

Informe Consultoría de Vulnerabilidad para la Actualización del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad.

Modelos de distribución de especies en Chile: proyecciones futuras bajo escenarios de riesgo climático

Agosto 2023

Micaela Sophie Poutay Broussaingaray

Patricio Plissock



Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura



1. Resumen Ejecutivo (máximo una plana)

Las especies están respondiendo de distinta forma al cambio climático actual, dependiendo de sus características de historias de vida, fisiológicas, evolutivas, entre otras. Se ha reconocido que esta respuesta es especie-específica, donde incluso especies que pueden reconocerse como muy cercanas en términos de su historia evolutiva y su rango de distribución, podrían estar respondiendo de forma diferente frente a los distintos impactos del cambio climático. Se han reconocido dos respuestas generales de las especies, independiente de sus características generales y lugar del planeta en que se encuentran. Estas respuestas son el movimiento hacia los polos y el movimiento hacia zonas de mayor altitud, ambos movimientos responden a la búsqueda de las especies de condiciones climáticas más frías y húmedas (mayor precipitación).

En el caso de Chile, la respuesta de las especies al cambio climático está definida además por la particular posición geográfica del país que posee una extensa distribución latitudinal, abarcando casi 40 grados de latitud (18° Lat. S - 56° Lat. S) y una restringida distribución longitudinal, definida por la barrera natural que es la Cordillera de los Andes. Por lo tanto, dadas las singulares características del país, es de gran importancia identificar las respuestas de las especies al cambio climático, ya que podrían revelarse importantes impactos que podrían significar en el mediano y largo plazo el aumento en el riesgo de extinción y problemas concretos de conservación y protección.

En este análisis se aplica una metodología de modelos de distribución especies (MDE) que mediante el uso de las ocurrencias georreferenciadas de las especies y su relación con las variables ambientales (climáticas), es posible identificar las zonas de adecuación climática de las especies en la actualidad y proyectarlas bajo escenarios futuros. Este análisis se realizó con una versión actualizada de la base de datos global de biodiversidad (GBIF) para Chile, la cual es la principal base de datos abierta del mundo. Se seleccionaron los datos de flora, fauna y funga terrestre de Chile continental y se relacionaron a un set de variables climáticas en dos escenarios de cambio climático. Se seleccionaron dos escenarios extremos para poder contrastar la respuesta futura de las especies (SSP1-2.6 2030-2050 Y SSP5-8.5 270-2100).

Los resultados dan cuenta de los posibles cambios en los espacios climáticos futuros de la biodiversidad en Chile, identificándose zonas futuras en que disminuirá fuertemente la adecuación climática actual de las especies, como la zona central en el caso de las plantas, zona andina central para la fauna y zona centro-sur en el caso de la funga. En todos los casos, en el escenario más pesimista estas zonas se amplían, acentuándose los cambios proyectados. Estos resultados indican la probabilidad de un recambio de las especies que conforman los ecosistemas actuales en las zonas indicadas, aumentando además el riesgo de extinción de las especies que tienen menor rango de distribución y especialmente en aquellas que este rango se encuentra en las zonas indicadas anteriormente.

2. Introducción

Según el último informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2022), el cambio climático de origen antrópico trae consigo un aumento en los eventos climáticos extremos como olas de calor, sequías, intensas precipitaciones y ciclones tropicales, pero se define principalmente por un aumento generalizado de las temperaturas a nivel mundial. En la última década, la temperatura superficial global ha aumentado 1,1°C sobre el promedio preindustrial (1850-1900), debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂). De hecho, se espera que de aquí al 2100, la temperatura siga aumentando hasta alcanzar un alza de 4,4°C, considerando un escenario pesimista.

El aumento de las temperaturas, y el cambio climático en general, están afectando todos los niveles de organización de la biodiversidad, con impactos sobre la fenología, fisiología y rangos de distribución de ciertas especies (Parmesan 2006). De hecho, es posible que algunos organismos ya no estén adaptados al nuevo conjunto de condiciones climáticas de su hábitat original, lo que provoca que queden fuera de su nicho climático e induce mecanismos de respuesta asociados a la búsqueda de nuevos hábitats climáticamente más adecuados (Bellard et al. 2012). Esto se explica en base a la correlación que existe entre el clima y el espacio geográfico, haciendo que el clima sea un factor determinante del nicho o distribución geográfica de las especies (Lenoir & Svenning 2014). En este sentido, los estudios indican que en general, dado el cambio climático actual, las especies están migrando hacia mayores latitudes y altitudes, al mismo tiempo que se ven enfrentadas a procesos de expansión, contracción y fragmentación de rangos de distribución (Pacifi et al. 2017, Chen et al. 2011, Parmesan & Yohe 2003).

Chile está catalogado como un país altamente vulnerable al cambio climático, pues cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad definidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Entre estos criterios está la presencia de zonas expuestas a la sequía y a la desertificación, zonas con cobertura forestal expuestas al deterioro y, zonas de ecosistemas frágiles (CMNUCC 2022, COP25 2021).

Los Modelos de Distribución de Especies (MDEs) se utilizan ampliamente para modelar en forma espacial la distribución potencial de especies o conjuntos de especies, al asociar observaciones georreferenciadas de una variable biótica como lo es la presencia o abundancia de las especies, a múltiples predictores ambientales (Elith & Franklin 2013). Los modelos generados a partir de observaciones pueden aplicarse a mapas de predicción espacial, donde se expone la probabilidad de presencia de las especies o su idoneidad de hábitat tanto para escenarios actuales como futuros, permitiendo; por ejemplo, generar estudios sobre el impacto del cambio climático en la distribución de la biota.

Este tipo de predicciones es relevante para la toma de decisiones y la creación de estrategias de mitigación de los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad (Bellard 2012, Pereira 2010, Parmesan 2011). Además, nos permite generar antecedentes para la justificación de nuevos planes de conservación y manejo de las especies que actualmente o en un futuro podrían estar bajo amenaza. Por lo mismo, el objetivo general de este trabajo es modelar la distribución actual de todas las especies de flora, fauna y funga nativas y exóticas presentes en Chile continental, y generar proyecciones bajo dos escenarios distintos de cambio climático a partir de puntos de presencia georreferenciados y variables bioclimáticas.

3. Metodología y área de estudio

3.1. *Área de estudio.*

El área de estudio se delimitó a Chile continental, entre los 17 y 56° de Latitud Sur, excluyendo el territorio antártico y las islas oceánicas.

3.2. *Selección y manipulación de datos de flora y fauna*

Desde el Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF, por sus siglas en inglés), se descargaron bases de datos que contuvieran todas las ocurrencias de especies presentes dentro de los reinos Plantae, Animalia y Fungi, en formato CSV (GBIF.org 2023). Para esto se aplicaron los siguientes filtros previos a la descarga: base del registro como observación humana, estado del registro biológico como presente en Chile e inclusión de coordenadas.

Los datos descargados se procesaron en RStudio (<https://www.rproject.org/>) para eliminar las ocurrencias anteriores a 1950, eliminar aquellas especies que tuvieran menos de 10 registros y eliminar cualquier registro duplicado. Luego, se generaron nuevas tablas de registros de especies divididas por clase, que contuvieran únicamente el nombre de la especie, asociado a un par de coordenadas x e y (longitud y latitud). La base de datos de Animalia se dividió en las clases Amphibia, Arachnida e Insecta, Aves, Mammalia y Squamata, Plantae se dividió en las clases Liliopsida y Magnoliopsida, y, para Fungi se mantuvo la estructura original de la base, todo esto con tal de facilitar la manipulación de los datos.

Dado que el área de estudio se acotó a Chile continental, se ingresaron los registros de todas las especies a ArcMap 10.8.1 (www.esri.com) y se realizó un *Clip* acorde a esta área con el fin de eliminar aquellos registros que quedaran fuera del polígono. Se extrajeron las nuevas bases de datos y se volvió a aplicar el filtro en RStudio para eliminar aquellas especies que luego del *Clip*, tuvieran menos de 10 registros. Finalmente, se escribieron y se guardaron las nuevas bases de datos divididas por clase en formato CSV.

3.3. *Modelos de distribución de especies*

El algoritmo de MaxEnt permite la creación de modelos de distribución de especies siguiendo el principio de máxima entropía y genera una estimación de la probabilidad de distribución de una especie a partir de datos de muestreo y variables ambientales (Phillips et al. 2006). En este caso, se utilizaron los registros de ocurrencia previamente filtrados para un total de 1211 especies de flora, 901 especies de fauna y 123 especies de funga presentes en Chile, y, variables bioclimáticas actuales y futuras proyectadas, según lo presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables bioclimáticas utilizadas para modelos de distribución de especies en MaxEnt. Se trabajó con variables para 3 escenarios distintos, uno actual (Pliscoff et al. 2014), uno futuro cercano optimista SSP1 2.6 para 2021-2040 y uno futuro lejano pesimista SSP5 8.5 para 2081-2100. Los datos para escenarios futuros fueron descargados desde WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) para el GCM HadGEM3-GC3-LL. Descripción de variables: BIO1 = Annual Mean Temperature, BIO4 = Temperature Seasonality, BIO5 = Max Temperature of Warmest Month, BIO6 = Min Temperature of Coldest Month, BIO12 = Annual Precipitation, BIO15 = Precipitation Seasonality y BIO16 = Precipitation of Wettest Quarter.

Escenario	Variables Bioclimáticas	Resolución
Actual	BIO1, BIO4, BIO5, BIO6, BIO12, BIO15 y BIO16	1 km ² / 30 s
Futuro SSP1 2.6 para 2021 – 2040	BIO1, BIO4, BIO5, BIO6, BIO12, BIO15 y BIO16	1 km ² / 30 s
Futuro SSP5 8.5 para 2081 – 2100	BIO1, BIO4, BIO5, BIO6, BIO12, BIO15 y BIO16	1 km ² / 30 s

En MaxEnt, se corrieron los modelos de distribución de especies con los siguientes ajustes: *Random test percentage* en 30%, *Maximum iterations* en 1000 y, se aplicó la regla umbral de “*Maximum training sensitivity plus specificity*” para la creación de mapas binarios de presencia/ausencia, donde los pixeles de presencia toman un valor de “1” y los de ausencia un valor “0”. Además, para todos los modelos de distribución actuales, se hicieron proyecciones futuras utilizando los dos sets de variables correspondientes.

3.4. Sumas por grupos taxonómicos

Cada una de las especies modeladas se categorizó según su estado de residencia, estado de conservación, y en el caso de flora, según forma de vida. Para clasificar el estado de residencia de todas las especies entre nativas o exóticas, se utilizó la base de datos online de iNaturalistCL (<https://inaturalist.mma.gob.cl/places/chile>). No se diferenció entre especies endémicas y nativas. Para clasificar según el estado de conservación, se utilizó el Listado de Especies Clasificadas desde el 1° al 17° Proceso de Clasificación RCE (actualizado a mayo de 2022) del Ministerio del Medio Ambiente (MMA 2022). Aquellas especies que no estuvieran presentes en el listado fueron clasificadas como “S/C” o “Sin Clasificación” y aquellas especies cuyo estado de conservación fuese VU (Vulnerable), EN (En Peligro) y CR (En Peligro Crítico), fueron clasificadas como “Amenazadas” (IUCN 2023). Finalmente, en el caso de flora, se dividió entre especies arbóreas y todas las otras formas de vida (herbáceas, arbustos, cactáceas, etc.).

Teniendo todas las especies clasificadas, se ordenaron los modelos de distribución binarios obtenidos desde MaxEnt en carpetas según escenario, clase, residencia, categoría de amenaza y forma de vida. Luego, en ArcMap, se hizo la suma de los modelos binarios por carpeta. Para esto se descargó la herramienta SDM Toolbox para ArcMap (Brown et al. 2017) y se utilizó la función *Sum Rasters – All Same Extent (Folder)*, lo que generó una suma pixel por pixel, de las presencias y ausencias de cada especie. Con esto se obtuvieron los modelos finales actuales, SSP1 2.6 y SSP5 8.5 para todas las categorías y clases anteriormente mencionadas, donde cada pixel del mapa tiene asociado un valor correspondiente al número de especies presentes en ese pixel.

Utilizando la *Calculadora Ráster* de ArcMap, se hizo una resta de los escenarios actuales a los escenarios futuros, con el fin de evidenciar los cambios en idoneidad climática entre un escenario y otro para los tres grandes grupos (flora, fauna y funga nativa) en Chile continental. Para representar la variable de cambio, se utilizó una rampa de colores que va de verde a morado, donde el aumento en la idoneidad climática para las especies corresponde a áreas de color verde y la disminución de idoneidad climática corresponde a áreas de color morado.

Además, en ArcMap se generaron las cartografías para cada triplete de modelos (considerando los tres escenarios), donde la variable representada fue la magnitud de adecuación al espacio climático. Dado que se modeló la distribución de las especies en función de variables bioclimáticas, aquellas zonas o píxeles que presentan un mayor número de especies se correlacionan a zonas donde la adecuación de las especies al espacio climático es mayor y viceversa. Para representar esta variable se utilizó una rampa de colores que va de verde a rojo, aquí, valores de mayor adecuación de las especies corresponden a áreas de color rojo, y las áreas de menor adecuación corresponden a áreas de color verde.

Finalmente, utilizando las funciones *Sum Rasters – All Same Extent (Folder)* y la *Calculadora Ráster*, se generaron mapas promediados a partir de los modelos de probabilidad de flora, fauna y funga nativa, para cada uno de los tres escenarios. Aquí, cada píxel tiene asociado un valor de probabilidad de presencia promedio obtenido de las probabilidades agregadas del conjunto de especies. Estos valores fueron extraídos en R Studio, lo que permitió generar un gráfico que compara las tendencias de las probabilidades de presencia de los grupos de especies entre escenarios.

4. Resultados

4.1. Resumen en números

Tabla 2. Número final de especies modelables por grupo y categoría. Se muestra el detalle de especies para flora, fauna y de Chile continental. Los totales corresponden a la suma de especies nativas y exóticas.

	Grupo	Categoría	Número de Especies
Flora	Árborea	Nativa	97
		Exótica	19
		Amenazada	20
		Total	116
	Nativa Total	-	1003
	Exótica Total	-	208
	Amenazada Total	-	64
	Total	-	1211
Fauna	Anfibios	Nativos	23
		Exóticos	1
		Amenazados	12
		Total	24
	Aves	Nativas	384
		Exóticas	8
		Amenazadas	35
		Total	392
	Mamíferos	Nativos	40
		Exóticos	15
		Amenazados	10
		Total	55
	Reptiles	Nativos	55
		Exóticos	0
		Amenazados	20
		Total	55
	Invertebrados	Nativos Total	345
		Exóticos Total	30
		Amenazados Total	5
		Total	375
	Nativa Total	-	847
	Exótica Total	-	54
	Amenazada Total	-	82
	Total	-	901
Funga	Nativos Total	-	123
	Exóticos Total	-	0
	Amenazados Total	-	5
	Total	-	123

A continuación, se muestra en la Figura 1 un gráfico resumen de la probabilidad de presencia de las especies promediada por grupo, para los tres escenarios climáticos.

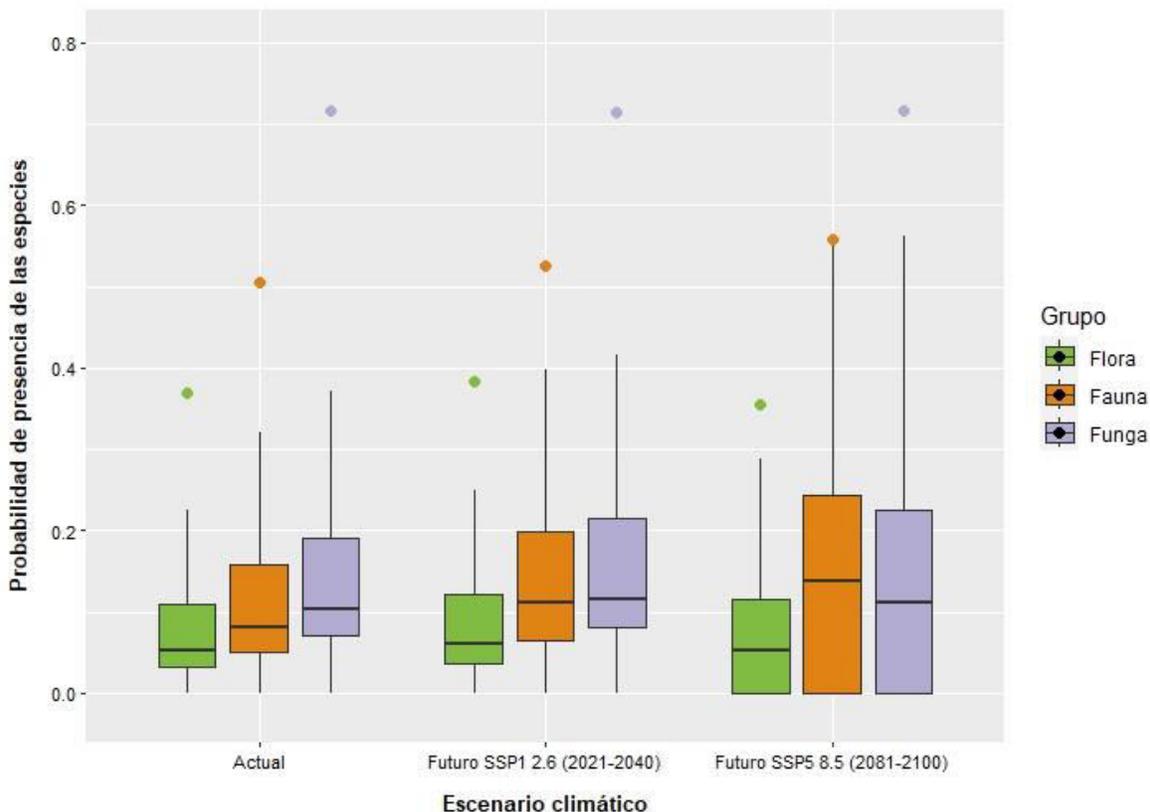


Figura 1. Probabilidad de presencia de las especies promediada por grupo en función de los distintos escenarios climáticos.

4.2. Modelos de cambio para flora

En la Figura 2, se mostraron los cambios en la idoneidad climática de la flora nativa de Chile continental, en (A) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro optimista proyectado al futuro cercano (SSP1 2.6 para 2021-2040) y en (B) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro pesimista proyectado al futuro lejano (SSP5 8.5 para 2081-2100). Se pudo ver que en (A) predominó un aumento de la idoneidad climática a lo largo de todo Chile, en comparación a zonas muy acotadas que presentaron disminución en la idoneidad. Las zonas con mayor aumento se concentraron en la zona Norte, hacia la costa y, se extendieron hacia la zona cordillerana entre las regiones de Coquimbo y Maule, donde el aumento es más importante. En este punto, comenzó una franja discontinua hasta la región de la Araucanía, también asociada a la Cordillera de los Andes. Finalmente, entre el Bío-bío y Aysén, vemos zonas de aumento en idoneidad climática tanto asociadas a la Cordillera de la Costa, como a los Andes.

Respecto a las zonas donde se vio una disminución en la idoneidad climática, principalmente se concentraron en la depresión intermedia, desde la región Metropolitana hasta la región de los Lagos, donde la magnitud de la disminución fue menor. Se pudieron ver, además, en la zona cordillerana entre el Maule y el Bío-bío, parches acotados, pero que presentan una disminución en la idoneidad muy importante, así como ocurrió en el Norte, en Arica, Mejillones y la zona interior de Iquique.

En (B) lo primero que resaltó fue la gran extensión de las áreas donde existirá una disminución importante de la idoneidad climática en comparación a (A). Esta zona se presentó en el Norte, hacia

la costa en Mejillones, y a medida que se avanzó hacia el sur, abarcó la zona de la Cordillera de la Costa hasta invadir completamente la depresión intermedia hasta el Bío-bío e incluso la Cordillera de los Andes desde el Maule hasta la Araucanía. En el mapa se pudieron apreciar algunos de parches dónde la disminución de la idoneidad climática no fue tan intensa, como por ejemplo los sectores cercanos a Putre y Colchane en el Norte, y entre Los Lagos y Aysén, hacia la cordillera, en los sectores de Puelo y Río Cisnes. Respecto a las zonas que presentaron un aumento en la idoneidad climática, estas se concentraron principalmente en las regiones de Los Lagos y Aysén, pero también se vio un importante aumento de la idoneidad asociado a la Cordillera de los Andes entre Coquimbo y O'Higgins. Además, en la zona Norte, los sectores precordilleranos también presentaron zonas de aumento en idoneidad climática.

Los resultados para flora mostrados en los *Anexos* presentaron patrones similares a los que se observaron en la Figura 2.

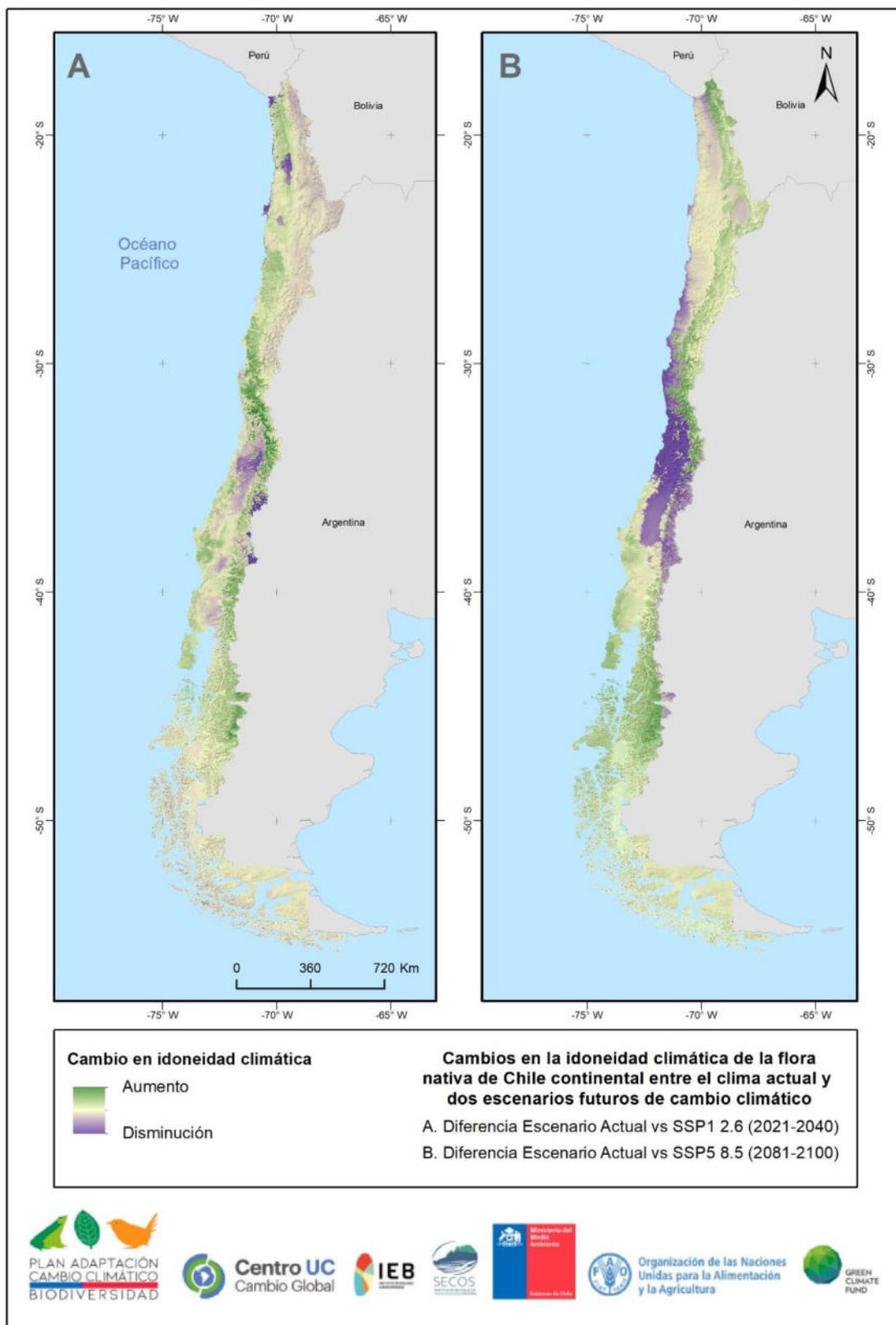


Figura 2. Cambios en la idoneidad climática de la flora nativa de Chile continental entre el clima actual y dos escenarios futuros de cambio climático. A) Diferencia escenario actual vs futuro SSP1 2.6 (2021 – 2040) y B) Diferencia escenario actual vs futuro SSP5 8.5 (2081 – 2100).

4.3. Modelos de cambio para fauna

En la Figura 3, se presentaron los cambios en la idoneidad climática de la fauna nativa de Chile continental, en (A) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro optimista proyectado al futuro cercano (SSP1 2.6 para 2021-2040) y en (B) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro pesimista proyectado al futuro lejano (SSP5 8.5 para 2081-2100). En (A) vemos que predominó un aumento en la idoneidad climática, sobre todo en la zona costera del Norte y centro del país, desde Arica y Parinacota hasta la región de Coquimbo. En la zona centro y Sur, las áreas que presentaron un aumento no tan importante en la idoneidad se concentraron hacia la costa y hacia las zonas precordilleranas, llegando hasta la región de Aysén.

La disminución de la idoneidad climática para la fauna nativa de Chile no se hizo tan relevante comparando el escenario actual y el escenario optimista, esta disminución fue importante solo en algunos parches muy acotados en la zona Norte, como en Mejillones, Iquique y Arica, y hacia la zona centro-sur en la zona de la Cordillera de los Andes entre las regiones del Maule y Bío-bío. Otras zonas que presentaron una disminución no tan drástica en idoneidad climática fueron la depresión intermedia y precordillera de la región Metropolitana y las zonas precordilleranas y cordilleranas desde la región de Coquimbo hacia el Norte del país.

En (B), al igual que para el cambio que se vio en Flora, la disminución en la idoneidad climática se hizo presente en la línea de costa del Norte de Chile, presentó un aumento en área desde la región de Coquimbo e invadió todo lo que es la depresión intermedia hasta la región el Bío-bío. El aumento en idoneidad climática se volvió importante desde la zona centro-sur hasta las regiones de Aysén y Magallanes, se vio que el aumento fue más relevante en zonas costeras y precordilleranas, así como también en los fiordos de la región de Aysén. Además, pudimos apreciar que la precordillera entre las regiones de Atacama y O'Higgins también presentó áreas donde la idoneidad climática para la fauna de Chile continental aumentaría.

Los resultados para fauna mostrados en los *Anexos* presentaron patrones similares a los que se observaron en la Figura 3.

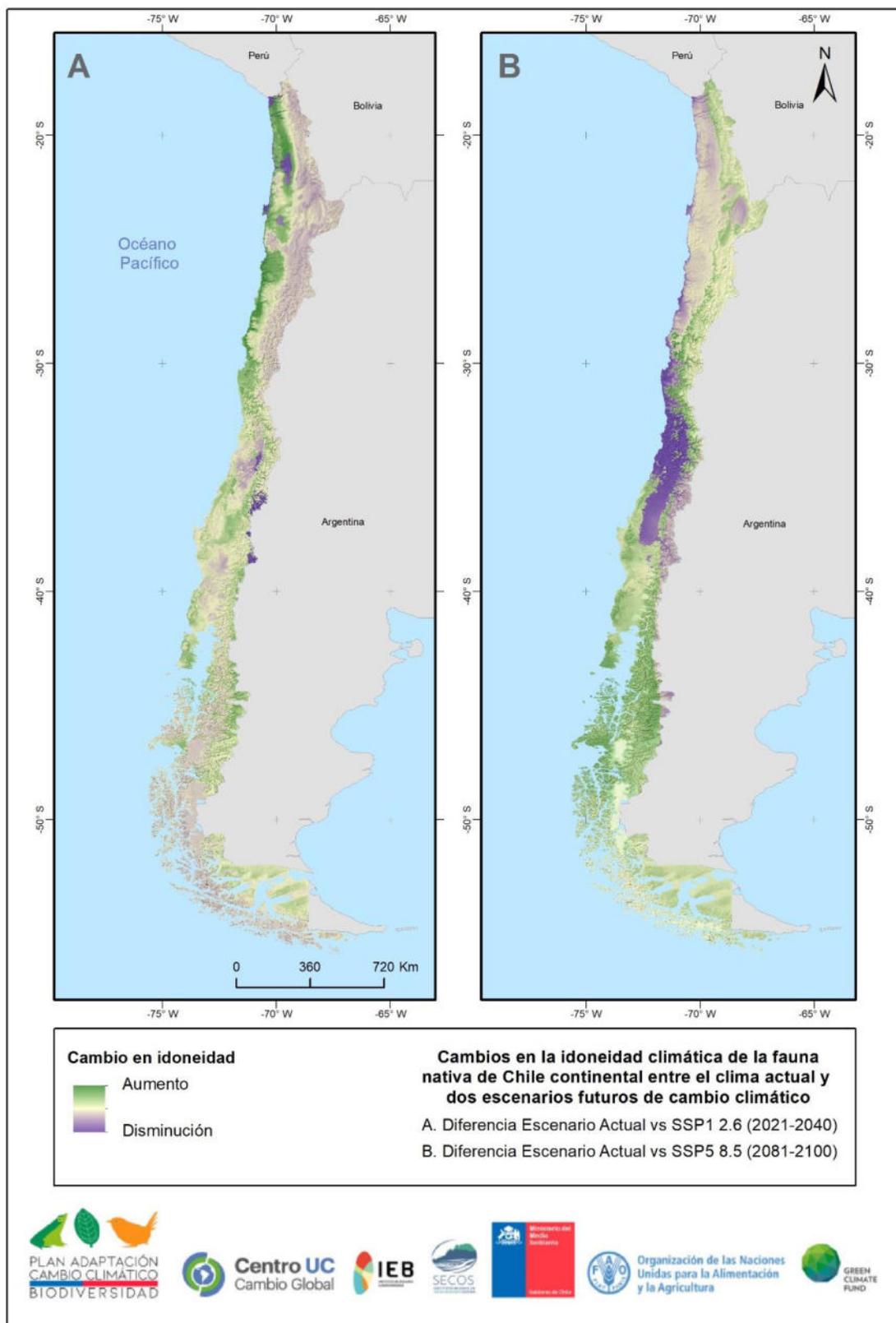


Figura 3. Cambios en la idoneidad climática de la fauna nativa de Chile continental entre el clima actual y dos escenarios futuros de cambio climático. A) Diferencia escenario actual vs futuro SSP1 2.6 (2021 – 2040) y B) Diferencia escenario actual vs futuro SSP5 8.5 (2081 – 2100).

4.4. Modelos de cambio para funga

En la Figura 4, se presentaron los cambios en la idoneidad climática de la funga nativa de Chile continental, en (A) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro optimista proyectado al futuro cercano (SSP1 2.6 para 2021-2040) y en (B) se presentó el cambio entre el escenario actual y el escenario futuro pesimista proyectado al futuro lejano (SSP5 8.5 para 2081-2100). Para los cambios de idoneidad climática de la funga nativa que se presentaron en (A) se encontró un patrón distinto al visto en las Figuras 2 y 3, dado que la disminución en la idoneidad climática tuvo una mayor extensión en comparación a los otros grupos. Esta disminución apareció en la zona de la depresión intermedia y zona costera de la región de Ñuble y se extendió por el interior hasta la región de Los Lagos. Nuevamente vimos parches discontinuos en la Cordillera de los Andes entre Ñuble y Bío-bío, y parches de menor extensión en las localidades de Arica y Mejillones. Respecto al aumento de la idoneidad climática visto entre el escenario actual y el escenario optimista, el área se extendió desde la costa al sur de la región de Antofagasta, penetrando por la depresión intermedia en la región de Coquimbo hasta el Norte de la región Metropolitana. En este punto, las zonas que presentaron aumento se vieron más asociadas a la costa y a la precordillera, para luego volver a la depresión intermedia en las regiones de O'Higgins y Maule. Más al sur, las zonas de aumento se concentraron en parches de gran extensión asociados a la cordillera de la costa desde el Bío-bío hasta los Lagos, con un aumento muy importante en la Isla Grande de Chiloé.

En (B), el patrón no fue tan distinto en comparación a lo que se vio para los otros grupos en las Figuras 2 y 3. Nuevamente se pudo apreciar la gran extensión del área que presentará una disminución en la idoneidad climática para la funga nativa, que iba desde la costa en la región de Atacama, avanzando hacia el sur por la costa y la depresión intermedia hasta llegar a la región del Bío-bío. En la zona central hacia la cordillera de los Andes y hacia el sur por el interior se vieron áreas que también presentarían una disminución de la idoneidad climática, pero en menor magnitud. En cuanto a las zonas que presentarían un aumento en la idoneidad climática, estas fueron más acotadas, y se mantuvieron en la costa de la zona sur en las regiones de Los Ríos y Los Lagos y en los fiordos de las regiones de Aysén y Magallanes. En el centro-norte de Chile, las áreas de aumento se mantuvieron asociadas a la precordillera y cordillera de los Andes, y, desde el extremo Norte del país hasta la localidad de San Pedro de Atacama aproximadamente, también se apreció una franja de aumento de idoneidad climática, pero de menor intensidad.

Los resultados para fauna mostrados en los *Anexos* presentaron patrones similares a los que se observaron en la Figura 4.

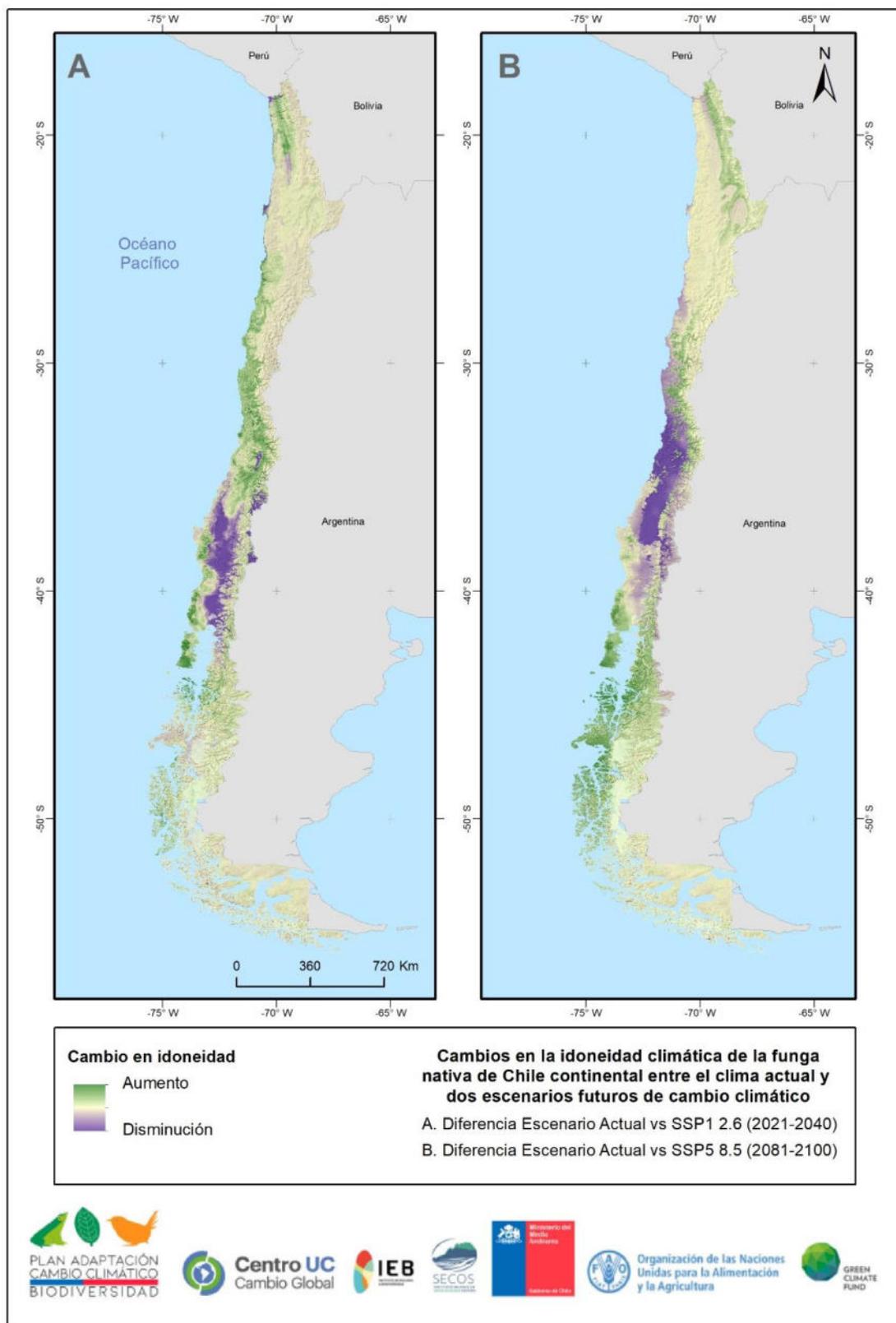


Figura 4. Cambios en la idoneidad climática de la funga nativa de Chile continental entre el clima actual y dos escenarios futuros de cambio climático. A) Diferencia escenario actual vs futuro SSP1 2.6 (2021 – 2040) y B) Diferencia escenario actual vs futuro SSP5 8.5 (2081 – 2100).

5. Análisis de brechas

El enfoque desarrollado en este análisis permite identificar el cambio del espacio climático adecuado actual de las especies frente al cambio climático en desarrollo. Estos resultados deber revisarse con precaución ya que dan cuenta de solo uno de los aspectos en el que el cambio climático afecta a las especies, el que corresponde a los cambios en el rango de distribución. Existen otros impactos, a nivel intra e interespecífico que puede ocasionar el cambio climático. Por ejemplo, los cambios en la fenología, en la reproducción, alimentación, etc. que dan cuenta de una dimensión distinta del impacto del que esta presentado en este análisis. Los resultados se circunscriben a la caracterización de la adecuación o idoneidad climática actual con las presencias conocidas de las especies y su proyección futura bajo distintos escenarios de cambio climático. Estas variaciones futuras no se deben de entender como la desaparición total de especies o grupos de especies, si no que se debieran entender como la pérdida de las condiciones actuales, lo que podría llevar o no a impactos mayores a nivel individual y ecosistémico. Este primer nivel de análisis espacial del impacto del cambio climático debe combinarse con otras aproximaciones, como por ejemplo la identificación de los umbrales de extinción de las especies, que pueden entregar información más detallada para la adaptación de una especie en particular.

Además de la parte climática, los resultados expuestos dependen directamente de la disponibilidad de información de ocurrencias georreferenciadas de las especies, al utilizar la fuente de base de datos de GBIF, se está usando la base de datos global más completa disponible, pero de igual forma esta base cuenta con sesgos y en el caso de Chile, estos se reconocen especialmente en el desbalance de información entre ciertos grupos. Por ejemplo, existe una gran cantidad de información de aves, debido a la fuente de ocurrencias E-bird que está integrada en GBIF, sin embargo, en otros grupos como hongos existe muy bajo número de ocurrencias en relación a la diversidad de especies reconocida para este grupo en Chile.

Finalmente, se debe reconocer que el clima actual con que se definió la adecuación o idoneidad puede no necesariamente reflejar el cambio climático reciente; por ejemplo, la mega sequía que está viviendo la zona central del país desde hace 13 años. El espacio climático actual corresponde a un promedio de los últimos 30 años. La incorporación de eventos extremos climáticos en estos enfoques de modelaciones podría ser de gran utilidad para obtener resultados más robustos.

6. Conclusiones

Los resultados del análisis de modelos de distribución de especies de la flora, fauna y funga de Chile continental, permite identificar los posibles cambios en los espacios climáticos futuros de la biodiversidad, identificándose zonas futuras en que disminuirá fuertemente la adecuación climática actual de las especies. Las principales zonas identificadas que presentarían una disminución en los escenarios futuros son las siguientes: en el caso de la flora, la zona central de Chile, entre las regiones de Coquimbo y Maule; la zona cordillera de Chile central entre las regiones de Maule y Los Ríos para la fauna y finalmente, la zona centro-sur desde la región de la Araucanía a la región de Los Lagos en el caso de la funga.

En todos los casos mencionados anteriormente, en el escenario más pesimista y a más largo plazo (SSP5-8.5, 2081-2100) estas zonas amplían su extensión espacial en los cambios proyectados, respecto a lo identificado en el escenario más optimista y a más corto plazo (SSP1-2.6 2021-2040). De los resultados obtenidos en este análisis se puede señalar que en el futuro podría existir la probabilidad de un recambio de las especies que conforman los ecosistemas actuales en las zonas de mayor cambio en la adecuación o idoneidad climática, aumentando además el riesgo de extinción de las especies, siendo este riesgo mucho mayor en aquellas especies que tienen menor rango de distribución y especialmente en las especies en que este rango solamente se encuentra en las zonas indicadas como con mayor cambio futuro.

7. Bibliografía

- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). *Impacts of climate change on the future of biodiversity*. Ecology Letters, 15(4), 365–377. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x
- Brown, J.L.; Bennett, J.R. & French, C.M. (2017). *SDMtoolbox 2.0: the next generation Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses*. <http://www.sdmtoolbox.org/>
- Chen, I.C., Hill, J. K., Ohlemuller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). *Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming*. Science, 333(6045), 1024–1026. doi:10.1126/science.1206432
- Elith, J., & Franklin, J. (2013). *Species distribution modeling*. In Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition (pp. 692-705). Elsevier Inc.
- GBIF.org (12 July 2023). GBIF Occurrence Download (Fungi) <https://doi.org/10.15468/dl.9nahr5>
- GBIF.org (02 May 2023). GBIF Occurrence Download (Plantae) <https://doi.org/10.15468/dl.9byqk6>
- GBIF.org (02 May 2023). GBIF Occurrence Download (Animalia) <https://doi.org/10.15468/dl.rk67wh>
- IUCN. (2023). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2022-2. <<https://www.iucnredlist.org>>
ISSN 2307-8235
- Lenoir, J., & Svenning, J.-C. (2014). *Climate-related range shifts - a global multidimensional synthesis and new research directions*. Ecography, 38(1), 15–28. doi:10.1111/ecog.00967
- MMA. (2022). Listado de Especies Clasificadas desde el 1° al 17° Proceso de Clasificación RCE (actualizado a mayo de 2022). Recuperado de: <https://clasificacionespecies.mma.gob.cl/>
- IPCC. (2022): Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Pacifici, M., Visconti, P., Butchart, S. H. M., Watson, J. E. M., Cassola, F. M., & Rondinini, C. (2017). *Species' traits influenced their response to recent climate change*. Nature Climate Change, 7(3), 205–208. doi:10.1038/nclimate3223
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*. Nature, 421(6918), 37-42.

Parmesan, C. (2006). *Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 37(1), 637–669. doi:10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190(3-4), 231–259. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Plissock, P., Luebert, F., Hilger, H. H., & Guisan, A. (2014). *Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment*. Ecological Modelling, 288, 166–177

8. Anexos