°C a 0.7° C más que en nuestro modelo, lo cual hace sentido tomando en cuenta esto ocurriría 10 años después de nuestro estudio, y que la temperatura seguirá incrementando. Este aumento de temperatura puede tener consecuencias sobre las comunidades arrecifales de la zona de estudio, como más adelante se discute.

## **Cambios en distribución por el cambio climático**

De acuerdo con las proyecciones, para el año 2050, en ambos escenarios climáticos (RCP 2.6 y RCP 8.5), en todas las especies se observa una reducción de su área de distribución potencial con respecto al presente. Como se observa en los resultados, en el presente las especies se distribuyen a lo largo de todo el Pacífico en México, sin embargo, de acuerdo a las proyecciones, de manera general, para el 2050 las áreas de distribución potencial disminuyen, quedando zonas de hábitat potencial en Oaxaca, Jalisco, Sinaloa, Baja California Norte y Sur. Estos resultados concuerdan con las predicciones del IPCC (2023), que establece que la riqueza y área de distribución de corales declinaría en escenarios futuros de cambio climático.

Esto ocurre debido a que los corales viven solo dentro de ciertos límites ambientales, de 27° C a 30° C, por ejemplo (Gómez et al, 2015; Sheppard et al, 2018). De modo que, si ocurren cambios en la temperatura, con un incremento hasta los 33°C, como se prevé que ocurrirá en el Pacífico mexicano de acuerdo con los resultados (véase figuras 12 a 14), entonces se perderán en el área de extensión donde se pueden distribuir, a menos que las especies logren adaptarse y modificar sus límites de tolerancia a las nuevas condiciones ambientales.

## **Diferencias entre escenarios climáticos**

De acuerdo con los resultados, la pérdida de hábitat pronosticada se acentúa más en el RCP 8.5, ya que se pierde la distribución en prácticamente toda el área de estudio, excepto en las costas del Pacífico de Baja California Norte y Sur. En contraste en el escenario RCP 2.5 se mantienen zonas con distribución en las costas de Baja California Norte, Baja California Sur, Sinaloa, Jalisco, Oaxaca y una delgada línea de costa de menor amplitud a lo largo de toda el área de estudio.

Esto difiere con lo reportado por Stranges (2019) quien en su trabajo analiza los cambios en distribución del género *Pocillopora* en el Pacífico. De acuerdo con la autora, en el RCP 2.6 las especies mantienen su área de distribución sin variaciones, mientras que en el escenario RCP 8.5 habría ganancia de áreas para la mayoría de las especies

(excepto para *P. verrucosa*). Esta discrepancia en los resultados puede deberse a las diferentes variables utilizadas: para Stranges, con *Pocillopora*, la variable con mayor relevancia fue omega de aragonita, que favorece el mantenimiento y crecimiento de la estructura arrecifal, en tanto que en el presente estudio esta variable no figuró, al encontrarse variables con un índice de jackknife mayor. Además, en este trabajo no se está considerando la extrapolación de respuesta de las especies de coral al cambio de temperatura, lo cual puede explicar parcialmente los resultados. Otros estudios han advertido sobre los riesgos de considerar la extrapolación en las predicciones de distribución potencial (Owens et al, 2013). Por ello, los resultados encontrados en este estudio no asumen una adaptación al cambio climático, sino que evalúan el potencial de respuesta de los corales que tienen actualmente.

Otros estudios sobre modelaje de distribución potencial en corales muestran pérdida de hábitat potencial en el futuro, bajo escenarios de cambio climático, así como una diferencia entre el RCP 8.5 con respecto a los escenarios más optimistas. De Oliveira y colaboradores (2019), analiza la distribución potencial del coral constructor de arrecifes *Mussismilia harttii* en Brazil, en el futuro, para el año 2100, las predicciones modeladas arrojan que existe pérdida de áreas de hábitat potencial con respecto al hábitat potencial del presente, pronosticando una pérdida del 46% del área en el escenario RCP 4.5 y del 59% en el RCP 8.5. Además, las posibles áreas de distribución para el futuro se recorrerán hacia el Sur.

A su vez, estudios como los de Woesik (2018), Bleuel (2021) y Dao (2021), predicen una poco probable recuperación de las especies en el escenario RCP 8.5. Woesik (2018) modeló la tasa de recuperación de arrecifes de coral del Sur de Japón y el Este de Australia ante eventos de estrés térmico y predijo las respuestas de los corales del Indo-Pacífico a los ciclos de temperaturas para el año 2100. Dicho estudio encontró que las poblaciones podrán recuperarse de ocurrir el escenario RCP 4.5, se recuperarán o perderán en incrementos de temperatura moderados en el RCP 6.0, y en el escenario RCP 8.5 en el que el incremento de temperatura es más frecuente e intenso, una recuperación de los arrecifes es muy poco probable (Woesik et al, 2018). Bleuel (2021), por otra parte, modeló y proyectó las probabilidades de ocurrencia, cobertura y blanqueamiento de corales en el Sureste Atlántico bajo los escenarios

climáticos RCP, y encontró que en los RCP 2.6 y 6.0 es más probable que los corales se adapten a temperaturas más cálidas que en el RCP 8.5. De igual manera, Dao (2021) modeló las temperaturas de la región Cu Lao Cham de acuerdo con las emisiones establecidas en los RCP 4.5 y RCP 8.5, y proyecta que en ambos escenarios, el límite de temperatura que los corales pueden soportar se rebasará, pero, especialmente en el RCP 8.5 los eventos de estrés térmico serán más acentuados, de modo que en combinación con los eventos El niño resultarán en periodos de temperaturas extremas más altas, de los cuales es muy probable que los corales no se recuperen (Dao et al, 2021).

Todos estos estudios muestran una mayor pérdida de hábitat potencial o consecuencias más devastadoras para las especies de coral en el RCP 8.5 que, en escenarios más optimistas, como el RCP 2.6, lo cual es confirmado en este trabajo. El escenario RCP 8.5 implica la pérdida casi total de refugios en los cuáles los corales o las larvas puedan protegerse del estrés térmico. Esto tiene consecuencias sumamente negativas para la supervivencia de las especies en el área de estudio: la desaparición de áreas con las condiciones adecuadas para la supervivencia y reproducción de los corales, y blanqueamientos masivos. Con un incremento de temperatura de 1.06°C a 1.9°C, como ocurre en el RCP 8.5, de acuerdo a los resultados, se alcanzarían temperaturas de hasta 33°C, bajo las cuáles los corales se encontrarían en alto estrés térmico, que a su vez ocasionaría blanqueamientos, durante los cuales los corales no pueden obtener nutrientes, de modo que si los blanqueamientos persisten, los corales morirían, tal como lo explica Dao (2021), que establece que los eventos de estrés térmico serán más frecuentes e intensos en el RCP 8.6. De modo que el escenario RCP 8.6 implicaría una serie de consecuencias más grandes, ya que el estrés térmico puede interrumpir el proceso de reclutamiento de las especies de coral que componen el arrecife, mermando las poblaciones, lo que a su vez puede ocasionar que otras especies oportunistas los sustituyan, como las algas, ocasionando un cambio de fase que transforma completamente todo el ecosistema, como en los resultados de Romero-Torres (2020). Esto repercutiría en otras especies que dependen del arrecife, como peces, por ejemplo, ya que la riqueza del ensamble de peces disminuye después del cambio de fase, tal como lo explica Cruz (2015). Así, las poblaciones de corales más importantes del Pacífico mexicano al largo plazo están en riesgo.

## Pérdida y ganancia de áreas

Aunque de manera general se predice una gran pérdida de área potencial para todas las especies, especialmente en el escenario RCP 8.5, *Pocillopora meandrina* es la especie en la cual se observa la mayor pérdida de hábitat en ambos escenarios, seguida de *Pocillopora damicornis* y *Porites panamensis* en el RCP 2.6, y *Pocillopora verrucosa* y *Porites panamensis* en el RCP 8.5. Asimismo, no se pronostica ganancia de áreas de distribución para el futuro, sino más bien zonas remanentes, donde aún no hay registros, pero en las cuales las especies pueden distribuirse potencialmente, que abarcan las costas del Pacífico de Baja California Norte y Sur, y una delgada línea de costa en Sonora y Sinaloa (para el RCP 2.6 y 8.5) y el este de Oaxaca (RCP 2.6). Sin embargo, los refugios más importantes de las especies vendrían siendo las costas de Jalisco, Oaxaca y Sinaloa en ambos escenarios.

Estos resultados muestran un contraste con el trabajo previo de Stranges (2019), para quien las especies sí extienden sus áreas de distribución en el futuro, especialmente *Pocillopora meandrina*, que a diferencia del presente trabajo no sólo no pierde hábitat en el futuro, sino que se expande a Baja California Norte y Baja California Sur (costa del Pacífico) y a las Galápagos. En este sentido, para Stranges, esta área no representa una zona de distribución potencial en el presente, sino hasta el 2050, a diferencia del presente estudio. Esta discrepancia puede deberse a la diferencia de tiempo en que fue elaborado el estudio, es decir, en 2019 (cuando Stranges realizó su trabajo), posiblemente los valores de las variables ambientales que utilizó (disponibles en ese momento), al ser modelados no mostraron una probable distribución en dichas costas, sin embargo, en este nueva década, ya que los valores de las variables ambientales disponibles en Obis han cambiado con respecto a la década anterior, 6 años después en la actualidad ya existen las condiciones necesarias en estas costas para que haya una distribución potencial de las especies. Esto último hace sentido si tomamos en cuenta que Stranges sí proyectaba una distribución potencial en estas áreas en el futuro, que vendría siendo el presente ahora, lo cual pudo de igual manera haberse acelerado debido al rápido incremento de la temperatura global.

Otras especies que también extenderían su distribución, de acuerdo con Stranges serían *Pocillopora capitata* y *Pocillopora Damicornis*, que encontrarían nuevo hábitat potencial en las Islas Galápagos y en las costas de Ecuador. En este caso,

sucede lo mismo que con la especie *Pocillopora meandrina* ya que si bien la autora no encontró distribución potencial presente en aquel entonces (año 2019), sino solo en el futuro, nuestros resultados ya muestran que la distribución potencial presente de dichas especies ya abarca estas zonas (Galápagos y Ecuador), por lo cual, siguiendo la explicación previa, lo que encontró previamente Stranges es congruente con los resultados actuales de este estudio.

Por otro lado, en el mismo trabajo, Stranges (2019) pronostica también la pérdida del 55.1% del área de distribución potencial para *Pocillopora verrucosa* en el RCP 8.5, perdiéndose las costas de Sinaloa, Baja California Sur y la playa que corresponde al límite entre Guerrero y Oaxaca. Esto es también mostrado en nuestros resultados, excepto por la costa sur del Pacífico en Baja California Sur, que en el RCP 8.5 logra conservarse. Asimismo, otra zona que de acuerdo con Stranges lograría conservar esta especie es en Nayarit y Jalisco, sin embargo, nuestros resultados discrepan con este pronóstico ya que *P. verrucosa* perdería toda su área en este escenario, excepto por la costa de Baja California Sur ya mencionada. En este sentido, esta discrepancia puede deberse a la diferencia en las variables utilizadas y los valores de estas, ya que como se mencionó anteriormente, estos valores corresponden a la década anterior, por lo que con valores más actualizados es posible exista una mayor pérdida de áreas, como se describió en este estudio.

### Diferencias de susceptibilidad entre especies

Las especies más vulnerables al incremento de temperatura son *Pocillopora meandrina*, *Pocillopora verrucosa*, *Pocillopora damicornis* y *Porites panamensis*, ya que son las que mayor porcentaje de pérdida de hábitat enfrentan con respecto al presente (véase cuadro 4). Dentro de estas, *Pocillopora meandrina* es la especie más vulnerable al cambio climático en el Pacífico mexicano, ya que en ambos casos (escenario RCP 2.6 y RCP 8.5) es la especie con el porcentaje de probabilidad de pérdida de distribución potencial más alto (véase figuras 23 a 27). Lo anterior puede deberse en parte a la biología misma de cada especie, ya que cada una tiene diferentes características que le permiten adaptarse y sobrevivir, como su capacidad de dispersión, su crecimiento, su capacidad de migrar, sus requerimientos de luz o de moverse a profundidades, como lo explica Bairos-Novak (2021). Sin embargo, la mayor parte de los trabajos que evalúan

la respuesta de los corales al cambio climático se centra sobre los efectos a nivel de comunidad coralina, por lo que poco se sabe sobre la respuesta de las especies. Por ello, este trabajo representa un avance el avance de la evaluación de la susceptibilidad de las especies al cambio climático, ya que como lo describe Vié & Hilton-Taylor (2009) en el análisis de la Lista Roja, no hay muchos estudios del impacto del cambio climático en corales a nivel especies, sino más bien a nivel población.

Por otra parte, otro factor que puede explicar por qué hay una gran diferencia de probabilidad de pérdida de hábitat entre especies es la distribución actual de estas especies, ya que *P. panamensis* y *P. verrucosa* son unas de las especies que contaban con menor número de registros, y *P. meandrina* y *P. damicornis* resultaron con la menor cantidad de registros después de la depuración; así, al ser estas cuatro las especies con menor rango de distribución en el presente, esto puede ser un factor que contribuya a que sean más vulnerables y tengan mayor probabilidad de pérdida de hábitat en el futuro, en comparación con el resto de las especies, tal como lo expresa Kim y colaboradores (2023): las especies con rango de distribución restringida tienen limitadas respuestas adaptativas y migratorias al cambio climático. Así, la diferencia de susceptibilidad de las especies de coral al cambio climático se debe a que cada especie tiene un nicho ecológico diferente. No obstante, es necesario realizar más investigación para identificar la respuesta puntual de las especies al cambio en condiciones ambientales, con aproximaciones que incluyan la manipulación experimental y los modelos de nicho ecológico.

## VIII. CONCLUSIONES

Los modelos de distribución potencial tuvieron buen desempeño para estimar las áreas de distribución para tiempo presente. La distribución potencial actual de las especies de coral constructoras de arrecifes *Pavona Gigantea*, *Pocillopora capitata*, *P. damicornis*, *P meandrina*, *P verrucosa*, *Porites lobata* y *Porites panamensis*, se extiende a lo largo de todo el Pacífico desde el alto Golfo hasta Chiapas, e incluye las costas del Mar de Cortés, siendo *Pocillopora damicornis* la especie más ampliamente distribuida. Aunque las costas del Pacífico de Baja California Norte, Baja California Sur, Chiapas y al Este de Oaxaca no cuentan con registros de ocurrencia en la actualidad, sí tienen las condiciones ambientales para que habiten y se desarrollen. Las principales variables ambientales que influyen en esta distribución potencial son Hierro, Coeficiente de atenuación y Nitratos.

En el futuro, todas las especies de coral logran mantener áreas de distribución a pesar de los cambios ambientales, sin embargo, estas áreas se ven reducidas en ambos escenarios climáticos utilizados. La amplitud de la línea de costa disminuye a lo largo de todo el Pacífico mexicano y las costas de Baja California Norte, Baja California Sur, Jalisco, Oaxaca y Sinaloa serán importantes refugios de albergue con las condiciones para que las especies sobrevivan ya que son las zonas que más logran preservarse.

En cualquier escenario climático la temperatura global incrementará para el año 2050, pero este aumento será mayor si no se controlan las emisiones de GEI. El incremento será de 0.6 a 1.6 °C si ocurre el RCP 2.6, o bien, de 1.06 a 1.9 °C si ocurre el RCP 8.5.

En el 2050, ninguna especie se extiende a nuevas áreas de distribución, únicamente pierden hábitat tanto en el RCP 2.6 como en el RCP 8.5 con respecto al presente. La pérdida de distribución potencial es más grande en el RCP 8.5 que en el RCP 2.6 para todas las especies. Se identificó que existe 50% de probabilidad de que en el RCP 2.6 las especies pierdan del 40% al 70% de su área de distribución y 65% de probabilidad de que en el RCP 8.5 las especies pierdan del 50% al 80% de su área.

*Pocillopora meandrina* será la especie más afectada por el incremento de temperatura,

y la que más área de distribución potencial perderá en el futuro. En cualquiera de los escenarios: enfrenta ~70% de probabilidad de perder el 57.7% de su área en el RCP 2.6 y ~80% de probabilidad de perder el 71.1% de su área en el RCP 8.5.

En el futuro, en el mejor escenario climático (RCP 2.6) se lograría preservar mejor el hábitat de los corales para su supervivencia, sin embargo, en caso de no lograr controlar las emisiones de GEI y dado el escenario RCP 8.5, nos enfrentaremos a una alarmante pérdida de hábitat para los corales. Esto puede afectar negativamente a la economía de las poblaciones costeras y desatar una serie de consecuencias ambientales graves para los asentamientos en las costas, por ello, es de vital importancia impulsar el desarrollo de políticas que realicen las medidas de conservación pertinentes.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson-King, K.D., & C. Wayman, S. Stephenson. 2023. Branching coral growth and visual health during bleaching and recovery on the central Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 42: 1113–1129.
- Auscavitch S.R., & J. J. Lunden, A. Barkman, A. M, Quattrini, A. W. J. Demopoulos, E. E. Cordes. 2020. Distribution of deep-water scleractinian and stylasterid corals across abiotic environmental gradients on three seamounts in the Anegada Passage. *PeerJ* 8:e9523.
- Baird, A. H., & R. Bhagooli, P. J. Ralph, S. Takahashi. 2009. Coral bleaching: the role of the host. *Trends in Ecology & Evolution*, 24:16–20.
- Bairos-Novak, K. R., & Hoogenboom, M. O., van Oppen, M. J. H., & Connolly, S. R. 2021. Coral adaptation to climate change: Meta-analysis reveals high heritability across multiple traits. *Global Change Biology*, 27: 5694–5710.
- Baker, E. & K. Puglise, P. Harris. 2016. Mesophotic coral ecosystems: A lifeboat for coral reefs?. The United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 98.
- Barve, N., & V. Barve, A. Jiménez-Valverde, A. Lira-Noriega, S. P. Maher, A. T. Peterson, F. Villalobos. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological modelling*, 222:1810-1819.
- Bellard, C., & C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller, F. Courchamp. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15: 365-377.
- Bleuel, J., & M. G. Pennino, G. O. Longo. 2021. Coral distribution and bleaching vulnerability areas in Southwestern Atlantic under ocean warming. *Sci Rep* 11: 1-12.

Borneman, E. 2001. Aquarium corals: selection, husbandry and natural history (1ra ed). Microcosm Limited.

Bryan, T. L., & A. Metaxas. 2006. Distribution of deep-water corals along the North American continental margins: Relationships with environmental factors, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 53:1865-1879.

Calixto, R. 2017. Uso de modelos de nicho para estimar la distribución de peces dulceacuícolas del sur de México (tesis de maestría).

Callery, S. 2023. Los efectos del cambio climático. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/efectos/>. Recuperado el 15 de enero de 2025

Camp, E. F., & V. Schoepf, P.J. Mumby, L. A. Hardtke, R. Rodolfo-Metalpa, D. J. Smith, D. J. Suggett. 2018. The future of coral reefs subject to rapid climate change: lessons from natural extreme environments. Frontiers in Marine Science, 5: 1-21.

César, H., & L. Burke, L. Pet-Soede. 2003. The economics of worldwide coral reef degradation. (Technical Report). Cesar Environmental Economics Consulting.

Choque, M. P. 2021. "Cambio climático y desarrollo sostenible." Revista Latinoamericana Ogmios 1.1: 82-90.

Daly, M., & D. G. Fautin, V. A. Cappola. 2003. Systematics of the hexacorallia (Cnidaria: Anthozoa). Zoological Journal of the Linnean Society, 139: 419-437.

Dao, H. N., and H. T. Vu, S. Kay, & S. Sailley. 2021. Impact of seawater temperature on coral reefs in the context of climate change. a case study of Cu Lao Cham–Hoi an biosphere

reserve. *Frontiers in Marine Science*, 8: 1-10.

DeCarlo, T. M., & L. [Gajdzik](#), J. [Ellis](#), D. [Coker](#), M. Roberts, N. [Hammerman](#), J. [Pandolfi](#), A. Monroe, & M. [Berumen](#). 2020. Nutrient-supplying ocean currents modulate coral bleaching susceptibility. *Sci*, 6.

De Oliveira U. D. R., and P. B. Gomes, R. T. Silva-Cordeiro, G. V. de Lima, C. D. Pérez CD. 2019. Modeling impacts of climate change on the potential habitat of an endangered Brazilian endemic coral: Discussion about deep sea refugia. *PLoS ONE* 14(5): e0211171.

Dorschel, B., & D. Hebbeln, A. Fouber, M. White, A.J. Wheeler. 2007. Hydrodynamics and cold-water coral facies distribution related to recent sedimentary processes at Galway Mound west of Ireland. *Marine Geology*, 244: 184-195.

Elith, J., & S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee, C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17: 43-57.

Espinosa, H. 2004. El Pacífico mexicano. *Revista Ciencias*, 76: 14-21.

GEBCO. 2024. Grid (doi:10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c). Recuperado de [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)

Glynn, P. W., & J. J. Alvarado, S. Banks, J. Cortés, J. S. Feingold, C. Jiménez, F. A. Zapata. 2016. Eastern Pacific coral reef provinces, coral community structure and composition: an overview. Springer, 8: 107-176.

Glynn, P. W. and G. E. L. Morales. 1997. Arrecifes coralinos de Huatulco, Occidente de México: desarrollo de arrecifes en surgencia del Golfo de Tehuantepec. *Revista de Biología Tropical*. 8: 1033-1047.

Glynn, P. W., and P. D. Manzello, I. C. Enochs (eds). 2017. Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment. Springer. 8: 101-114.

Gómez, C.E., & V. J. Paul, R. Ritson-Williams. 2015. Responses of the tropical gorgonian coral *Eunicea fusca* to ocean acidification conditions. *Coral Reefs*: 2015.

Hill, T. S., & M. O. Hoogenboom. 2022. The indirect effects of ocean acidification on corals and coral communities. *Coral Reefs* 41.6: 1557-1583.

Hussain, M., & A. R. Butt, F. Uzma, R. Ahmed, S. Irshad, A. Rehman, B. Yousaf. 2020. A comprehensive review of climate change impacts, adaptation, and mitigation on environmental and natural calamities in Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1-20.

IPCC. 2023. Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

IPCC. 2019. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].

Juárez, D. 2021. Principales amenazas de los arrecifes de coral. *Lum.* 2: 30-38.

Junior, C. 2013. Modelagem de bioinvasão do coral-sol (*Tubastraea coccinea* e *T. tagusensis*): mecanismos da ocupação e dispersão e identificação de sua potencial distribuição geográfica.

Kim, S. W., & B. Sommer, M. Beger, M.J. Pandolfi, J. M. 2023. Regional and global climate risks for reef corals: Incorporating species-specific vulnerability and exposure to climate hazards. *Global Change Biology*, 29: 4140–4151

Kool, J. T., & C. B. Paris, S. Andréfouët, R. K. Cowen. 2010. Complex migration and the development of genetic structure in subdivided populations: an example from Caribbean coral reef ecosystems. *Ecography*, 33: 597-606.

Lazcano-Pérez, J. 2020. Anémonas, corales y medusas: los cnidarios y su importancia médica. *Revista digital universitaria*, 21: 1.10.

Liu, Gang, & A. E. Strong, W, Skirving. 2003. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 Barrier Reef coral bleaching." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 84, 15: 137-141.

López-Díaz F., & Y. S. Nava-Assad, M. Rojas-Barajas, D. I. González-Terrazas. 2022. Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). pp 65.

López-Pérez, R. A., & L. E. Calderón-Aguilera, H. Reyes-Bonilla, J. D. Carriquiry, P. Medina-Rosas, A. L. Cupul-Magaña, B. M. Luna-Salguero. 2012. Comunidades coralinas y arrecifes de Guerrero, Pacífico Sur Mexicano. *Ecología marina*, 33: 407-416.

Martínez-Castillo, V., & A. P. Rodríguez-Troncoso, A. B. Mayfield, F. A. Rodríguez-Zaragoza, A. L. Cupul-Magaña. 2022. Coral recovery in the central Mexican pacific 20 years after the 1997–1998 El Niño Event. In *Oceans*, Vol. 3: 48-59.

Martínez-Castillo, V., & A. P. Rodríguez-Troncoso, J. D. Santiago-Valentín, A. L. Cupul-Magaña, A. L. 2020. The influence of urban pressures on coral physiology on marginal coral

reefs of the Mexican Pacific. *Coral Reefs*, 39, 625-637.

McFadden, C. S., & S. C. France, J. A. Sánchez, P. Alderslade. 2006. A molecular phylogenetic analysis of the Octocorallia (Cnidaria: Anthozoa) based on mitochondrial protein-coding sequences, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 41: 513-527.

Medellín-Maldonado, F., & R. A. Cabral-Tena, A. López-Pérez, L. E. Calderón-Aguilera, C. O. Norzagaray-López, C. Chapa-Balcorta, R. C. Zepeta-Vilchis, C. Meinshausen, M., & S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J. F. Lamarque, D. P. P. van Vuuren. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109: 213–241.

Owens, H. L., & L. P. Campbell, L. L. Dornak, E. E. Saupe, N. Barve, J. Soberón, K. Ingenloff, A. Lira-Noriega, C. M. Hensz, C. E. Myers, A. T. Peterson. 2013. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas, *Ecological Modelling*, 263:10-18.

Paricahua-Choque, M. (2021). Cambio climático y desarrollo sostenible. *Revista Latinoamericana Ogmios*, 1: 82–90.

Patrón, K. 2008. Apreciación del valor de la conservación de la biodiversidad: el caso de los arrecifes coralinos de Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero [Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Norte].

Pérez, R. A. L. & L. M. H. Ballesteros. 2004. Estructura y dinámica de comunidades coralinas en el área de Huatulco, occidente de México. *Boletín de Ciencias Marinas*, 75: 453-472.

Phillips, S. J., & P. Robert-Anderson, R. E. Schapire, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.

R Core Team (2024). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org>>.

Reyes-Bonilla, H. R., & A. L. Pérez. 1998. Biogeografía de los corales pétreos (Scleractinia) del Pacífico de México. *Ciencias Marinas*, 24: 211-224.

Reyes-Bonilla, H., & M. Martínez-Torres, S. M. Melo-Merino, D. Petatán-Ramírez. 2013. First record of an azooxanthellate reef-building coral (Scleractinia) at Sinaloa, Mexico (Eastern Gulf of California). *CICIMAR Oceánides*, 28: 61-66.

Reyes-Bonilla, H. & L. Calderon-Aguilera, G. Cruz-Piñón, P. Medina-Rosas, R. A. Pérez, M. Herrero, G. Leyte-Morales, A. Cupul-Magaña, J. Carriquiry. 2005. *Atlas de Corales Pétreos (Anthozoa: Scleractinia) del Pacífico Mexicano* (1ra ed).

Reyes-Bonilla, H. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. *Latin American Coral Reefs*, 331–349.

Robles-Zavala, E. 2008. Estudio del Análisis Social y Económico de los Servicios Ambientales del Sistema Arrecifal Coralino del Parque Nacional Huatulco.

Robles-Zavala, E., & A. G. C. Reynoso. 2018. The recreational value of coral reefs in the Mexican Pacific. *Ocean & Coastal Management*, 157: 1-8.

Rodríguez-Camino, E., & J. R. Picatoste-Ruggeroni, F. Heras-Hernández. 2014. Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Revista Tiempo Y Clima*, 5(43).

Rodríguez-Salcié, R., & A. Valcárcel-Abud, Y. P. Bello De Lillo, D. Y. Evangelista-Pérez, E. Pérez, D. B. Báez-Taveras, J. Matos-Mercedes, J. 2022. Importancia de los viveros de coral

y su impacto socioeconómico. 68: 78-91.

Romero-Torres, M., & Acosta, A., Palacio-Castro, A. M., Treml, E. A., Zapata, F. A., Paz-García, D. A., & Porter, J. W. 2020. Coral reef resilience to thermal stress in the Eastern Tropical Pacific. *Global change biology*, 26: 3880-3890.

Sheppard, C., & S. Davy, G. Pilling, N. Graham, N. 2018. *The biology of coral reefs*. Oxford University Press (2da edición).

Spalding, M. D. & H. E. Fox, G. R. Allen, N. Davidson, Z. A. Ferdaña, M. Finlayson, B. S. Halpern, M. A. Jorge, A. Lombana, S. A. Lourie, K. D. Martin, E. McManus, J. Molnar, C. A. Recchia, J. Robertson. 2007. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas, *BioScience*, Volume 57: 573–583.

Stranges, S., & A. P. Cuervo-Robayo, E. Martínez-Meyer, H. N. Morzaria-Luna, Hem Nalini, H. Reyes-Bonilla. 2019. Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático de corales del género *Pocillopora* (Anthozoa: Scleractinia) en el Pacífico oriental tropical. *Revista mexicana de biodiversidad*, 90, e902696. QGIS.org (2020).

Sistema de Información Geográfica QGIS. 2020. Proyecto de la Fundación Geoespacial de Código Abierto. <http://qgis.org>

Sundahl H., & P. Buhl-Mortensen, L. Buhl-Mortensen. 2020. Distribution and Suitable Habitat of the Cold-Water Corals *Lophelia pertusa*, *Paragorgia arborea*, and *Primnoa resedaeformis* on the Norwegian Continental Shelf. *Front. Mar. Sci.* 7:213.

Templado, J., & J. Guallart, M. Capa, A. Luque. 2009. 1170 Arrecifes: Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España, Madrid (1ra edición). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (España).

Tetetla, E. 2012. Diversidad vegetal de especies raras y su relación con la estructura del paisaje a múltiples escalas espaciales en las selvas de la Península de Yucatán. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica de Yucatán. México.

Thomas-Goreau, J. F., & L. Raymond-Hayes. 2023 Record marine heat waves: coral reef bleaching HotSpot maps reveal global sea surface temperature extremes, coral mortality, and ocean circulation changes, Oxford Open Climate Change, 4.

Torruco-Gómez, D., & A. Dali. 2012. Estado actual de los corales. Biodiversidad, 1: 204-208.

Trujillo-Ortegón, A. M. 2020. *Ostreobium* en el coral de profundidad *Thalamophyllia riisei*.

Ulate-Naranjo, K. 2016. Modelación de nicho ecológico de especies representativas de la comunidad de macroinvertebrados de arrecifes rocosos del Golfo de California.

UNEP. 2017. Coral Bleaching Futures - Downscaled projections of bleaching conditions for the world's coral reefs, implications of climate policy and management responses. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya United States Congress House Committee on Science and Technology (2007). The State of Climate Change Science 2007: Hearings Before the Committee on Science and Technology, House of Representatives, One Hundred Tenth Congress, First Session, February 8, April 17, and May 15, 2007, 4: 159.

van Woesik, R., & T. Shlesinger, A. G. Grottoli, R. J. Toonen, R. Vega-Thurber, M. Warner, M. A. Hulver, L. Chapron, R. H. McLachlan, R. Albright, E. Crandall, T. M. DeCarlo, M. K. Donovan, J. Eirin-Lopez, H. B. Harrison, S. Heron, D. Huang, A. Humanes, T. Krueger, J. 2022. Coral-bleaching responses to climate change across biological scales. Global Change Biology, 28: 4229–4250.

v1.0 Tyberghein L., and H. Verbruggen, K. Pauly, C. Troupin, F. Mineur, O. De Clerck. 2012. Bio-ORACLE: A global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 272–281.

v3.0 Assis, J., and S. J. Fernández-Bejarano, V. W. Salazar, L. Schepers, L. Gouvêa, E. Fragkopoulou, F. Leclercq, B. Vanhoorne, L. Tyberghein, E. A. Serrão, H. Verbruggen, O. De Clerck. 2024. Bio-ORACLE v3.0. Pushing marine data layers to the CMIP6 Earth system models of climate change research. *Global Ecology and Biogeography*.

Vié, J.-C., & C. Hilton-Taylor, S. N. Stuart, S.N (eds.). 2009. *Wildlife in a Changing World – An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Gland, Switzerland: IUCN. 180 pp.

Woesik, R. V., & S. Köksal, A. Ünal. 2018. Predicting coral dynamics through climate change. *Sci Rep* 8: 1-10.

