

Estudio vulnerabilidad terrestre del PNACC BIO: Invasiones biológicas y cambio climático.

Dr. Eduardo Fuentes Lillo

Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB)

Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura





Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



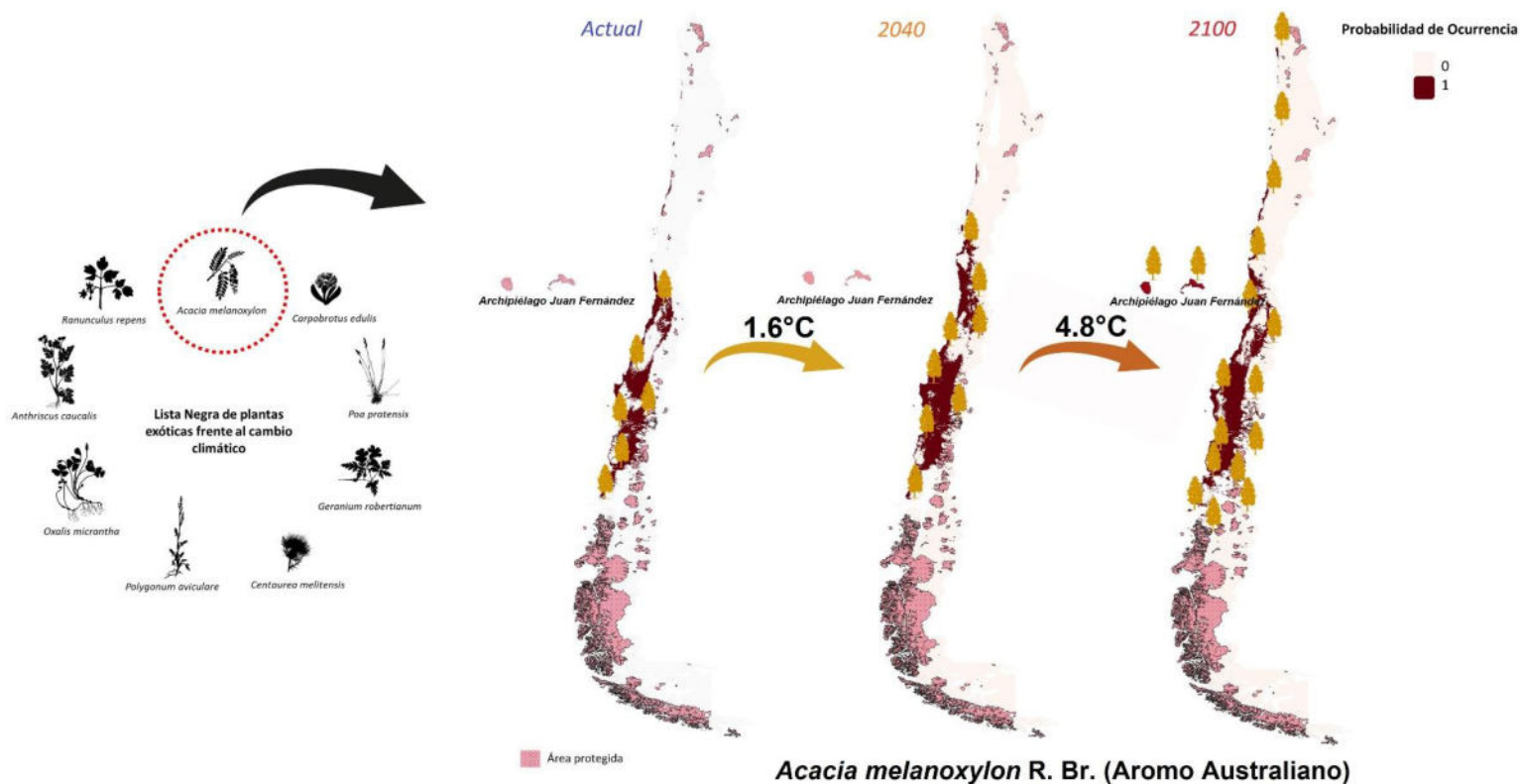
Asesoría para Estudio vulnerabilidad terrestre del PNACC BIO – Invasiones biológicas

RESUMEN

Las invasiones biológicas representan uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de biodiversidad, ya que sus impactos abarcan una amplia gama de consecuencias. Estos impactos incluyen la pérdida de especies nativas y endémicas, cambios en las condiciones ambientales y una reducción de los servicios ecosistémicos. Las actividades humanas y económicas desempeñan un papel fundamental como vectores que favorecen la propagación de plantas exóticas. En Chile, actualmente se han identificado 790 especies exóticas terrestres y acuáticas que se han naturalizado en el país. La mayor densidad de estas especies se encuentra en la zona central y centro-sur de Chile, entre las latitudes 32°S y 40°S, principalmente en áreas con climas mediterráneos y templados. Estas áreas también son donde se concentran las principales actividades humanas, como la industria forestal, la agroforestería, la agricultura y la minería. El cambio climático puede tener efectos significativos en las invasiones biológicas y en la interacción entre especies exóticas y nativas. Se espera que este fenómeno aumente el transporte de propágulos, lo que incrementa la susceptibilidad de las comunidades nativas al no estar pre-adaptadas a los cambios climáticos. Además, se prevé un aumento en las tasas de extinción de plantas nativas, así como una mayor dispersión de especies exóticas. Esto amplifica el impacto de las plantas exóticas sobre las comunidades nativas, especialmente en el caso de árboles y arbustos exóticos. La predicción de la distribución potencial de especies exóticas bajo diferentes escenarios de cambio climático es una herramienta importante para la prevención de su llegada y para identificar áreas prioritarias en términos de invasión. Estos modelos permiten orientar los programas de conservación hacia las zonas donde existe un mayor riesgo de invasión por especies exóticas. Al identificar estas áreas, se pueden implementar estrategias de prevención y control más efectivas, lo que contribuirá a preservar la biodiversidad nativa y proteger los ecosistemas. El objetivo de este estudio es analizar el impacto del cambio climático en la distribución de especies de flora exótica invasora terrestre en Chile. Además, se pretende clasificar estas especies exóticas en función de su nivel de riesgo ante el cambio climático. Para lograr esto, se desarrolló un modelo que considera 88 plantas exóticas invasoras y se evaluaron bajo diferentes escenarios de cambio climático. El primer escenario corresponde al clima actual, utilizado como punto de referencia. El segundo escenario se basa en un cambio climático no severo (CMIP6-SSP1-2.6) proyectado para el año 2040. El tercer escenario representa un cambio climático severo (CMIP6-SSP8.5) proyectado para el año 2100. Los resultados obtenidos indican que las plantas exóticas, incluyendo árboles, arbustos, gramíneas y hierbas, tendrán una mayor probabilidad de establecerse en zonas de alta elevación y latitud, como la cordillera de los Andes y los ecosistemas patagónicos, tanto para el año 2040 como para el año 2100. Además, se ha identificado que especies como *Mesembryanthemum crystallinum*, *Rubus ulmifolius*, *Ulex europaeus* y *Rosa rubiginosa* presentan una alta probabilidad de colonizar ecosistemas insulares para el año 2100. Estos resultados resaltan la alta susceptibilidad de la cordillera de los Andes a la invasión por diversas especies exóticas en ambos escenarios de cambio climático. Dado que muchas áreas protegidas se encuentran en ecosistemas montañosos, estos hallazgos adquieren una gran relevancia en términos de conservación. Los resultados ayudarán a priorizar aquellas especies que podrían expandirse con el cambio climático, lo que permitirá establecer protocolos de bioseguridad para detectar tempranamente la presencia de

estas plantas exóticas. Estas medidas de prevención temprana serán cruciales para minimizar el impacto negativo de las especies exóticas invasoras en los ecosistemas protegidos y preservar la integridad de la biodiversidad nativa.

Resumen Gráfico





1.- INTRODUCCIÓN

Las invasiones biológicas se consideran uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de biodiversidad (Linders et al. 2019; Pyšek et al. 2020). A nivel mundial, se ha estudiado extensamente este fenómeno. Sin embargo, en Chile, los impactos y la biología de las invasiones han sido poco investigados (Quiroz et al. 2009; Fuentes-Lillo & Pauchard 2019). Esto se debe a que se considera un fenómeno reciente en el país, donde muchas plantas exóticas se encuentran en etapas iniciales de invasión y otras aún no han sido documentadas científicamente debido a la falta de inventarios regionales (Fuentes et al. 2019).

El proceso de globalización ha provocado un incremento en el alcance geográfico y el impacto de las invasiones biológicas (Seebens et al. 2015; 2017). Estas invasiones se han convertido en un componente crucial del cambio global, con efectos significativos en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Pyšek et al. 2012). Sin embargo, actualmente existe un vacío importante en cuanto a la comprensión de los principales procesos que impulsan la distribución de las especies invasoras (Fuentes-Lillo & Pauchard 2019).

El desarrollo económico y la globalización son los factores que históricamente han explicado muchas de las introducciones de plantas (Seebens et al. 2015). Muchas especies de plantas han sido introducidas directa e indirectamente por distintas actividades humanas, como la horticultura, la industria forestal, la producción de alimentos y la agroforestería (Fuentes et al. 2015). En Chile, la mayor densidad de plantas exóticas se encuentra dentro de las latitudes 32°-40°S, que coinciden con climas mediterráneos y templados, y disminuye hacia latitudes más altas (Fuentes et al. 2013; 2020).

En cuanto al establecimiento, uno de los factores principales que determinan la probabilidad de establecimiento son las condiciones climáticas y los niveles de perturbación que existen en la comunidad a ser invadida (Lembrechts et al. 2016; Fuentes-Lillo et al. 2021). Bajo este contexto, se ha determinado que la probabilidad de establecimiento y la riqueza de plantas no nativas disminuyen significativamente en función de la elevación y el aumento de la latitud (Pauchard et al. 2009; Seipel et al. 2012; Fuentes-Lillo et al. 2021). Mientras tanto, la cercanía a asentamientos humanos y zonas perturbadas incrementa significativamente la riqueza y probabilidad de establecimiento de las plantas no nativas (Fuentes-Lillo et al. 2021).

Los requisitos ambientales de una especie invasora, que definen los límites de su distribución potencial, desempeñan un papel fundamental en la detección y control de invasiones tempranas (Pyšek & Richardson 2010). Para predecir los posibles rangos de distribución introducidos, generalmente se utilizan datos de distribución tanto en el rango nativo como en el introducido de la especie (Gallien et al. 2010). Esto se basa en la suposición de que las especies invasoras tienen características de nicho similares en ambos rangos. Sin embargo, estudios recientes han puesto en duda esta suposición, resaltando la existencia de factores que pueden permitir que las especies invasoras se expandan más allá de su envoltura ambiental nativa. Estos factores pueden incluir la ausencia de competidores y/o patógenos, cambios evolutivos y selección en el rango introducido (Václavík & Meentemeyer 2012).

En la actualidad, el proceso de invasión se ve favorecido por los factores del cambio global, como el aumento de las actividades humanas y el cambio climático (Pauchard et al. 2016). En Chile, se ha investigado en mayor profundidad el impacto de las actividades humanas en la dispersión de plantas



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



no nativas y en su establecimiento, especialmente relacionado con las modificaciones derivadas de las perturbaciones (Fuentes et al. 2015; Fuentes-Lillo et al. 2021). Sin embargo, se ha prestado escasa atención al efecto del cambio climático en la dispersión o el éxito de establecimiento de plantas no nativas.

En la región central de Chile, se están observando cambios significativos en los patrones climáticos, con un aumento en las temperaturas y una disminución en la precipitación. Según estudios realizados, se estima un aumento de +0,23 a +0,40°C por década y una reducción de entre el -5% y el -10% en la precipitación por década (Rangecroft et al. 2013). En las regiones del sur y subantártica de Chile, los pronósticos indican un aumento de temperatura de +0,62°C por década y una disminución del 12% en la precipitación por década (Vera et al. 2006).

El impacto del cambio climático tiene diversas implicancias sobre los ecosistemas. Por un lado, se espera un mayor derretimiento de los glaciares, lo que tendrá efectos directos en el suministro de agua en las montañas (Marengo et al. 2012). Además, estos cambios afectarán negativamente a la flora nativa adaptada a las condiciones frías de estos ecosistemas, lo que probablemente resultará en una reducción de la diversidad de especies nativas (Anderson et al. 2011). También se prevén modificaciones en los patrones de distribución altitudinal y en los ciclos fenológicos de las especies exóticas presentes en la región lo que influirá directamente sobre su distribución potencial (Pauchard et al. 2009; Teller et al. 2016).

Es importante destacar que el establecimiento de especies exóticas está influenciado por factores abióticos del nuevo hábitat, como lo es la temperatura y la precipitación. El cambio climático, al eliminar algunos de estos filtros abióticos, como las bajas temperaturas y la disponibilidad limitada de agua, podría facilitar la expansión de especies exóticas hacia áreas de mayor elevación y latitudes más altas (O'Donnell et al. 2012; Alexander et al. 2016). Diversas investigaciones sugieren que este proceso de redistribución de plantas exóticas ya está en curso (Fuentes-Lillo et al. 2021).

En la actualidad, los modelos de distribución de especies (SDM, por sus siglas en inglés) se han convertido en una herramienta ampliamente utilizada para el estudio de la distribución potencial de especies de diferentes taxones, tanto en condiciones climáticas actuales como en escenarios futuros de cambio climático. Generalmente los SDM que emplean datos de presencia y ausencia, suelen generar mapas de distribución más precisos especialmente de especies nativas, las cuales cumplen uno de los principales supuestos para la elaboración de modelos de distribución, que es el equilibrio con el medio ambiente. Esta aproximación ofrece una mejor comprensión del nicho ecológico de la especie y así conociendo su nicho realizado (Soberón, 2007). Sin embargo, al estudiar la distribución potencial de especies exóticas, el uso de registros de ausencia no es recomendable. Debido a que al utilizar solo registros de presencia dentro de los SDM, el resultado entrega una aproximación indirecta de las áreas donde la especie podría invadir (nicho potencial), basándose en la idoneidad climática del hábitat (Soberón & Nakamura, 2009).

Es importante considerar que la utilización de modelos de distribución de especies tiene sus limitaciones y suposiciones inherentes. La calidad y cantidad de los datos utilizados, así como la elección de las variables climáticas y los algoritmos de modelado, pueden influir en los resultados obtenidos (Gallien et al. 2010). Además, es fundamental tener en cuenta que los modelos de distribución potencial no son predictivos en sí mismos, sino que proporcionan una representación



estimada de las condiciones adecuadas para la presencia de la especie en un determinado contexto climático (Soberón, 2007).

En Chile, se ha prestado poca atención al uso de modelos de distribución de especies (SDMs) o modelos de nicho ecológico (ENMs) en el contexto de plantas no nativas (Fuentes-Lillo & Pauchard 2019). Sin embargo, algunos estudios relevantes han abordado estas temáticas, centrándose en la especie no nativa *Eschscholzia californica* en ecosistemas mediterráneos y andinos de Chile. Los resultados obtenidos indican que esta especie mantiene su nicho climático nativo, pero también tiene el potencial de expandirse tanto en términos de elevación como de latitud en el área invadida (Peña-Gómez et al. 2014).

Asimismo, se han realizado estudios similares en la zona sur de Chile y Argentina, donde se han aplicado modelos de distribución potencial y análisis de nicho ecológico para las plantas invasoras *Taraxacum officinale* y *Ulex europaeus*. Estos estudios han revelado que ambas especies podrían ampliar sus rangos de distribución tanto en términos de elevación hacia la cordillera de los Andes como de latitud hacia ecosistemas patagónicos (Hernández-Lambrano et al. 2017).

A pesar de que estos estudios proporcionan información importante sobre la distribución potencial y el nicho ecológico de algunas plantas no nativas en Chile, aún existe una falta de investigación en este campo. Es necesario llevar a cabo más estudios que utilicen SDMs o ENMs para comprender mejor los patrones de invasión y los factores que influyen en la expansión de las especies no nativas en diferentes regiones de Chile. Estos enfoques pueden contribuir significativamente a la identificación de áreas prioritarias para el monitoreo y control de invasiones, así como para la conservación de la biodiversidad nativa en Chile. Además, este conocimiento es relevante en el contexto del cambio climático, ya que puede ayudar a prever cómo las especies no nativas podrían responder y adaptarse a los posibles cambios en las condiciones ambientales en el futuro.

En los ecosistemas alpinos, se ha investigado en mayor profundidad el impacto del cambio climático en los patrones de distribución de especies exóticas. Estudios realizados en tres regiones (Suiza, Gales y Australia) han utilizado modelos de distribución para evaluar el comportamiento de 48 especies invasoras de baja elevación en escalas temporales proyectadas para el año 2050 y 2070. Los resultados revelaron que más del 50% de estas especies, principalmente aquellas tolerantes a bajas temperaturas y con preferencia por suelos con mayor disponibilidad hídrica, ampliarán su rango altitudinal hacia zonas subalpinas para el año 2070 (Petitpierre et al. 2016).

Aunque estos modelos basados en cambios climáticos han demostrado ser efectivos, se reconoce la necesidad de incorporar datos antropogénicos y de cambio de uso de suelo para mejorar las predicciones de invasión en áreas de alta montaña y ecosistemas fríos en general (Petitpierre et al. 2016; Carboni et al. 2018; Klöner et al. 2017). Estos datos complementarios son fundamentales para comprender la influencia de las actividades humanas y los cambios en el paisaje en la propagación de especies exóticas en estos entornos.

Considerando la importancia de los ecosistemas Andinos y fríos en términos de biodiversidad y servicios ecosistémicos, es esencial continuar investigando y mejorando los modelos de distribución de especies invasoras en estas regiones. Esto permitirá una mejor comprensión de los posibles impactos del cambio climático y las actividades humanas en la invasión de plantas exóticas, lo que a



su vez facilitará la implementación de estrategias de manejo y conservación efectivas en estos ecosistemas vulnerables.

Chile ha sido reconocido como un hotspot de biodiversidad debido a su amplia diversidad biológica, altos niveles de endemismo y la presencia de diversos grupos taxonómicos que han evolucionado en aislamiento debido a la separación biogeográfica (Arroyo & Cavieres 2013). Estas características biogeográficas convierten a Chile en un laboratorio natural para comprender los patrones de invasión. Además, su amplio rango latitudinal y altitudinal proporciona una oportunidad única para inferir el futuro de las invasiones en diferentes escenarios (Fuentes et al. 2013; 2019)

Es fundamental generar modelos que nos permitan evaluar cómo las especies exóticas se redistribuirán bajo diferentes escenarios de cambio climático. Esto es especialmente importante desde una perspectiva conservacionista, ya que nos permitiría desarrollar protocolos de bioseguridad para manejar y controlar la presencia futura de especies exóticas. Especial atención debe prestarse a las áreas protegidas, que son ecosistemas de alta importancia y podrían ser más propensos a la invasión de plantas exóticas en el futuro (Pauchard et al. 2015).

Además, es necesario desarrollar modelos de distribución que nos ayuden a identificar las potenciales especies que podrían beneficiarse de estos nuevos patrones climáticos. Estos modelos permitirían anticiparnos a las posibles invasiones y tomar medidas preventivas para minimizar su impacto en los ecosistemas nativos.

Considerando los futuros escenarios de cambio climático, el objetivo de la asesoría es determinar el efecto que dicho cambio tendrá sobre la distribución de especies de flora exótica invasora terrestre presentes en Chile. Además, se busca clasificar estas especies exóticas en función de su nivel de riesgo ante el cambio climático. Para lograr esto, se llevará a cabo un análisis detallado utilizando modelos de distribución de especies y datos climáticos proyectados. Estos modelos permitirán evaluar cómo las condiciones climáticas cambiantes podrían afectar la distribución geográfica de las especies invasoras en el futuro. Además, se realizará una evaluación del riesgo al cambio climático para cada especie exótica. Esto implica considerar no solo su distribución actual, sino también su tolerancia a las condiciones climáticas proyectadas y su capacidad de adaptación. Mediante este análisis, se clasificarán las especies en diferentes categorías de riesgo, lo que proporcionará información clave para la gestión y control de las especies invasoras en el contexto del cambio climático.

2.- METODOLOGÍA

Sitio de estudio

El sitio de estudio abarca el territorio continental de Chile, que se extiende aproximadamente a lo largo de 4.300 km y se divide en 16 regiones y 56 provincias. Chile exhibe un amplio gradiente latitudinal, que va desde los 17°S hasta los 56°S. En función de la latitud, se observa un aumento en las precipitaciones y una disminución en la temperatura. Como resultado, se distinguen distintos tipos de clima en el país, siendo hiperdesértico en la zona norte, mediterráneo en el centro y bosque lluvioso templado y húmedo subantártico frío en el sur (Luebert & Pliscoff 2017).

El clima de la costa chilena se ve influenciado por el sistema de corrientes del Humboldt y del cabo de Hornos, mientras que en el norte se ve afectado por el fenómeno de la oscilación del Sur (ENSO). Es importante destacar que el clima desempeña un papel fundamental en la distribución de la población y en la concentración de actividades humanas, las cuales se concentran principalmente en la zona central del país.



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Como resultado de esta concentración de actividades humanas, Chile ha experimentado un aumento en la introducción y establecimiento de especies exóticas. Se estima que actualmente existen alrededor de 1.122 especies naturalizadas en el país, de las cuales 790 corresponden a plantas vasculares, tanto terrestres como acuáticas. Este incremento en el número de especies exóticas se ha registrado en los últimos 150 años (Fuentes et al. 2019).

Obtención de datos

Los datos de presencia de las 790 plantas no-nativas fueron extraídas de diferentes bases de datos durante abril del 2023:

Global Biodiversity Information Facility (GBIF). <https://www.gbif.org/>

Catálogo de plantas vasculares de Chile. <http://catalogoplantas.udec.cl/>

Base de datos de plantas invasoras del Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB). <http://www.lib.udec.cl/en/base-de-datos/>

Registros de plantas no-nativas de montaña provenientes de la base de datos de la red Mountain Invasiones Research (MIREN). <https://www.mountaininvasions.org/>

Los datos fueron filtrados acorde a los siguientes criterios: (a) Los datos registrados presenten información georreferenciada posterior a 1950 para asegurar la fidelidad de los datos georreferenciados (b) que los niveles de ocurrencia superen los 100 registros, (c) Que las plantas exóticas tengan una fecha conocida de introducción generalmente entre un rango de introducción de 1800 a 1900; y finalmente (d) las plantas no-nativas tenga un impacto conocido. Finalmente luego de estos criterios se obtuvieron un total de 88 plantas no-nativas. Es importante señalar que ciertas plantas exóticas, principalmente arboles exóticos presentan una baja representatividad debido a la dificultad que tiene discriminar ocurrencias de plantaciones forestales (ej. *Pinus contorta*, *Pinus radiata*, *Eucaliptus sp*). En cuanto a porcentajes un 75% de los datos corresponden a registros provenientes de GBIF y un 25% corresponden a datos provenientes de las bases de datos complementarias.

El criterio asociado a los registros de presencia (<100 registros) es para tener la certeza de tener modelos robustos debido a que a diferencias de las especies nativas, el registro de las especies no-nativas tiene una menor representatividad en cuanto a los registros de ocurrencia. En cuanto al año de introducción, se sabe que para uno de los principales problemas con el modelamiento de las especies no-nativas es que no cumplen con el criterio de estar en equilibrio con el medio ambiente, por lo que una de las formas para asegurar que cumpla este criterio es que las especies lleven el tiempo suficiente en el país para ocupar su nicho fundamental y así reducir el riesgo de sobrestimar la distribución potencial de las plantas no-nativas.

Capas climáticas

Para modelar la distribución potencial de las 88 plantas exóticas bajo las condiciones climáticas actuales (rango 1981-2010), se utilizaron 19 capas bioclimáticas obtenidas de CHELSA (Climate Change and Earth System Dynamics), basadas en datos de temperatura del aire proporcionados por modelos de circulación global (ECMWF) a una resolución espacial de 1km² (Karger et al. 2017). Estas capas bioclimáticas incluyen: BIO1: Temperatura Media Anual; BIO2: Intervalo medio diurno (media mensual de temperatura máxima - temperatura mínima); BIO3: Isotermalidad; BIO4: Estacionalidad de la temperatura; BIO5: Temperatura máxima del mes más cálido; BIO6: Temperatura mínima del mes más frío; BIO7: Rango Anual de Temperatura; BIO8: Temperatura media del trimestre más húmedo; BIO9:



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Temperatura media del cuarto más seco; BIO10: Temperatura media del trimestre más cálido; BIO11: Temperatura media del trimestre más frío; BIO12: Precipitación Anual; BIO13: Precipitación del mes más lluvioso; BIO14: Precipitación del mes más seco; BIO15: Estacionalidad de la Precipitación; BIO16: Precipitación del trimestre más húmedo; BIO17: Precipitación del Trimestre Más Seco; BIO18: Precipitación del trimestre más cálido y BIO19: Precipitación del trimestre más frío.

Para evaluar el impacto del cambio climático en la distribución potencial de las plantas exóticas, se consideraron dos escenarios climáticos diferentes. El primero es el escenario CMIP6-SSP1-2.6 para el año 2040, que se considera un escenario poco severo. En este escenario, se pronostica que las concentraciones de CO₂ disminuirán a cero para el año 2100. Para el año 2040, se estima un aumento de la temperatura media global de 1.6°C. Este escenario representa una proyección relativamente optimista en términos de mitigación del cambio climático.

El segundo escenario es el CMIP6-SSP-8.5 para el año 2100, que representa un escenario climático más grave. En este escenario, se asume que las concentraciones de CO₂ seguirán aumentando a lo largo del siglo XXI. Se proyecta un incremento de temperatura más significativo, con un aumento de 4.8°C en la temperatura media global para el año 2100. Este escenario refleja un panorama más desfavorable en términos de mitigación del cambio climático. Para realizar los modelamientos, se utilizaron las 19 variables bioclimáticas descritas anteriormente, obtenidas de la base de datos CHELSA (Karger et al. 2017). Estas variables proporcionaron la información necesaria sobre las condiciones climáticas actuales y los posibles cambios proyectados en temperatura y precipitación.

Para cada especie se ajustó el modelo final a una resolución espacial de 1km² tanto para las condiciones actuales como para las futuras (2040 y 2100). El uso de modelos con escala espacial grande (> 5km²) se utilizan generalmente en estudios biogeográficos (e.g., estudios globales sobre distribución potencial de especies exóticas), mientras que el uso de escalas espaciales finas (<1 km²) generalmente permite determinar la distribución potencial de especies cuando se requieren realizar planes de conservación y manejo, ya que permiten de manera indirecta evaluar el efecto de caminos y ríos sobre la conectividad de los paisajes (Nezer et al. 2017), En este caso particular, muchas de las áreas más vulnerable en Chile corresponden a áreas protegidas (Parques, Reservas, Monumentos Nacionales) por lo que utilizar escalas espaciales finas, podría dar una aproximación mas precisa de la distribución potencial de especies exóticas y en que area focalizar los esfuerzos de prevención de llegada de especies exóticas.

Modelamiento de idoneidad ambiental

Debido a la falta de registros de presencia real de plantas no nativas, se utilizaron pseudoausencias seleccionadas al azar para mejorar la calidad y precisión de los modelos. Para esto, se empleó el programa Biomod2 V-4.2.4 (Thuiller et al. 2016), en el cual se seleccionaron 5000 puntos de pseudoausencia. Estos puntos se limitaron a la distribución geográfica del territorio continental de Chile.

Para llevar a cabo el modelamiento de la distribución potencial de las plantas exóticas, se emplearon tres modelos: Maxent, Random Forest (RF) y un modelo basado en regresión, GLM. Estos modelos fueron implementados utilizando el paquete biomod2. Con el fin de evaluar el rendimiento y la robustez de los modelos ensamblados, se utilizó la validación interna incorporada en la configuración de biomod2. Para este proceso, se generaron dos conjuntos de datos, donde el 70% de los datos se destinaron a la calibración y el 30% restante a la validación del modelo. Se emplearon dos estadísticas para la evaluación: el área bajo la curva (AUC) de la característica operativa del receptor (ROC) y el estadístico True Skill Statistics (TSS) (Allouche et al. 2006).



Para cada modelo, se generaron 50 réplicas utilizando los algoritmos correspondientes. Se seleccionaron los modelos ensamblados cuya validación obtuvo un valor de AUC mayor a 0.7 o un valor de TSS mayor a 0.6. Las puntuaciones óptimas de TSS se utilizaron para convertirlas en mapas de distribución de probabilidad binaria, que representan la idoneidad climática de las plantas no nativas.

En total, se generaron tres modelos ensamblados que evaluaron la idoneidad ambiental de las 88 plantas exóticas analizadas. Estos modelos fueron los siguientes:

1. Modelo con variables climáticas actuales (1981-2010): Este modelo permitió determinar la distribución potencial de las plantas exóticas utilizando datos climáticos correspondientes al período actual.
2. Modelo con variables climáticas bajo un escenario de cambio climático no severo (CMIP6-SSP1-2.6) para el año 2040: Se utilizó este modelo para proyectar la distribución potencial de las plantas exóticas considerando un escenario de cambio climático moderado en el futuro cercano.
3. Modelo con variables climáticas bajo un escenario de cambio climático severo (CMIP6-SSP8.5) para el año 2100: Se empleó este modelo para evaluar la distribución potencial de las plantas exóticas bajo un escenario de cambio climático más extremo y desfavorable en el futuro lejano.

La elección de los escenarios no severo y severo se realizó con el propósito de contrastar las condiciones climáticas entre cada escenario y la distribución potencial actual de las plantas exóticas. Esto permitió comprender mejor cómo el cambio climático puede influir en la distribución futura de estas especies y evaluar su adaptabilidad en diferentes escenarios climáticos. Es importante mencionar que el uso de diferentes escenarios climáticos (amplio contraste entre las condiciones climáticas futuras) proporciona una visión más completa de las posibles respuestas de las plantas exóticas ante diferentes condiciones climáticas proyectadas en el futuro.

Finalmente se utilizó la función "BiomodRangeSize" del paquete Biomod2 para determinar el porcentaje de cambio en la distribución de las especies tanto entre las condiciones actuales y el año 2040, como entre las condiciones actuales y el año 2100. Esta función estima la proporción y el número relativo de píxeles o hábitats perdidos, ganados o que se mantienen estables bajo los escenarios de cambio climático.

Además, se realizó un resumen del cambio de rango para cada especie. Cada píxel en el análisis puede tener uno de los siguientes cuatro valores:

- Valor -2: Indica que la especie perderá el píxel en el futuro en comparación con la distribución actual.
- Valor -1: Predice que el píxel estará estable para la especie, es decir, no habrá cambios en su ocupación en el futuro en comparación con la distribución actual.
- Valor 0: Indica que el píxel no estaba ocupado en la distribución actual y tampoco lo estará en el futuro.
- Valor 1: Indica que el píxel no estaba ocupado en la distribución actual, pero se prevé que estará ocupado en el futuro.

Estos valores permiten realizar un análisis detallado de los cambios en la distribución de las especies, identificando los píxeles que se ganan, pierden o se mantienen estables en relación con las condiciones climáticas proyectadas. Este tipo de análisis proporciona información importante sobre los impactos potenciales del cambio climático en la distribución espacial de las especies exóticas.

3.- RESULTADOS

El proceso de filtrado dio como resultado 88 plantas exóticas que cumplieran con todos los criterios para ser modeladas, es importante tener en consideración que a diferencia de las plantas nativas, las plantas exóticas tienen una menor atención en relación con la toma de datos de ocurrencia e incluso en los registros de herbario. Las especies corresponden principalmente a especies de hábito herbáceo (67 especies), seguido de arbustos (8 especies), gramíneas (8 especies) y finalmente especies arbóreas (5 especies) (Anexo 1). En cuanto a las familias taxonómicas, la familia Asteraceae presenta la mayor cantidad de registros con 12 especies, Fabaceae y Asteraceae con 9 especies y luego la familia Lamiaceae y Plantaginaceae con 5 especies. Las 27 familias restantes no presentan más de 3 especies. Para un mayor detalle ver Anexo 1.

Rendimiento modelos

En cuanto al rendimiento de los modelos, la técnica de modelado Random Forest (RF) mostró la mayor precisión predictiva para todas las formas de crecimiento, como se muestra en la Tabla 1. Los valores promedio de TSS fueron superiores a 0.80 y los valores de AUC fueron mayores a 0.78. Los modelos lineales generalizados (GLM) ocuparon el segundo lugar en términos de precisión predictiva. Por otro lado, Maxent mostró un poder predictivo inferior en cuanto a los valores de TSS (0.54-0.62) y AUC (0.48-0.62) (Figura 1, Anexo 1). A partir de acá se informan los resultados donde se utilizó el modelo con mayor precisión predictiva para construir el modelo ensamblado para las salidas de las proyecciones espaciales.

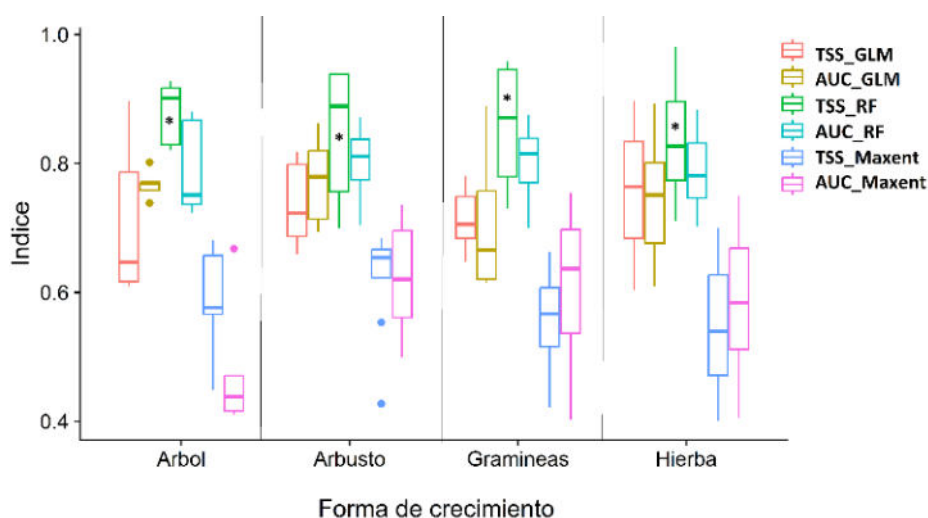


Figura 1. Valores de TSS y AUC para cada modelo (GLM, RF, Maxent) en función de la forma de crecimiento de las plantas exóticas.



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Patrones de distribución potencial actual y futuro de las plantas exóticas

La distribución de los árboles exóticos en Chile, según los escenarios de cambio climático, muestra principalmente una expansión hacia latitudes más altas y elevaciones mayores. En el año 2040 y 2100, se espera que *Ailanthus altissima* se expanda hacia zonas de mayor elevación y latitudes más altas, concentrándose especialmente en la región centro-sur del país (Figura 83, Anexo 2).

En cuanto a las especies del género *Acacia*, se observa una redistribución hacia áreas de mayor elevación y latitudes más altas. Sin embargo, también se espera una alta probabilidad de ocurrencia en las zonas costeras del centro y norte de Chile para el año 2100 (Figura 31, 32, Anexo 2). Aunque *Alnus glutinosa* se redistribuirá hacia latitudes más altas y elevaciones mayores para el año 2040, para el año 2100 también se prevé una expansión hacia latitudes más bajas en la zona central y norte de Chile (Figura 19, Anexo 2). Por último, *Crataegus monogyna* es la especie con menor probabilidad de expandirse, concentrándose únicamente en la zona central de Chile (Figura 75, Anexo 2).

En lo que respecta a los arbustos, todas las especies muestran un patrón de redistribución hacia zonas de mayor elevación y latitudes más altas, especialmente por debajo de los 40°S. Para las especies de la familia Rosaceae, como *Rubus ulmifolius* y *Rosa rubiginosa*, se espera que para el año 2040 y 2100 se redistribuyan hacia áreas de mayor elevación y latitudes más altas, especialmente por encima de los 40°S. Además, se observa una alta probabilidad de ocurrencia en el archipiélago de Chiloé (Figura 78, 77, Anexo 2).

En el caso de las especies de la familia Fabaceae, se prevé un aumento en la probabilidad de ocurrencia de *U. europaeus* en el archipiélago de Chiloé para el año 2100 (Figura 39, Anexo 2). Por otro lado, para *Lupinus arboreus* se espera un aumento en la probabilidad de ocurrencia en zonas costeras de la zona central de Chile para el año 2100 (Figura 34, Anexo 2). En cuanto a las especies *Dononea viscosa* y *Ricinus communis*, se observa un aumento en la redistribución hacia latitudes más bajas (por debajo de los 35°S) para el año 2040 y 2100, principalmente concentrado en zonas costeras (Figura 30, 79, Anexo 2).

En relación con las especies de la familia Poaceae, se observa que las especies del género *Poa*, como *P. pratensis* y *P. annua*, junto con *Dactylis glomerata* y *Holcus lanatus*, se redistribuirán hacia zonas de mayor elevación y latitudes más altas, principalmente en la región de la Patagonia y Tierra del Fuego, tanto para el año 2040 como para el 2100 (Figura 66- 69, Anexo 2). En cuanto a las especies del género *Avena*, como *A. sativa*, *A. fatua* y *A. barbata*, su distribución potencial hacia el año 2040 y 2100 se concentra principalmente en la zona centro-sur de Chile (Figura 62-64, Anexo 2). Sin embargo, solo *A. sativa*, en el escenario climático más extremo (2100), muestra una expansión hacia zonas de mayor elevación y latitudes más bajas, por debajo de los 37°S (Figura 64, Anexo 2).

En cuanto a las especies de hábito de crecimiento herbáceo, se pueden observar patrones diferenciados dependiendo de la familia taxonómica a la que pertenecen. En el caso de la familia Aizoaceae, representada por especies como *Mesembryanthemum crystallinum*, se observa una mayor probabilidad de presencia en zonas costeras del norte de Chile. Sin embargo, para el año 2100 se espera un aumento en la idoneidad climática hacia la zona central, alrededor de los 35°S (Figura 2, Anexo 2).

En cuanto a la familia Apiaceae (*Conium maculatum*), Apocynaceae (*Vinca major*), Asteraceae (*T. officinale*, *Cirsium arvense*, entre otras), Boraginaceae (*Echium vulgare*), Brassicaceae (*Lobularia marítima*) y Caryophyllaceae (*Cerastium arvense*), se observa un incremento en la idoneidad climática hacia latitudes más altas y zonas de mayor elevación para el año 2100 (Figura 4, 6, 11, 18, 25). También se evidencia un aumento en la probabilidad de ocurrencia para estas especies en las zonas costeras,

principalmente desde la zona central hasta el norte de Chile, tanto para el año 2040 como para el 2100. Es importante destacar que tanto para el año 2040 como para el 2100 se observa una pérdida de idoneidad climática en el valle, especialmente en la zona centro y centro-sur de Chile. La idoneidad climática se concentra principalmente en las zonas costeras y la cordillera de los Andes.

Hay que tener en consideración que muchas de las plantas exóticas no presentan una distribución potencial muy amplia en Chile, y solo se concentran dentro de la zona central de Chile Como es el caso de *Anthriscus caucalis* (Figura 3, Anexo 2) *Centaurea melitensis* (Figura 10, Anexo 2), *Cynara cardunculus* (Figura 12, Anexo 2), *Erodium cicutarium* (Figura 41, Anexo 2), *Lamium amplexicaule* (Figura 45, Anexo 2), *Fumaria agraria* (Figura 55, Anexo 2) y *Briza minor* (Figura 65, Anexo 2),

Porcentajes de cambio de rango de las especies no-nativas con el cambio climático

En cuanto al porcentaje de cambio de rango de las formas de crecimiento evidencio que en promedio todas las formas de crecimiento aumentan su distribución para el año 2040 y 2100. Sin embargo al comparar el año 2040 con el 2100 tanto los árboles como las hierbas la prueba t muestra que el porcentaje de cambio no varía significativamente (Figura 2). Mientras que las gramíneas se observa un menor porcentaje de cambio para el año 2100 (48.74%) comparado con el año 2040 (55.18%). Solo para las especies arbustivas el porcentaje de cambio es mayor para el año 2100 (Figura 2).

A nivel de especies se determinó que 47 especies de las 88 plantas exóticas aumentan en algún porcentaje su distribución al año 2100, de las cuales solo 9 especies superan en un 20% el porcentaje ganado en distribución, las cuales son *Anthriscus caucalis* (Figura 3, Anexo 2), *Ranunculus repens* (Figura 74, Anexo 2), *Lamium amplexicaule* (Figura 45, Anexo 2), *Verbascum thapsus* (Figura 81, Anexo 2), *Euphorbia lathyris* (Figura 28, Anexo 2), *Ricinus communis* (Figura 30, Anexo 2), *Alnus glutinosa* (Figura 19, Anexo 2), *Foeniculum vulgare* (Figura 5, Anexo 2) y *Verbascum virgatum* (Figura 82, Anexo 2).

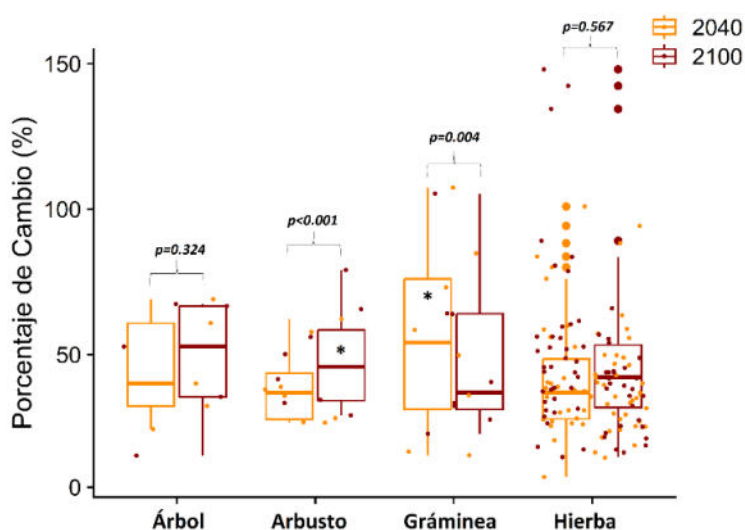


Figura 2. Porcentaje de cambio (ganancia de pixeles con idoneidad climática) bajo los dos escenarios de cambio climático al año 2040 y 2100 para cada forma de crecimiento.

4.- DISCUSIÓN



Los resultados obtenidos muestran de manera general que las plantas exóticas no nativas tienden a redistribuirse hacia latitudes más altas, zonas de mayor elevación en los Andes y áreas costeras, principalmente en las regiones central y norte de Chile, tanto para el año 2040 como para el año 2100.

Estos resultados confirman que la presencia de especies exóticas tiende a expandirse hacia zonas de mayor elevación, ya que las condiciones climáticas en las áreas de menor altitud, como el valle central, serían demasiado extremas para que estas especies puedan establecerse. Este patrón se explica en gran medida por el origen biogeográfico de la mayoría de las especies exóticas, que provienen principalmente de ecosistemas templados y fríos de Europa (Alexander et al. 2016, Fuentes et al. 2019). Por lo tanto, estas especies presentan una mayor idoneidad climática en entornos más fríos. Por otro lado, las especies con un origen biogeográfico más asociado a ecosistemas mediterráneos e incluso desérticos muestran una mayor idoneidad climática hacia latitudes más bajas, como la zona central y norte de Chile. Bajo este contexto, se ha demostrado que las especies adaptadas a condiciones climáticas más extremas responden de manera más intensa al efecto del cambio climático (Iseli et al. 2023).

En la actualidad, hay pocos estudios en Chile que evalúen la distribución potencial de múltiples especies en escenarios de cambio climático. No obstante, investigaciones recientes han determinado patrones de distribución para algunas especies exóticas como *T. officinale* y *U. europaeus* bajo un escenario de cambio climático proyectado para el año 2050. En este escenario, se observa que la presencia de estas plantas se concentra en zonas de mayor elevación en la cordillera de los Andes y en los ecosistemas patagónicos (Hernández-Labraño et al. 2016). Estos patrones también se han observado en plantas exóticas de los Alpes, donde se ha evidenciado que para el año 2100 las especies exóticas tienden a seguir el rastro del cambio climático hacia áreas de mayor elevación (Petitpierre et al. 2016).

Es importante tener en cuenta que los estudios de distribución potencial de especies exóticas solo consideran el aspecto climático al identificar las áreas probables de expansión en escenarios climáticos futuros. Sin embargo, es necesario considerar que el área potencial de expansión podría ser aún mayor si se tienen en cuenta otros factores, especialmente las actividades antropogénicas, que pueden modificar las condiciones climáticas y aumentar la probabilidad de establecimiento de especies exóticas (Fuente-Lillo et al. 2021).

Varios estudios han evidenciado que las variables antropogénicas, como la presencia de carreteras, la distancia a asentamientos humanos, la presencia de ganado y los senderos, desempeñan un papel fundamental en la distribución de especies exóticas. Estas variables son impulsores importantes para comprender el establecimiento y la dispersión de especies exóticas (Lembrechts et al. 2016; Fuentes-Lillo et al. 2021). Para mejorar la precisión de los modelos de distribución de especies, se ha incorporado información sobre variables antropogénicas. Por ejemplo, se ha utilizado el índice de huella humana, que ha demostrado ser especialmente útil para modelar especies invasoras a escalas pequeñas, como a nivel regional o local (Requena-Mullor et al. 2019; Bazzichetto et al. 2021).

Estudios han demostrado que la inclusión de variables antropogénicas, junto con variables climáticas, mejora significativamente la capacidad de los modelos para predecir la distribución de especies invasoras. La influencia de los factores antropogénicos puede variar espacialmente. A escala global, se ha encontrado que las variables humanas ocupan un cuarto lugar en importancia después de variables macroclimáticas, como el rango de temperatura anual, la temperatura media anual e incluso el potencial de evapotranspiración, al explicar la distribución potencial de especies invasoras (Wan y Wang, 2018). Sin embargo, a escalas regionales o locales, se ha demostrado que las variables



humanas, como el índice de huella humana, ocupan el segundo lugar en importancia después de las variables bioclimáticas al explicar la distribución de especies invasoras (Wan et al. 2018).

Algunas especies herbáceas y gramíneas pueden tener un impacto relativamente menor en los ecosistemas, su expansión puede generar cambios significativos en los patrones de polinización de plantas nativas. Por ejemplo, especies como *T. officinale* y *H. radicata* pueden competir con plantas nativas por recursos y alterar los patrones de polinización (Muñoz & Cavieres 2008). Sin embargo, es importante prestar especial atención a algunas especies que se consideran problemáticas, como *A. dealbata*, *R. ulmifolius*, *R. rubiginosa*, *U. europaeus* y *M. crystallinum*.

Estas especies han demostrado una alta capacidad de expansión en escenarios de cambio climático, particularmente en zonas de mayor elevación cercanas a áreas protegidas, así como en los archipiélagos de Juan Fernández y Chiloé. Su presencia puede ser especialmente problemática, ya que una vez que invaden, reducen significativamente la riqueza de especies nativas (Fuentes-Ramírez et al. 2010). Además, estas especies pueden ser extremadamente difíciles de controlar y manejar. Por lo tanto, la única opción viable de manejo es mantener bajo control su densidad poblacional con el fin de reducir sus impactos negativos (Moyano et al. 2023).

La invasión de plantas exóticas en las islas, como por ejemplo la invasión de *M. crystallinum* en isla Choros, y *A. dealbata* y *U. europaeus* en la isla Grande de Chiloé y Juan Fernández es especialmente peligrosa debido a su fragilidad y su aislamiento geográfico lo que hace que estas sean especialmente vulnerables a los impactos de las especies exóticas (Kueffer et al. 2010). Cuando una especie exótica invade una isla, puede tener un impacto devastador en la biodiversidad y los ecosistemas locales. Estas especies a menudo carecen de depredadores naturales o competidores, lo que les permite reproducirse y propagarse sin control. Como resultado, pueden desplazar o incluso extinguir a las especies nativas, causando una pérdida irreversible de biodiversidad. Esto ha sido documentado para la especie *M. crystallinum*, donde su presencia genera aumentos en los niveles de salinidad lo que produce una disminución de la germinación de plantas nativas en la isla Choros (De la Cruz et al. 2023). Mientras que la presencia de *U. europaeus* genera importantes impactos sobre la diversidad de plantas nativas en estos ecosistemas (Hernández-Lambraño et al. 2016).

Dado que las islas suelen ser espacios limitados y aislados, la erradicación o el control de especies invasoras puede ser extremadamente difícil y costoso. Además, las islas suelen tener recursos limitados para hacer frente a estos desafíos, lo que dificulta aún más la gestión de las invasiones biológicas. Exactamente, la prevención de la llegada de especies exóticas a las islas de Chile es de vital importancia para evitar impactos futuros asociados a su posible expansión debido al cambio climático. La generación de modelos de distribución que consideren diferentes escenarios de cambio climático es una herramienta valiosa para identificar y generar listas de especies exóticas que aún no están presentes en estas islas, pero que podrían establecerse en base a condiciones climáticas favorables.

Estos modelos permiten anticiparse a los posibles cambios en la idoneidad climática de las especies exóticas y evaluar su potencial de establecimiento en los ecosistemas insulares. Al identificar las especies que podrían convertirse en futuras invasoras, se pueden implementar estrategias de prevención y control temprano para evitar su introducción y propagación.

La generación de listas negras de especies exóticas potenciales es una medida proactiva para proteger la biodiversidad y los ecosistemas de las islas. Estas listas pueden servir como base para la implementación de programas de bioseguridad, que incluyan medidas de control en los puntos de entrada y acciones para prevenir la introducción accidental de especies exóticas en las islas.



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Considerando que la mayoría de las especies exóticas bajo escenarios de cambio climático se redistribuirán hacia áreas protegidas, la gestión adecuada de estas especies invasoras es esencial para preservar la integridad de los ecosistemas y la biodiversidad nativa. Se deben implementar estrategias de control y manejo efectivas, junto con programas de monitoreo y seguimiento, para mitigar los impactos de estas especies y evitar su expansión descontrolada en áreas sensibles (Fulgêncio-Lima et al. 2021).

5.- CONCLUSIONES

Un porcentaje significativo de especies exóticas se redistribuirá hacia zonas de alta elevación y latitudes altas en los escenarios optimista y severo de cambio climático. Esto podría permitir que un mayor número de especies colonice áreas de alta elevación, donde se encuentran ubicadas las áreas protegidas.

En particular, las especies arbustivas experimentarán el mayor cambio en la idoneidad climática en el escenario de cambio climático severo para el año 2100. Por otro lado, se espera que las especies de gramíneas sufran en promedio una reducción en el área de idoneidad climática en comparación con el escenario climático para el año 2040 en un escenario severo de cambio climático.

Es relevante tener en cuenta que algunas especies exóticas tienen una alta probabilidad de establecerse en ecosistemas insulares, especialmente en la isla Grande de Chiloé y en las islas de Juan Fernández. En este sentido, estos resultados podrían ser útiles para identificar las áreas con mayor susceptibilidad a la invasión y para elaborar una lista de las especies exóticas más probables de establecerse en estos ecosistemas.

Asumiendo que los futuros escenarios de cambio climático generaran la redistribución de plantas exóticas a las áreas protegidas la implementación de las siguientes estrategias podría ayudar a prevenir la llegada de plantas exóticas principalmente de las especies más vulnerables al cambio climático (Anexo 3) y proteger la biodiversidad nativa:

(I) **Monitoreo y detección temprana:** Establecer programas de monitoreo regular para detectar la presencia de especies exóticas invasoras en las áreas protegidas. Esto permite identificar y responder rápidamente ante nuevas introducciones, evitando su establecimiento y propagación.

(II) **Control de vectores:** Controlar y regular el acceso de visitantes, vehículos y embarcaciones a las áreas protegidas, ya que estos pueden actuar como vectores de dispersión de especies exóticas. Implementar medidas de bioseguridad en los puntos de entrada, como inspecciones de equipaje y limpieza de calzado y equipo, para prevenir la introducción accidental de semillas.

(III) **Educación y concienciación:** Realizar campañas educativas dirigidas a visitantes, comunidades locales y personal de las áreas protegidas para fomentar la comprensión sobre los riesgos de las especies exóticas y la importancia de su prevención.

(IV) **Restricción de actividades humanas:** Regular y limitar actividades que puedan promover la introducción o propagación de especies exóticas. Controlar el uso de senderos, camping y otras infraestructuras para evitar la dispersión de semillas y la perturbación de hábitats.

(V) **Restauración y manejo de hábitats:** Realizar acciones de restauración ecológica en áreas afectadas por especies exóticas invasoras. Esto puede incluir la eliminación y control de poblaciones de especies invasoras, así como la reintroducción de especies nativas. El manejo adecuado de hábitats también puede ayudar a minimizar la propagación de especies exóticas y restaurar la diversidad y funcionalidad de los ecosistemas.



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



(VI) **Cooperación y colaboración:** Fomentar la colaboración entre diferentes entidades, como organizaciones gubernamentales, científicas, comunidades locales y organizaciones sin fines de lucro, para implementar estrategias de prevención de especies exóticas de manera coordinada y eficaz. Compartir información, recursos y mejores prácticas puede fortalecer los esfuerzos de prevención y control.

6.- ANÁLISIS DE BRECHAS

1. **Definición del objetivo:** El objetivo es analizar la distribución potencial de plantas exóticas invasoras en Chile, considerando diferentes formas de crecimiento, como árboles, arbustos, gramíneas y hierbas, bajo dos escenarios de cambio climático. El primer escenario corresponde al año 2040, el cual se considera optimista en términos de mitigación del cambio climático, mientras que el segundo escenario representa un cambio climático irreversible proyectado para el año 2100.
2. **Evaluación de la situación actual:** En la actualidad, Chile alberga aproximadamente 1.122 especies exóticas naturalizadas en su territorio. De estas, 790 son plantas vasculares terrestres y acuáticas. La mayoría de estas plantas exóticas invasoras se concentran en la zona central y sur del país, específicamente entre los 30° y 40° de latitud sur. A medida que nos desplazamos hacia el norte de Chile y hacia los ecosistemas patagónicos, se observa una disminución en la diversidad de plantas exóticas. Se ha identificado un patrón similar bajo gradientes de elevación, donde la mayor riqueza de plantas exóticas se encuentra en las zonas costeras y en aquellas de menor altitud. Estos patrones se explican principalmente debido al aumento en la severidad climática a medida que se aumenta o disminuye la latitud y la altitud.

Es importante destacar que la concentración de plantas exóticas invasoras en la zona central y en áreas de menor elevación se debe en gran parte a la presencia de actividades económicas y perturbaciones antropogénicas. Estas actividades incrementan la propagación de las especies exóticas y modifican las condiciones abióticas, lo cual favorece su establecimiento y dispersión. Bajo este contexto, es importante considerar que al hablar de invasiones biológicas, la distribución actual y futura de las especies exóticas no abarcará todos los nichos disponibles. Esto se debe principalmente a que su tiempo de residencia es menor en comparación con las especies nativas. Por lo tanto, al evaluar su distribución en escenarios climáticos actuales, los resultados nos ofrecen una indicación de la idoneidad climática potencial de estas especies. En el caso de las plantas exóticas invasoras en Chile, los resultados revelan que su distribución potencial tiende a concentrarse principalmente en la zona mediterránea y templada del país, que abarca las latitudes entre 30° y 43°S. Por otro lado, se observa una menor idoneidad climática en latitudes bajas, como las zonas desérticas, y en latitudes altas, como la Patagonia. Estos hallazgos sugieren que las condiciones climáticas de la zona mediterránea y templada de Chile brindan un entorno favorable para el establecimiento y la propagación de las plantas exóticas invasoras. Sin embargo, es importante tener en cuenta que otros factores, como la interacción con las especies nativas, la disponibilidad de hábitats adecuados y las actividades humanas, también pueden influir en la distribución y el impacto de estas especies.

3. **Identificación de brechas:** Al comparar la distribución potencial actual frente a los distintos escenarios de cambio climático, nos damos cuenta de que para las 4 formas de crecimiento existe una expansión de la idoneidad climática (Fig. 1) Este aumento de la idoneidad climática

especialmente se traduce en un aumento de la idoneidad climática hacia zonas de mayor latitud principalmente en ecosistemas patagónicos y especialmente en el archipiélago de Chiloé. Mientras que para el año 2100 los patrones varían según la forma de crecimiento, para el caso de los árboles y hierbas no hay diferencias significativas entre el año 2040 y 2100, lo que quiere decir que no hay un aumento significativo entre el área potencial de ocurrencia entre el escenario climático optimista y pesimista. Para el caso de los arbustos se observan diferencias significativas entre el año 2040 y 2100, indicando que en promedio los arbustos tenderán a presentar una mayor área potencial de idoneidad climática al año 2100 comparado con el año 2040. Finalmente, las gramíneas presentan un patrón de disminución del área potencial de idoneidad climática al año 2100 comparado con el año 2040. Bajo este contexto, se podría especular que las especies arbustivas tenderán a aumentar su área potencial de colonización bajo escenarios climáticos pesimistas de cambio climático. Mientras que las especies de gramíneas tenderán a disminuir su área potencial de colonización. Es crucial tener en cuenta que tanto en el año 2040 como en el 2100 se observan diferencias en cuanto al aumento o disminución del área potencial de colonización. Estos cambios estarán estrechamente relacionados con el impacto del cambio climático en la distribución potencial de las plantas exóticas invasoras, especialmente en zonas de alta elevación y latitud. La redistribución de estas especies invasoras hacia áreas de mayor elevación y latitud plantea una preocupación importante, ya que estas regiones albergan una gran cantidad de especies endémicas y una rica biodiversidad. Además, suelen ser áreas protegidas en mayor proporción. Por lo tanto, la presencia de estas especies invasoras en el futuro podría generar impactos significativos en los ecosistemas, potencialmente resultando en una pérdida considerable de biodiversidad. Es necesario tomar medidas preventivas y de control para evitar la expansión de las plantas exóticas invasoras y proteger los ecosistemas vulnerables. La gestión adecuada de estas especies se vuelve aún más relevante en el contexto del cambio climático, a fin de salvaguardar la integridad y la diversidad de los ecosistemas frente a posibles amenazas adicionales.

4. **Análisis de las causas:** Los procesos de aumento de la idoneidad climática hacia zonas de alta elevación y latitud por parte de las plantas exóticas se deben, en gran medida, al origen de muchas de estas especies invasoras que están colonizando Chile. Muchas de ellas provienen de ecosistemas fríos en el norte de Europa y Asia, lo que significa que están pre-adaptadas a condiciones climáticas más templadas. Por lo tanto, el aumento de la temperatura generado por el cambio climático ampliará su idoneidad hacia zonas más frías en los Andes y la Patagonia. Además, el aumento de la precipitación proyectado en los ecosistemas patagónicos y subantárticos bajo los escenarios de cambio climático también puede explicar por qué estas especies encuentran condiciones climáticas más favorables en comparación con la zona central de Chile, donde se espera una disminución significativa de la precipitación. Estos factores combinados contribuyen a la capacidad de adaptación y expansión de las especies exóticas invasoras en nuevos hábitats. Es importante tener en cuenta estos procesos y considerarlos en las estrategias de manejo y control de estas especies para evitar impactos negativos en los ecosistemas nativos y la biodiversidad. La comprensión de los patrones de idoneidad climática y la forma en que pueden cambiar en respuesta al cambio climático es esencial para tomar medidas efectivas de conservación y mitigación.

El aumento de la idoneidad hacia zonas costeras y el norte de Chile puede explicarse principalmente por la expansión de la idoneidad climática de especies provenientes de ecosistemas con climas desérticos y mediterráneos, como África, Egipto y Australia, entre



otros. Es fundamental tener en cuenta que el incremento de actividades antropogénicas, especialmente en áreas de mayor elevación y en ecosistemas patagónicos, puede aumentar aún más el área de distribución potencial de las plantas exóticas. Estas actividades humanas suelen aumentar la propagación de propágulos (por ejemplo, semillas o esporas) y pueden modificar las condiciones microclimáticas, lo que incrementa la probabilidad de establecimiento incluso en zonas que no se encuentren dentro del nicho climático de la especie exótica.

Es importante reconocer que las actividades humanas desempeñan un papel significativo en la introducción y propagación de especies exóticas invasoras. La vigilancia y el control de estas actividades, así como la educación y concienciación sobre los riesgos asociados con las especies exóticas invasoras, son aspectos clave para mitigar los impactos negativos en los ecosistemas y la biodiversidad nativa.

5. **Desarrollo de estrategias de cierre de brechas:** En base a los patrones de redistribución observados de las plantas exóticas invasoras, especialmente hacia zonas de mayor elevación, es crucial establecer protocolos de bioseguridad para prevenir la llegada y propagación de estas especies, especialmente dentro de áreas protegidas. Estos protocolos deben enfocarse en reducir las actividades humanas que podrían introducir o facilitar la dispersión de especies exóticas invasoras, como la minería, el senderismo o la apertura de centros de esquí, entre otros.

Además, es importante disminuir las perturbaciones humanas en estos ecosistemas, como la remoción de vegetación o el aumento de la red de senderos y caminos, ya que estas actividades pueden facilitar el acceso de especies de zonas más bajas hacia las zonas de alta elevación. La implementación de estrategias para prevenir la introducción y propagación de especies exóticas invasoras en estas áreas protegidas es fundamental para evitar la necesidad de costosas estrategias de manejo y control en el futuro, así como para prevenir el aumento de la densidad de estas especies en las zonas de mayor elevación.

El desarrollo y la aplicación de estas estrategias de prevención y bioseguridad son de gran importancia para proteger la integridad de los ecosistemas de alta elevación y preservar su biodiversidad. Asimismo, se debe promover la concienciación y educación sobre los riesgos asociados con las especies exóticas invasoras, involucrando a la comunidad local, los visitantes y las autoridades competentes en la implementación y cumplimiento de estos protocolos.

6. **Vacíos de información:** Si bien se han determinado distintos patrones de respuesta al cambio climático de plantas exóticas invasoras, es importante que solo se logró modelar la distribución potencial de solo un 15% de la totalidad de plantas exóticas invasoras terrestres y acuáticas, distintos motivos afectan los resultados obtenidos:

Primero existe un importante vacío en relación con la ocurrencia de plantas exóticas en Chile, a diferencia de las plantas nativas, en general las especies exóticas generalmente no son el foco de estudio de muchos botánicos, por lo tanto, aun no existe una sistematización en la toma de datos asociados a la presencia de plantas exóticas. Solo 88 plantas exóticas superaban los 100 registros de ocurrencia, de estas especies 67 correspondían a especies herbáceas, 8 a gramíneas, 8 arbustos y solo 5 a árboles.



Centro UC
Cambio Global



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Otro factor de suma importancia para tener en cuenta es la escasez de información relacionada con el año de introducción de las plantas exóticas. En muchos casos, desconocemos el momento preciso en que estas plantas fueron introducidas en el país, y en ocasiones su introducción es relativamente reciente. Esto nos lleva a tener una cantidad limitada de información sobre su presencia en el territorio, así como también la ausencia de estudios que informen acerca de los posibles impactos que estas especies pueden generar en la biodiversidad. Bajo este contexto, al no tener información sobre los actuales impactos de las plantas exóticas es difícil predecir cuales serían los potenciales impactos de las plantas exóticas al redistribuirse bajo un escenario de cambio climático.

Históricamente, los modelos de distribución de especies se han basado en datos climáticos, generalmente macroclimáticos. Si bien el uso de estos datos proporciona una aproximación adecuada de la distribución potencial de las plantas exóticas, en el caso de Chile, se presenta una topografía compleja, especialmente en los ecosistemas de montaña. Esto significa que estas capas a escala más gruesa logran capturar la variabilidad climática en estas áreas. Por esta razón, el uso de datos microclimáticos (escala más fina) permitiría mejorar las proyecciones de distribución de plantas exóticas bajo escenarios de cambio climático. La incorporación de datos a escala fina tendría dos beneficios principales. Por un lado, ayudaría a reducir la sobreestimación de la distribución potencial que se genera con los datos a escala más gruesa, lo cual es especialmente relevante en áreas montañosas donde las condiciones climáticas pueden variar significativamente en distancias cortas. y en segundo lugar permitiría identificar con mayor precisión las áreas más vulnerables a ser invadidas por especies exóticas.

Por último, es crucial tener en cuenta la importancia de las actividades antropogénicas en la distribución de las plantas exóticas. Estas actividades no solo son agentes que contribuyen a modificar las condiciones microclimáticas, favoreciendo el establecimiento de plantas exóticas, sino que también desempeñan un papel fundamental en la inclusión de estas actividades dentro de los modelos de distribución de plantas exóticas. Esto es especialmente relevante para obtener proyecciones más precisas de la distribución futura de las plantas exóticas. Es importante considerar que los escenarios futuros de cambio global indican un aumento en las actividades humanas, lo que implica cambios significativos en el uso del suelo, un incremento en la densidad poblacional y un mayor desarrollo de infraestructura en áreas remotas, como los ecosistemas de montaña, la Patagonia y los ecosistemas costeros. Estos cambios en el paisaje y las condiciones ambientales ofrecen oportunidades para la introducción y expansión de especies exóticas.

Por lo tanto, incluir las actividades humanas en los modelos de distribución de plantas exóticas resulta crucial para comprender y predecir de manera más precisa cómo estas especies se distribuirán en el futuro. Esto permitirá tomar medidas de manejo y conservación más efectivas, especialmente considerando el aumento esperado de las actividades humanas y su impacto en los ecosistemas naturales.

En resumen, para mejorar las predicciones de la distribución potencial de plantas exóticas, es fundamental:



1. Sistematizar los registros de ocurrencia, tanto en bases de datos como en herbarios. Especial atención debe darse a las especies de árboles exóticos, que son los que tienen menor cantidad de registros y generan mayores impactos en los ecosistemas invadidos.
2. Incluir datos microclimáticos y antropogénicos en los modelos de distribución. Esto permitirá obtener patrones más precisos y modelos más sólidos, lo que nos ayudará a tomar decisiones más informadas al desarrollar estrategias de bioseguridad, control y manejo de plantas exóticas.
3. Es crucial incrementar los estudios sobre los impactos de las plantas exóticas en los ecosistemas. Actualmente, existe una falta de información sustancial sobre los efectos que estas especies están generando en los ecosistemas donde se han establecido. Es fundamental comprender estos impactos para tener una idea más clara de los posibles efectos que tendrán las plantas exóticas al redistribuirse hacia otros ecosistemas. El conocimiento de los impactos actuales de las plantas exóticas nos brinda una base sólida para prever y evaluar los posibles efectos futuros de estas especies invasoras. Al obtener una comprensión más completa de cómo las plantas exóticas afectan la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos, podremos tomar decisiones más informadas sobre la gestión y el control de estas especies.

Por lo tanto, es esencial promover y financiar investigaciones científicas que aborden los impactos de las plantas exóticas. Esto nos permitirá recopilar datos valiosos y desarrollar estrategias de manejo y conservación más efectivas para prevenir y mitigar los impactos negativos de las plantas exóticas en los ecosistemas.

4. Según la literatura este es uno de los primeros estudios que evalúa el efecto del cambio climático sobre la distribución de plantas exóticas en Chile, es por esto que los resultados deben tomarse con cuidado al momento de tomar decisiones de manejo ya que estos resultados están sujetos a los escasos de datos de ocurrencia.



7.- BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, J. M., Lembrechts, J. J., Cavieres, L. A., Daehler, C., Haider, S., Kueffer, C., ... & Seipel, T. (2016). Plant invasions into mountains and alpine ecosystems: current status and future challenges. *Alpine Botany*, 126, 89-103.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic.
- Anderson, J. T., Panetta, A. M., & Mitchell-Olds, T. (2012). Evolutionary and ecological responses to anthropogenic climate change: update on anthropogenic climate change. *Plant physiology*, 160(4), 1728-1740.
- Arroyo, M. T., & Cavieres, L. A. (2013). High-elevation Andean ecosystems.
- Bazzichetto, M., Massol, F., Carboni, M., Lenoir, J., Lembrechts, J. J., Joly, R., and Renault, D. (2021). Once upon a time in the far south: Influence of local drivers and functional traits on plant invasion in the harsh sub-Antarctic islands. *Journal of Vegetation Science*, 32(4), e13057.
- Carboni, M., Gueguen, M., Barros, C., Georges, D., Boulangeat, I., Douzet, R., ... & Thuiller, W. (2018). Simulating plant invasion dynamics in mountain ecosystems under global change scenarios. *Global Change Biology*, 24(1), e289-e302.
- De La Cruz, H. J., Salgado-Luarte, C., Stotz, G. C., & Gianoli, E. (2023). An exotic plant species indirectly facilitates a secondary exotic plant through increased soil salinity. *Biological Invasions*, 1-13.
- Figueroa, J. A., Castro, S. A., Marquet, P. A., & Jaksic, F. M. (2004). Exotic plant invasions to the mediterranean region of Chile: causes, history and impacts. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(3), 465-483.
- Fuentes, N., Marticorena, A., Saldaña, A., Jerez, V., Carlos Ortiz, J., Victoriano, P., ... & Pauchard, A. (2020). Multi-taxa inventory of naturalized species in Chile. *NeoBiota*, (60).
- Fuentes, N., Pauchard, A., Sánchez, P., Esquivel, J., & Marticorena, A. (2013). A new comprehensive database of alien plant species in Chile based on herbarium records. *Biological Invasions*, 15, 847-858.
- Fuentes, N., Saldaña, A., Kühn, I., & Klotz, S. (2015). Climatic and socio-economic factors determine the level of invasion by alien plants in Chile. *Plant Ecology & Diversity*, 8(3), 371-377.
- Fuentes-Lillo, E., & Pauchard, A. (2019). Invasions in mountains: How much have we advanced in the last 10 years and what are the challenges for the ecosystems of the Andes?. *Gayana Botánica*, 76(2), 141-144.
- Fuentes-Lillo, E., Lembrechts, J. J., Cavieres, L. A., Jiménez, A., Haider, S., Barros, A., & Pauchard, A. (2021). Anthropogenic factors overrule local abiotic variables in determining non-native plant invasions in mountains. *Biological Invasions*, 23, 3671-3686.
- Fuentes-Ramírez, A., Pauchard, A., Marticorena, A., & Sánchez, P. (2010). Relación entre la invasión de *Acacia dealbata* Link (Fabaceae: Mimosoideae) y la riqueza de especies vegetales en el centro-sur de Chile. *Gayana Botánica*, 67(2), 188-197.
- Fulgêncio-Lima, L. G., Andrade, A. F. A., Vilela, B., Lima-Júnior, D. P., de Souza, R. A., Sgarbi, L. F., ... & Silva, D. P. (2021). Invasive plants in Brazil: climate change effects and detection of suitable areas within conservation units. *Biological Invasions*, 23, 1577-1594.
- Gallien, L., Münkemüller, T., Albert, C. H., Boulangeat, I., & Thuiller, W. (2010). Predicting potential distributions of invasive species: where to go from here?. *Diversity and Distributions*, 16(3), 331-342.
- Hernández-Lambraño, R. E., González-Moreno, P., & Sánchez-Agudo, J. Á. (2017). Towards the top: niche expansion of *Taraxacum officinale* and *Ulex europaeus* in mountain regions of South America. *Austral Ecology*, 42(5), 577-589.



- Iseli, E., Chisholm, C., Lenoir, J., Haider, S., Seipel, T., Barros, A., ... & Alexander, J. M. (2023). Rapid upwards spread of non-native plants in mountains across continents. *Nature ecology & evolution*, 7(3), 405-413.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., ... & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific data*, 4(1), 1-20.
- Klöner, G., Dullinger, I., Wessely, J., Bossdorf, O., Carboni, M., Dawson, W., ... & Dullinger, S. (2017). Will climate change increase hybridization risk between potential plant invaders and their congeners in Europe?. *Diversity and Distributions*, 23(8), 934-943.
- Kueffer, C., Daehler, C. C., Torres-Santana, C. W., Lavergne, C., Meyer, J. Y., Otto, R., & Silva, L. (2010). A global comparison of plant invasions on oceanic islands. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 12(2), 145-161.
- Lembrechts, J. J., Pauchard, A., Lenoir, J., Nuñez, M. A., Geron, C., Ven, A., ... & Milbau, A. (2016). Disturbance is the key to plant invasions in cold environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(49), 14061-14066.
- Linders, T. E. W., Schaffner, U., Eschen, R., Abebe, A., Choge, S. K., Nigatu, L., ... & Allan, E. (2019). Direct and indirect effects of invasive species: Biodiversity loss is a major mechanism by which an invasive tree affects ecosystem functioning. *Journal of Ecology*, 107(6), 2660-2672.
- Luebert Bruron, F. J., & Pliscoff, P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile 2a.
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., ... & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate dynamics*, 38, 1829-1848.
- Moyano, J., Zamora-Nasca, L. B., Caplat, P., Díaz, P. G., Langdon, B., Lambin, X., ... & Nuñez, M. A. (2023). Predicting the impact of invasive trees from different measures of abundance. *Journal of Environmental Management*, 325, 116480.
- Muñoz, A. A., & Cavieres, L. A. (2008). The presence of a showy invasive plant disrupts pollinator service and reproductive output in native alpine species only at high densities. *Journal of Ecology*, 96(3), 459-467.
- Nezer, O., Bar-David, S., Gueta, T., & Carmel, Y. (2017). High-resolution species-distribution model based on systematic sampling and indirect observations. *Biodiversity and Conservation*, 26, 421-437.
- O'Donnell, J., Gallagher, R. V., Wilson, P. D., Downey, P. O., Hughes, L., & Leishman, M. R. (2012). Invasion hotspots for non-native plants in Australia under current and future climates. *Global Change Biology*, 18(2), 617-629.
- Pauchard, A., Kueffer, C., Dietz, H., Daehler, C. C., Alexander, J., Edwards, P. J., ... & Seipel, T. (2009). Ain't no mountain high enough: plant invasions reaching new elevations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(9), 479-486.
- Pauchard, A., Milbau, A., Albiñ, A., Alexander, J., Burgess, T., Daehler, C., ... & Kueffer, C. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biological Invasions*, 18, 345-353.
- Peña-Gómez, F. T., Guerrero, P. C., Bizama, G., Duarte, M., & Bustamante, R. O. (2014). Climatic niche conservatism and biogeographical non-equilibrium in *Eschscholzia californica* (Papaveraceae), an invasive plant in the Chilean Mediterranean region. *PLoS One*, 9(8), e105025.
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., & Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. *Ecological Applications*, 26(2), 530-544.
- Pyšek, P., & Richardson, D. M. (2010). Invasive species, environmental change and management, and health. *Annual review of environment and resources*, 35, 25-55.



- Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., ... & Richardson, D. M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95(6), 1511-1534.
- Pyšek, P., Jarošík, V., Hulme, P. E., Pergl, J., Hejda, M., Schaffner, U., & Vilà, M. (2012). A global assessment of invasive plant impacts on resident species, communities and ecosystems: the interaction of impact measures, invading species' traits and environment. *Global Change Biology*, 18(5), 1725-1737.
- Quiroz, C. L., Pauchard, A., Cavieres, L. A., & Anderson, C. B. (2009). Análisis cuantitativo de la investigación en invasiones biológicas en Chile: tendencias y desafíos. *Revista chilena de historia natural*, 82(4), 497-505.
- Rangelcroft, S., Harrison, S., Anderson, K., Magrath, J., Castel, A. P., & Pacheco, P. (2013). Climate change and water resources in arid mountains: an example from the Bolivian Andes. *Ambio*, 42, 852-863.
- Requena-Mullor, J. M., Maguire, K. C., Shinneman, D. J., and Caughlin, T. T. (2019). Integrating anthropogenic factors into regional-scale species distribution models—A novel application in the imperiled sagebrush biome. *Global Change Biology*, 25(11), 3844-3858.
- Seebens, H., Blackburn, T. M., Dyer, E. E., Genovesi, P., Hulme, P. E., Jeschke, J. M., ... & Essl, F. (2017). No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature communications*, 8(1), 14435.
- Seebens, H., Essl, F., Dawson, W., Fuentes, N., Moser, D., Pergl, J., ... & Blasius, B. (2015). Global trade will accelerate plant invasions in emerging economies under climate change. *Global change biology*, 21(11), 4128-4140.
- Seipel, T., Kueffer, C., Rew, L. J., Daehler, C. C., Pauchard, A., Naylor, B. J., ... & Walsh, N. (2012). Processes at multiple scales affect richness and similarity of non-native plant species in mountains around the world. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2), 236-246.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology letters*, 10(12), 1115-1123.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(supplement_2), 19644-19650.
- Teller, B. J., Zhang, R., & Shea, K. (2016). Seed release in a changing climate: initiation of movement increases spread of an invasive species under simulated climate warming. *Diversity and Distributions*, 22(6), 708-716.
- Thuiller, W., Georges, D., Engler, R., Breiner, F., Georges, M. D., & Thuiller, C. W. (2016). Package 'biomod2'. *Species distribution modeling within an ensemble forecasting framework*.
- Václavík, T., & Meentemeyer, R. K. (2012). Equilibrium or not? Modelling potential distribution of invasive species in different stages of invasion. *Diversity and Distributions*, 18(1), 73-83.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & González, P. (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical research letters*, 33(13).
- Wan, J. Z., and Wang, C. J. (2018). Expansion risk of invasive plants in regions of high plant diversity: A global assessment using 36 species. *Ecological Informatics*, 46, 8-18.
- Wan, J. Z., Wang, C. J., and Yu, F. H. (2018). Human footprint and climate disappearance in vulnerable ecoregions of protected areas. *Global and Planetary Change*, 170, 260-268.
- Wan, J. Z., Zhang, Z. X., and Wang, C. J. (2018). Identifying potential distributions of 10 invasive alien trees: implications for conservation management of protected areas. *Environmental monitoring and assessment*, 190(12), 1-15.