



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**FACTORES ANTROPOGÉNICOS QUE EXPLICAN LA DISTRIBUCIÓN DE  
PLANTAS EXÓTICAS EN GRADIENTES ALTITUDINALES DE LA  
CORDILLERA DE LOS ANDES.**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de  
Concepción para otorgar al título profesional Ingeniera en Conservación de  
Recursos Naturales

Por: Francisca Ortega Poblete

Profesor Guía: Rafael García Araya

Marzo, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Francisca Soledad Amanda Ortega Poblete

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

FACTORES ANTROPOGÉNICOS QUE EXPLICAN LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS  
EXÓTICAS EN GRADIENTES ALTITUDINALES DE LA CORDILLERA DE LOS  
ANDES.



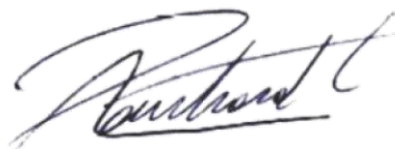
Profesor Guía

---

Rafael Andrés García Araya

Colaborador Académico

Ingeniero Forestal, Dr.



Profesor Guía

---

Aníbal Pauchard Cortes

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, Dr.



Profesor Guía

---

Eduardo Fuentes Lillo

Colaborador Externo

Ingeniero en Biotecnología Vegetal, Dr.

## **DEDICATORIA**

A Carola y Ricardo, mis padres.

A Sara, mi hermana.

A Rodrigo y Nicolás.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todos los profesores y auxiliares de la facultad que hicieron de esta experiencia un aprendizaje grato y enriquecedor.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
METODOLOGÍA	6
RESULTADOS	17
DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES	31
GLOSARIO	32
BIBLIOGRAFÍA	34

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de modelos lineales generalizados mixtos para la riqueza de especies exóticas.....	23
Tabla 2. Tabla de modelos lineales generales mixtos para la abundancia de especies exóticas.....	27

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ejemplo de las 12 carreteras en el paisaje, según sus regiones.	7
Figura 2. Esquema del diseño de muestreo MIREN.	14
Figura 3. Gráfico de riqueza de especies exóticas a lo largo de cuatro zonas de estudio.	18
Figura 4. Gráfico de patrones de riqueza de especies, según distancia del transecto a asentamientos humanos.	19
Figura 5. Gráfico de patrones elevacionales de riqueza de especies exóticas, según la distancia del plot a la carretera.	20
Figura 6. Representación gráfica de la riqueza de especies exóticas y su patrón de aumento-disminución por clase de cobertura uso de suelo en la zona central y sur.	21
Figura 7. Representación gráfica de la riqueza de especies exóticas y su patrón de aumento-disminución por clase de cobertura uso de suelo en la zona centro- sur y subantártica.	22
Figura 8. Gráfico de abundancia de especies exóticas a lo largo de las cuatro zonas estudiadas, según el índice de huella humana.	24
Figura 9. Gráfico de patrones de abundancia de especies exóticas en las cuatro zonas de estudio según distancia del transecto a asentamientos humanos.	25
Figura 10. Gráfico de patrones elevacionales de abundancia de especies exóticas, según la distancia del plot a la carretera.	26

## RESUMEN

La mayor parte de los estudios sobre especies invasoras se realiza en lugares más accesibles del territorio, prestando poca atención a lo que sucede en lugares remotos como los ecosistemas de montaña, sin embargo, en el 2005 se creó la Red de Investigación de invasiones de montaña (MIREN) para estudiar a nivel global las invasiones en sitios con mayor gradiente altitudinal y evaluar la importancia de los factores que facilitan esta invasión. En esta habilitación profesional se analizaron los muestreos de vegetación realizados en 12 caminos distribuidas en 4 regiones de Chile (Central, Centro-sur, Sur y Subantártica) con el protocolo MIREN. Se hipotetizó que la cercanía a los asentamientos humanos son la principal vía de dispersión que poseen los propágulos de especies exóticas para establecerse en regiones montañosas. De los resultados de este trabajo se desprende que el incremento del turismo, la presencia de senderos y cercanía a asentamientos humanos en ecosistemas montañosos remotos facilitan la colonización y establecimiento de especies invasoras, siendo las variables más significativas, el índice de huella humana, distancia asentamiento humanos y cercanía al camino.

Palabras Claves: Cordillera de los Andes, especies exóticas, gradiente altitudinal, propágulos, perturbación, cambio climático.

## **ABSTRACT**

The most common studies on invasive species are carried out in more accessible parts of the territory, paying little attention to what happens in remote places such as mountain ecosystems. However, in 2005 the Mountain Invasion Research Network (MIREN) was created to study invasions at a global level in places with a greater altitudinal gradient and to evaluate the importance of the factors that facilitate this invasion. In the following research, sampling was carried out on 12 roads distributed in 4 regions of Chile (Central, Central-South, South and Subantarctic) with the t-Mirentrail protocol, where 20 transects with 3 plots each were carried out along these roads. The presence of human settlements is the main dispersal route for propagules of exotic species to establish themselves in mountainous regions. This work suggests that the increase in tourism, the presence of trails and proximity to human settlements in remote mountain ecosystems facilitate the colonization and establishment of invasive species.

**Key words:** Andean Cordillera, exotic species, altitudinal gradient, propagules, disturbance, climate change.

## I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas montañosos tienen una extensión aproximada de 3.371 millones de kilómetros cuadrados a nivel global (Arroyo & Cavieres, 2013). Estos ecosistemas son de gran importancia para el ser humano y la biodiversidad. Dentro de las 36 zonas definidas como prioritarias por su alto porcentaje de biodiversidad y endemismo, al menos 18 se encuentran en zonas montañosas (Díaz & Villalobos, 2020). Estos hotspots de biodiversidad nos proveen de valiosos servicios ecosistémicos, puesto que cuando un ecosistema de montaña se encuentra en buen estado, contribuyen a la regulación de los ciclos biogeoquímicos, ciclos de agua, (e.g., aprovisionamiento de agua tierras abajo) calidad de aire, protección contra los riesgos naturales, entre otros (Egan & Price, 2014).

Las montañas son una de las regiones más sensibles a los cambios globales (i.e., Cambio climático e incremento de la presión antropogénica) (Glave, 2016), ya que presentan un calentamiento por encima de la media, en comparación al resto del mundo (Egan & Price, 2014). Actualmente existen varios factores, tanto de origen natural como de origen antropogénico que ejercen presiones sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos de estos ecosistemas (Burbano-Orjuela, 2016), siendo este último el principal, que derivan en los siguientes: pérdida de hábitat, sobreexplotación de los recursos,

contaminación, fragmentación, invasiones biológicas (Cruz et al., 2017). En ese sentido, las invasiones biológicas son reconocidas como uno de los principales factores que contribuyen a la disminución de la biodiversidad en estos ecosistemas. (Pauchard et al., 2009). Otro factor importante que incide en estos es el cambio climático, que afecta a los parámetros físicos que condicionan estos ecosistemas, como los patrones de precipitación y aumento de temperaturas (Azarte et al., 2019). Las temperaturas durante el último siglo han subido en promedio 0,8°C, siendo específicamente notable desde la década de los 70 en adelante (Álvarez et al., 2011). Por otro lado, recientes estudios a los glaciares de los Andes centrales pronostican la desaparición de estos en un 80 % durante los próximos 15 años (Ahumada, 2007). La transformación es preocupante, ya que los efectos del cambio climático afectan a la competitividad y distribución de las especies, además de aumentar la probabilidad de la colonización de especies exóticas (Pauchard et al., 2009). La evidencia actual indica que la limitación “al establecimiento” de las plantas exóticas por las bajas temperaturas ha disminuido, ya que el aumento de temperaturas a nivel global ha desatado la expansión ascendente de plantas exóticas hacia gradientes altitudinales mayores (Barros et al., 2022), sin embargo, no solo los factores abióticos favorecen el establecimiento de estas especies, también la presión antropogénica puede aumentar el éxito de la invasión, al funcionar como vectores de dispersión de propágulos hacia lugares remotos mediante carreteras y senderos (Fuentes-Lillo et al., 2021)

Es sabido que la infraestructura de senderos facilita la llegada de las personas a áreas naturales montañosas fomentando la invasión de plantas exóticas hacia zonas de mayor elevación (Liedtke et al., 2020) De esta manera el turismo y actividades de recreación en las montañas, como el trekking, avistamiento de aves, fotografía, entre otras actividades, contribuyen a la dispersión de propágulos desde zonas bajas hacia zonas más elevadas. Por otra parte, la presencia humana en estos lugares no solo actúa como vector de propagación, sino que, tanto los senderos de tránsito de turistas como las carreteras pueden modificar las condiciones abióticas del lugar (e.g. cambio en la temperatura del suelo, humedad del suelo y mayor contenido de nutrientes) alterando los regímenes de agua y nutrientes, permitiendo el establecimiento de especies invasoras (Barros et al., 2022).

En Chile centro-sur (36-39°S) se ha determinado que la riqueza y abundancia de plantas exóticas disminuye con el incremento de la elevación, donde este patrón es explicado principalmente por la menor incidencia de factores antropogénicos como lo es la presencia del camino y la distancia a los asentamientos humanos (Fuentes-Lillo et al., 2021) Resultados similares han sido determinados para el sur de Chile, en donde la riqueza y abundancia de plantas exóticas es explicado principalmente por el aumento del cambio y uso de suelo que hay en estos ecosistemas (Pauchard & Alaback, 2004). Estos patrones concuerdan con los patrones globales de la riqueza y abundancia de

plantas exóticas en ecosistemas de montaña, donde la riqueza disminuye con la elevación, asociado principalmente a la severidad climática, mientras que la riqueza siempre es mayor en la cercanía de los caminos (carretera), en donde la perturbación y la presión de propágulos es mayor (Haider et al., 2018).

Así como estas invasiones de especies exóticas son actualmente un tema relevante a nivel mundial, también lo es para la biología de la conservación en Chile, ya que la economía del país está en persistente crecimiento junto con el turismo (Chanquey et al., 2021) se espera que se introduzcan más especies invasoras y aumente la presencia de propágulos hacia ecosistemas naturales aumentando así el número de plantas exóticas; llegando a superar el 15 % de la flora vascular que ya representa en la actualidad (Rodríguez et al., 2018), este aumento de especies exóticas se da a lugar desde zonas de baja elevación hasta lugares con mayor elevación, y las áreas protegidas no son la excepción, como por ejemplo la presencia de *Pinus radiata* en La Reserva Nacional Los Queules (Becerra & Simonetti Zambelli, 2013) un bosque nativo que se encuentra ubicado a 6 km del océano Pacífico, o como el caso de *Taraxacum officinale* reportada en los Andes de Chile central (Pauchard & Jiménez, 2010) Otro ejemplo es la presencia de *Cerastium arvense* L. y *Galium aparine* L. en el Parque Nacional Torres del Paine (Vidal et al., 2015).

La evidencia nos permite hipotetizar sobre un potencial incremento de

especies invasoras debido a la presencia y cercanía a presiones de origen antropogénico, como lo son la existencia de caminos, senderos, presencia de actividades turísticas, aumento de la infraestructura en ecosistemas montañosos de la Cordillera de los Andes. Esta investigación tiene por objetivo evaluar la importancia de los factores antropogénicos en la distribución, de riqueza y abundancia de plantas exóticas a lo largo de gradientes latitudinales y altitudinales de la Cordillera de los Andes. Para lograr este objetivo se levantó información de riqueza de especies exóticas a lo largo de gradientes altitudinales siguiendo caminos cordilleranos en cuatro zonas desde Chile central (32°S) a Los Andes Subantárticos (55°S) mediante el protocolo estandarizado MIREN (Haider et al., 2018).

## II. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en Chile, específicamente en cuatro zonas de la Cordillera de los Andes, desde Chile central a Los Andes Subantárticos. En cada zona el levantamiento de información de distribución de especies exóticas y presencia humana fue recolectado a lo largo de tres carreteras separadas a menos de 150 kilómetros entre ellas. Las cuatro zonas catalogadas como Zona Central, Zona Centro-Sur, Zona Sur y Zona Subantártica (Figura 1).

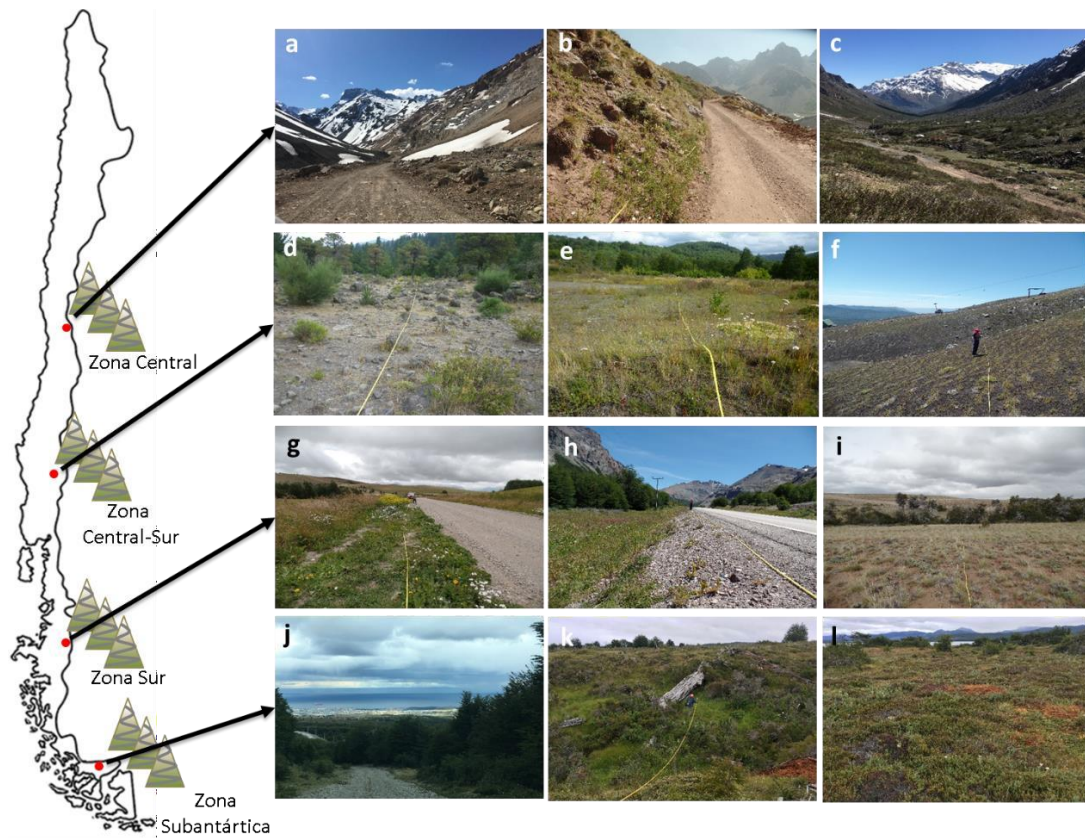


Figura 1. Ejemplo de las 12 carreteras en el paisaje, según sus regiones: (a) Camino al Volcán (Cajón del Maipo - Termas Colina); (b) Camino Coya (Río Cipreses - Río las Leñas); (c) Camino a Laguna Teno (Los Queñes - Laguna Tenco); (d) Parque Nacional Laguna del Laja; (e) Lonquimay; (f) Camino al Volcán Llaima (Cherquenco - Centro Ski Las Araucarias) (g) Centro Sky El Fraile; (h) Reserva Nacional Cerro Castillo; (i) Coyhaique Alto; (j) Estancia San Fernando; (k) Reserva Nacional Magallanes; (l) Reserva Nacional Laguna Parrillar.

### 2.1.1 Zona Central

La primera zona se situó en la Región Metropolitana, definida como la región Central (33°S) donde se seleccionaron 3 caminos correlativos, que corresponden Camino al Volcán (Cajón del Maipo - Termas Colina), que parte desde una elevación de 1.381 m.s.n.m hasta los 2.453 m.s.n.m. luego el Camino Coya (Río Cipreses - Río las Leñas) que parte desde 903 m.s.n.m hasta llegar a los 2083 m.s.n.m y Camino a Laguna Teno (Los Queñes - Laguna Tenco) donde el primer transecto se estableció a los 1069 m.s.n.m y el último en los 2.602 m.s.n.m.

#### Clima y vegetación

En la región metropolitana existen más áreas de clima árido y mayores fluctuaciones térmicas, que revelan la penetración de la estepa algo continental, esto se debe a la presencia de una cordillera de la costa relativamente alta, que actúa como muralla, dificultando el ingreso de condiciones climáticas marítimas, la zona presenta en promedio máximas anuales de precipitación de 102,5 mm y mínimas anuales de 0,3 mm con temperaturas máximas de 30,4 ° C y mínimas de 15,4 ° C.

La proporción de flora presente en esta zona corresponde a nativas- no

endémicas con un 57% aunque su porcentaje de endemismo es alto (29%), se aprecia una disminución del nivel de endemismo por la proveniencia de especies desde la vertiente oriental (Muñoz-Schick, M 2000) y se pueden identificar 5 pisosvegetacionales que avanzan con el gradiente altitudinal: a) Matorral Esclerófilo, b) Matorral Subandino, c) Matorral Andino, d) Estepa Altoandina, e) Desierto Altoandino.(Muñoz-Schick et al, 2000).

### 2.1.2 Zona Centro Sur

La segunda región se localiza en la zona Centro-sur (37° S) donde fueron seleccionados 3 caminos que son: Parque Nacional Laguna del Laja desde los 378 m.s.n.m hasta los 1401 m.s.n.m El camino Lonquimay que va desde los 650 m.s.n.m hasta los 1.341m.s.n.m y Camino al Volcán Llaima (Cherquenco - CentroSki Las Araucarias) que va desde los 449 hasta los 1.606 m.s.n.m.

### Clima y vegetación

En esta zona predomina un clima templado a templado lluvioso, donde las bajas presiones provocan altos niveles de precipitaciones, presenta en promedio máximas anuales de 126,6 mm y mínimas de 0,2 mm con temperaturas máximasde 32,1 °C y mínimas de -5,4°C.

En cuanto a la vegetación, en esta zona cercana al parque nacional laguna del Laja se presentan poblaciones importantes de *Austrocedrus chilensis*, (ciprés de la cordillera) *Orites myrtoidea* (radal enano) que en conjunto coexiste con *Maihuenia poeppigii* (Otto), *Ephedra chilensis* (pingo pingo) y una destacable diversidad de orquídeas (Moreno & Troncoso, 2000).

### 2.1.3 Zona Sur

La tercera región fue definida en la zona Sur (45°S), con los siguientes caminos: Centro Sky El Fraile que comienza a una altitud de 346 m.s.n.m y termina en 1.028 m.s.n.m, Reserva Nacional Cerro Castillo que comienza a los 474 m.s.n.m y termina en el último punto de muestreo en 1.100 m.s.n.m y Coyhaique Alto con el primer transecto en los 903 m.s.n.m y el último en los 2083 m.s.n.m.

### Clima y vegetación

Esta zona presenta un clima frío y lluvioso, sin estaciones secas por la constante humedad, tiene en promedio máximas anuales de 61,2 mm y mínimas de 0,2 mm con temperaturas máximas de 28 °C y mínimas de -9,9°C Se identifican 5 pisos vegetacionales en esta región definidos que corresponden a: a) Desierto Anti boreal Andino: Corresponde al conjunto de hierbas bajas y

muy abierto b) Estepa Mediterránea Templada: Se caracteriza por ser un conjunto de comunidades que se destaca por la presencia de *Acaena splendens* (cepa caballo o abrojo), *Festuca pallescens* (coirón blanco) y *Mullinium spinosum* (hierba negra.) c) Bosque Caducifolio Templado Andino: Es un bosque caducifolio dominado en una estrata arbórea alta por *Nothofagus pumillo* (la lengua) y frecuentemente también por *Nothofagus betuloides* (coigüe). d) Bosque Siempreverde Templado Andino: Es un bosque siempreverde dominado por *Nothofagus dombeyi* y con *N.betuloides* como especie que se presenta en menor proporción y una estrata arbustiva en donde *Fuchsia magellanica* es muy abundante. e) Vegas y Humedales (Luebert & Pliscoff, 2006).

#### 2.1.4 Zona subantártica

Por último, la cuarta región se estableció en la zona Subantártica (54°S) con los caminos: Estancia San Fernando que comienza en los 47 m.s.n.m hasta los 502m.s.n.m, Reserva Nacional Magallanes que parte en los 185 m.s.n.m hasta los 620 m.s.n.m y por último la Reserva Nacional Laguna Parrillar que comienza en los 33 m.s.n.m llegando a los 308 m.s.n.m.

Clima y vegetación

Esta zona presenta un clima frío y húmedo, con nevadas en invierno y heladas todo el año, tiene en promedio máximas anuales de 85,3 mm y mínimas de 0,5 mm con temperaturas máximas de 23,1 °C y mínimas de -7,2°C. El clima de este sector, al igual que en toda la región de Magallanes, se caracteriza por presentar predominancia de vientos del cuadrante oeste La vegetación que había en el lugar antes de las perturbaciones humanas, se caracterizaba por una formación arbórea baja, de no más de 10 m de altura, *Nothofagus antártica* (monte de Ñire), a vegas o pastizales húmedos de *Hordeum lechleri*. La formación boscosa fue talada y quemada en parte. método muy común para limpiar los sitios del sur austral de Chile por los colonos y en el espacio abierto se establecieron *Chilotrimum diffusum* (matorral de romerillo) y pastizales predominados por especies introducidas para forraje como *Poa pratensis*, *Dactylis glomerata*, *Holcus lanatus*, y *Trifolium repens* (Dollenz Alvarez & Santana, 2000).

## 2.2 Muestreo de vegetación.

El muestreo se realizó por regiones, según el diseño de encuesta estandarizado propuesto por la Red de investigación sobre invasiones de montaña (MIREN), esta red propone un protocolo estandarizado para el seguimiento y observación de especies vegetales en todo el mundo a lo largo de un gradiente altitudinal, a escala local de una gran cantidad de regiones

montañosas para comprender los procesos que están dando forma a las comunidades vegetales a escala regional y así obtener conclusiones a nivel global (Haider et al., 2022).

Según la organización, una región se define como una unidad geográfica que contiene características geológicas, de flora y de rango de altitudinal similares, en cada región se seleccionaron 3 carreteras donde cada una tiene una distancia menor a 150 kilómetros entre ellas, estas se extienden sobre un amplio gradiente de elevación comenzando en la base de la región, ya sea a nivel del mar o en un valle donde no se produzcan cambios en la elevación; llegando hasta un alto gradiente de elevación más allá del límite arbóreo (Haider et al., 2022). En cada carretera se realizaron 20 transectos con forma de T estratificadas por elevación, cada T va a contener 3 parcelas (3 plots) de 2x 50 metros, La primera parcela, que corresponde a la parte superior de la T (plot 1) es paralela y colindante a la carretera, mientras que las otras dos se despliegan perpendicular a la carretera, donde la segunda parcela (plot 2) se ubica a 25 metros de la carretera de manera centrada a la primera parcela y la tercera (plot 3) a 75 metros de la carretera, también de manera centrada. (Figura 2).

En cada una de las tres parcelas de los 20 puntos de muestreo, los observadores registraron todas las especies de plantas vasculares, tanto

nativas como no nativas, generando una lista de variables bióticas, que corresponden a la riqueza y abundancia de especies exóticas con una modificación de la metodología propuesta por Braun-Blanquet.

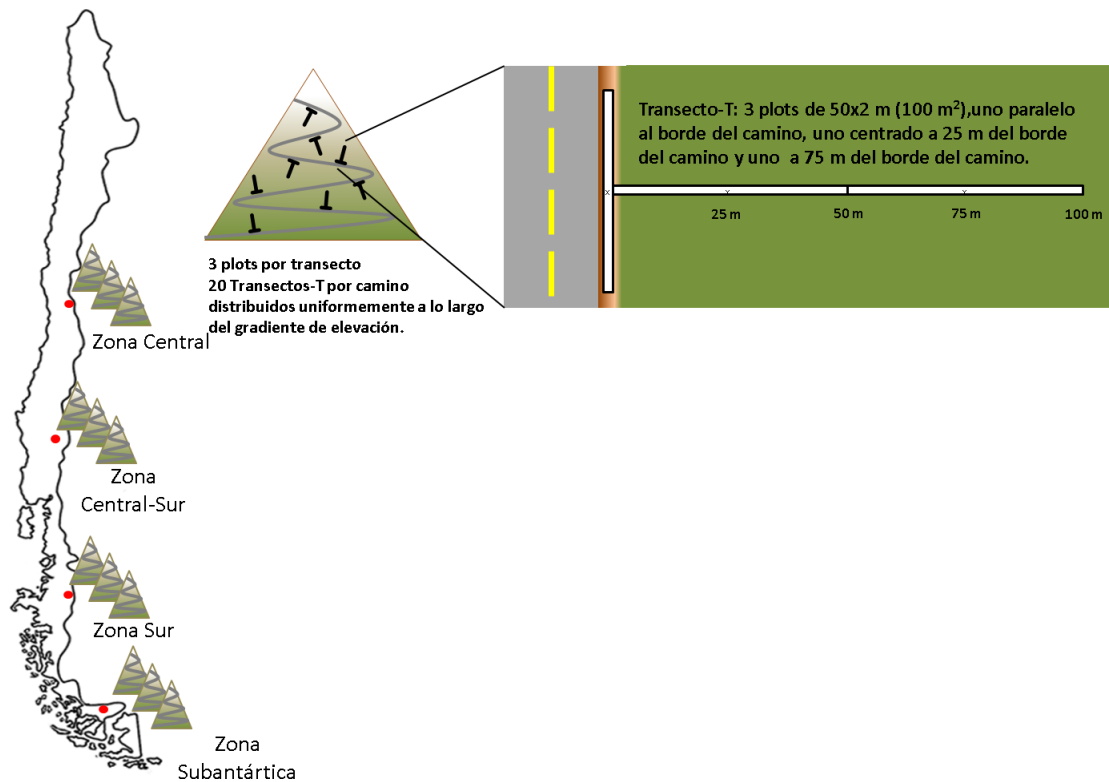


Figura 2. Esquema del diseño de muestreo MIREN, distribución altitudinal equitativa de 20 puntos de muestreo a lo largo de cada carretera, cada punto de muestreo se compone de 3 parcelas de 2 x 50 metros que forman una T.

### 2.3 Variables antropogénicas

Se generó una lista de variables antropogénicas que corresponden a:

- a) Cercanía al camino: Esta variable está compuesta por los 3 puntos de muestreo que componen al transecto con forma de "T", donde el plot 1 que se encuentra al costado del camino, tiene una distancia de 0 metros, el plot 2 tiene una distancia de 25 metros desde el borde del camino y el plot3 tiene 75 metros de distancia desde el borde del camino.
- b) Distancia a asentamientos humanos (km): para esta variable se requirieron las coordenadas de cada transecto de las cuatro zonas estudiadas, para calcular la distancia euclidiana de cada punto al asentamiento humano más cercano, mediante el uso de la herramienta deArcMap.
- c) Uso de suelo: Para recopilar la información de esta variable se descargaron los pisos vegetacionales de (Luebert y Pliscoff, 2006) y se comparó su uso real mediante la herramienta Google Earth de cada punto.
- d) Índice de huella humana: El índice fue extraído desde una base de datos de libre acceso donde todas las huellas Humanas se cartografiaron utilizando la proyección Mollweide equal-area con una resolución de 1 km. Además, para cada parcela, se requirió recopilar ciertas variables ambientalesnecesarias como: la cubierta arbórea, temperatura del suelo, micorrización deespecies nativas para otros estudios complementarios propuestos por el MIRENLas especies fueron registradas en una planilla de Excel con toda la información taxonómica actualizada, localización exacta con coordenadas y sus respectivos códigos que indiquen la proveniencia de los datos, según región, camino, transecto y plot

correspondiente; Además cada especie se identificó como nativa o no nativa, utilizando bases de datos y recursos en línea.

#### 2.4 Análisis de datos de Datos

Las variables se agruparon de la siguiente manera: Variables respuesta: Riqueza de especies exóticas, abundancia de especies exóticas y Variable predictores: cobertura de uso de suelo, distancia a asentamientos humanos (km), índice de huella humana, distancia al camino. Donde al plot 1 que es paralelo al camino (Figura 1) se encuentra 0 metros, el plot 2 a 25 metros y el plot 3 a 75 metros del camino. Los análisis de los datos recopilados se ejecutaron en R versión 3.6.1 (RCore Team 2019).

Para esto se utilizaron modelos lineales generalizados de efectos mixtos (GLMMs, utilizando la función “*glmmTMB*” del paquete *GLMMTBM*), uno para cada variable respuesta (riqueza y abundancia), donde como predictores se usa la cercanía del camino, distancia a los asentamientos humanos, uso de suelo e índice de huella humana. Los transectos ( $n=20$ ) y los caminos ( $n=3$ ) se utilizaron como efectos aleatorios en el modelo. Ambos modelos tanto para la riqueza ajustaron a un error de distribución de Poisson con una función de enlace logística. Se graficaron las variables respuestas (riqueza) en función de cada predictor, utilizando el paquete *ggplot2*.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Riqueza según índice de huella humana

Como se muestra en el primer gráfico (Figura 3), la riqueza de especies exóticas, registrada en las parcelas, aumentó significativamente, tal como se observa en la Tabla 1 ( $p < 0.001$ ), a medida que aumentaba también el índice de huella humana principalmente en las zonas: Centro-Sur, Sur y Subantártica. Por el contrario, en la zona centro se presenta una tendencia menos visible, ya que, de todas las zonas; la central el índice es de 7,5 a 15, mientras que en los otros parten desde 0 a 30.

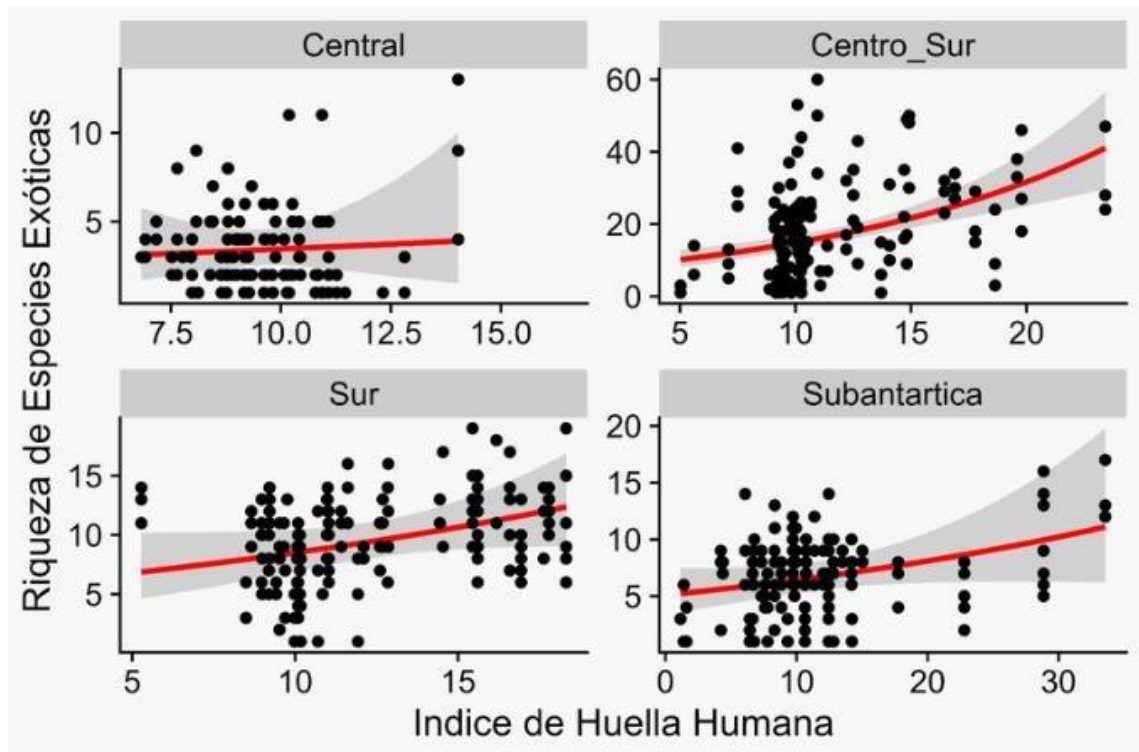


Figura 3. Gráfico de riqueza de especies exóticas a lo largo de las cuatro zonas estudiadas, según el índice de huella humana, El gráfico incluye los intervalos de confianza del 95%.

### 3.2 Riqueza según distancia a asentamientos humanos

La riqueza de especies exóticas disminuye con el aumento de la distancia a los asentamientos humanos (Figura 4).

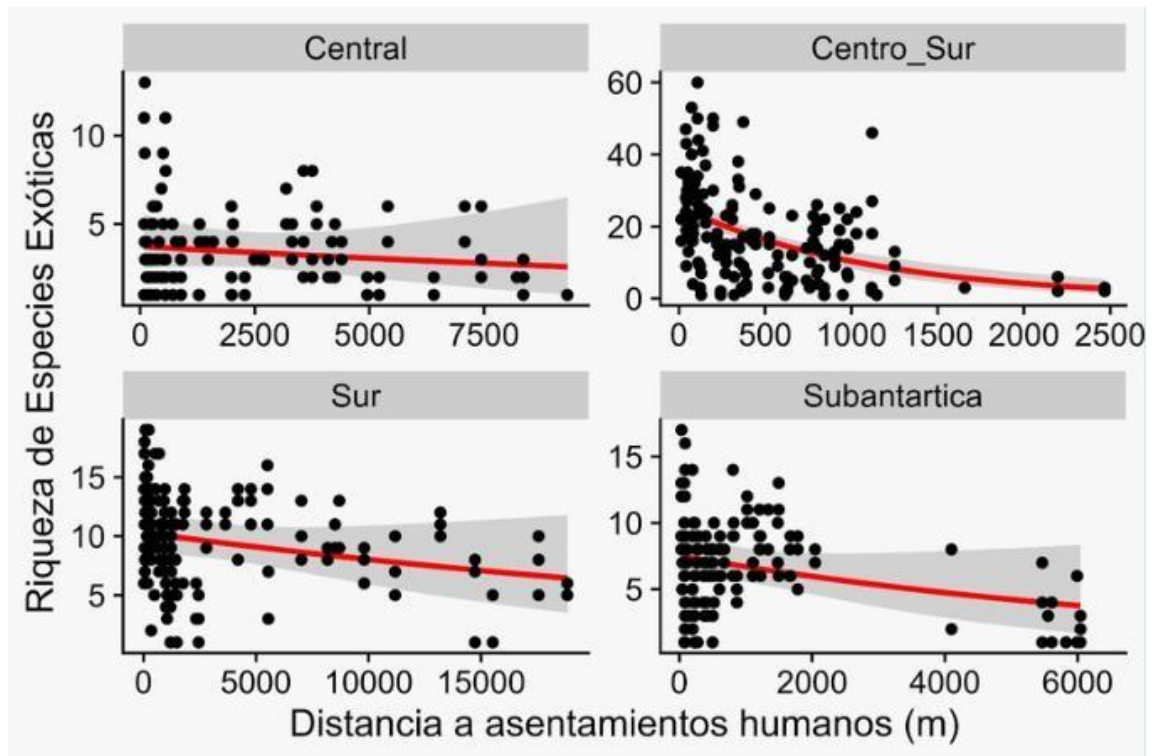


Figura 4. Gráfico de patrones de riqueza de especies exóticas en las cuatro zonas de estudio según distancia del transecto a asentamientos humanos. Con un intervalo del 95% de confianza.

### 3.3 Riqueza según distancia al camino

También se observa una disminución significativa de la riqueza de especies exóticas en los plot 2 ( $p < 0.001$ ) y 3 ( $p < 0.001$ ), mientras que aumenta en el plot 1 (Figura 5).

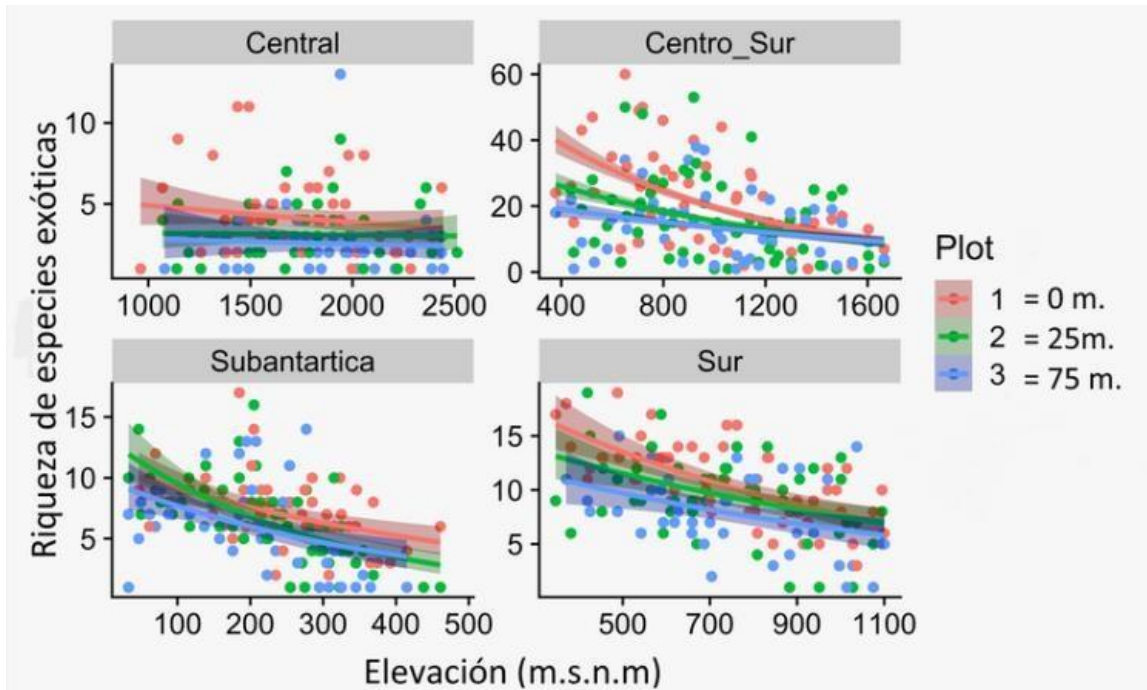


Figura 5. Gráfico de patrones elevacionales de riqueza de especies exóticas, según la distancia del plot a la carretera. El gráfico incluye un intervalo del 95 % de confianza.

### 3.4 Riqueza según uso de suelo

Por último, se observó un aumento significativo de la riqueza de especies exóticas en el uso de suelo categorizado como matorral ( $p < 0.001$ ) en la zona centro, agrícola en la zona centro-sur, pradera en la zona sur (0.001) y suelo descubierto en la zona subantártica ( $< 0.001$ ) (Figuras 6 y 7).

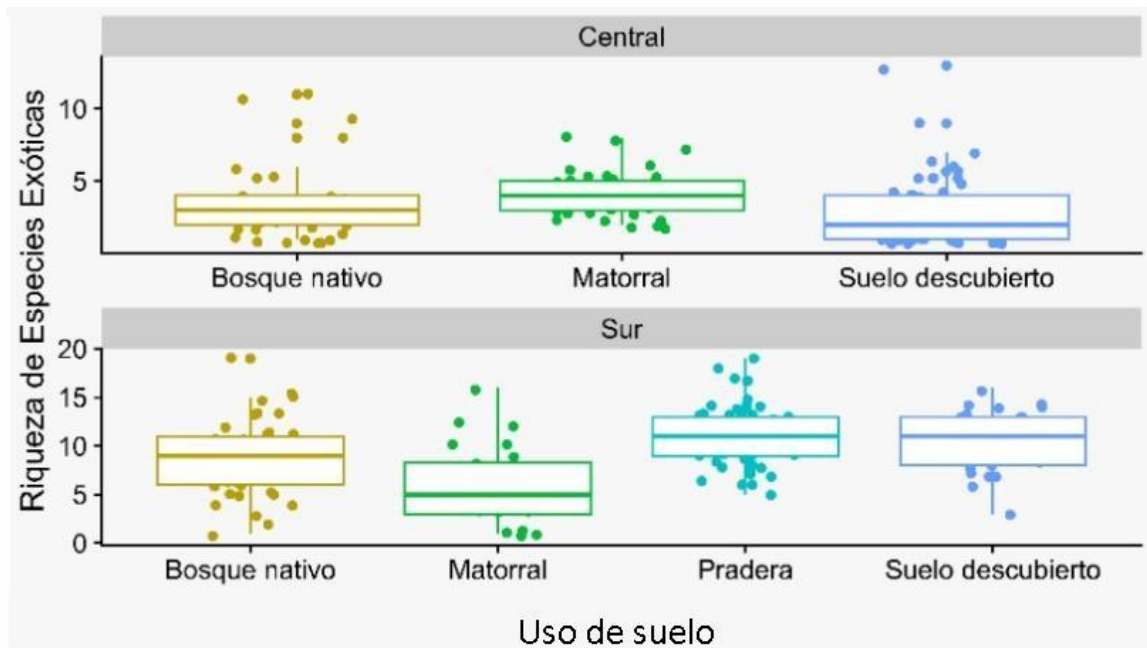


Figura 6. Representación gráfica de la riqueza de especies exóticas y su patrón de aumento-disminución por clase de cobertura de uso de suelo en la zona central y sur. El gráfico incluye un intervalo del 95 % de confianza.

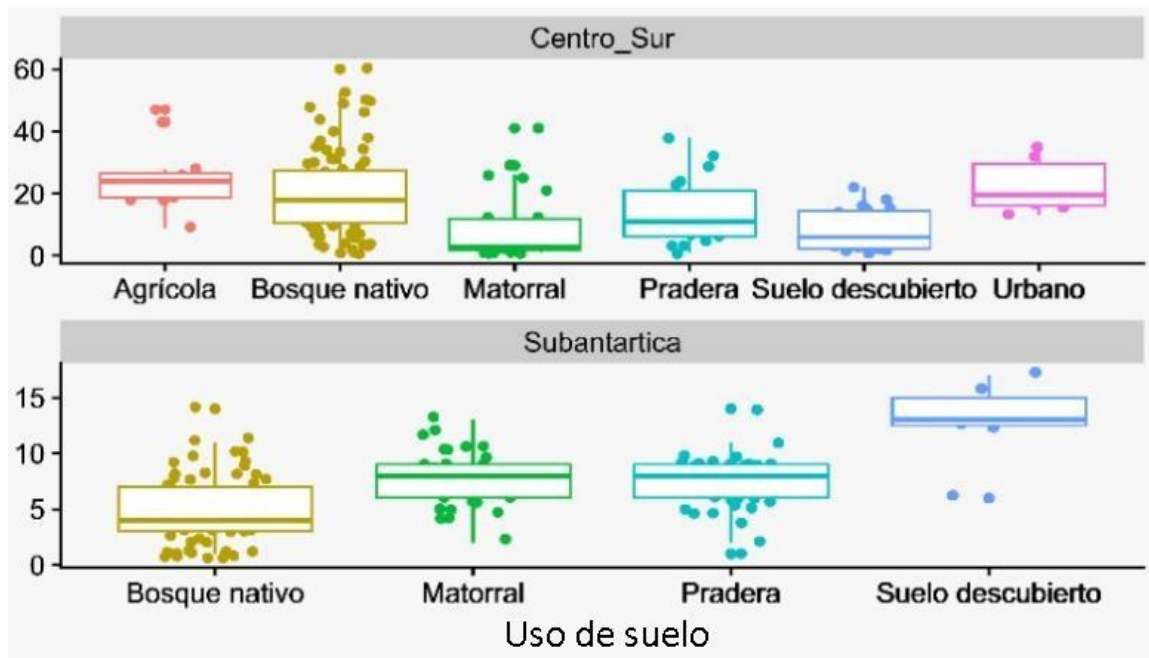


Figura 7. Representación gráfica de la riqueza de especies exóticas y su patrón de aumento-disminución por clase de cobertura de uso de suelo en la zona centro-sur y subantártica. El gráfico incluye un intervalo del 95% de confianza.

Se puede apreciar que a lo largo de las tres carreteras; en las cuatro zonas, la riqueza de especies exóticas disminuyó a medida que aumentaba el gradiente altitudinal (Figura 3).

Tabla 1. Resultados de los Modelos lineales generalizados mixtos para la riqueza de especies exóticas.

	Estimación	Error estándar	Valor z	Pr (>  z )
Intercepto	2,074e+00	2,697e-01	7,689	<b>&lt;0,001</b>
Huella humana	4,240e-02	3,206e-02	13,224	<b>&lt;0,001</b>
Plot 2	-1,899e-01	3,029e-02	-6,269	<b>&lt;0,001</b>
Plot 3	-3,533e-01	3,401e-02	-10,389	<b>&lt;0,001</b>
Bosque nativo	-2,326e-01	6,320e-02	-6,380	0,000233
Matorral	-4,901e-01	7,205e-02	-6,802	<b>&lt;0,001</b>
Pradera	-3,138e-01	6,932e-02	-4,526	<b>&lt;0,001</b>
Suelo descubierto	-4,582e-01	7,22e-02	-6,345	<b>&lt;0,001</b>
Urbano	-6,539e-02	1,038e-01	-0,630	0,528700
Distancia a asentamientos	-1,442e-05	1,169e-05	-1,243	0,213812

### 3.5 Abundancia según índice de huella humana

Los resultados en los gráficos de abundancia según el índice de huella humana no revelaron diferencias significativas (Tabla 2), como se puede apreciar en la Figura 8.

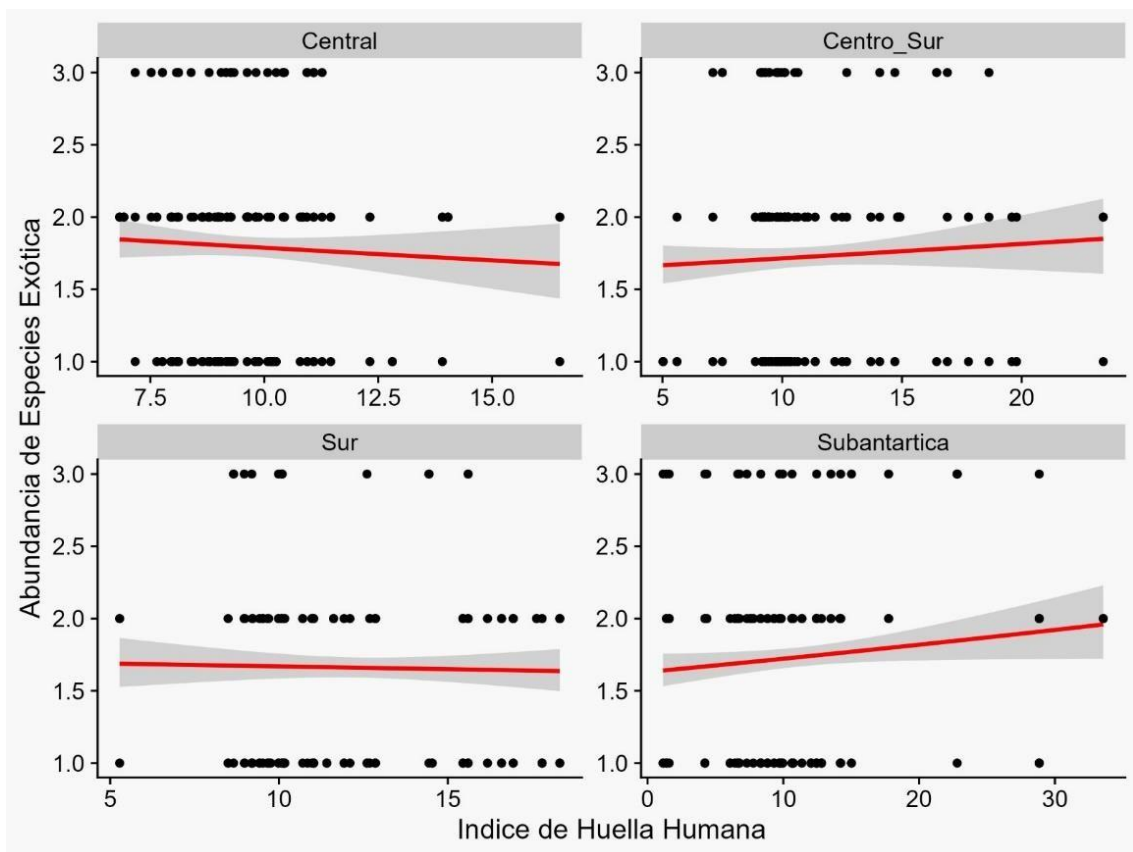


Figura 8. Gráfico de abundancia de especies exóticas a lo largo de las cuatro zonas estudiadas, según el índice de huella humana. El gráfico incluye los intervalos de confianza del 95%.

### 3.6 Abundancia según distancia a asentamientos humanos

En cuanto a la variable de abundancia según la distancia a los asentamientos humanos (Figura 9) se puede observar en la tabla 2 que no existe una relación significativa entre la variable predictora y la variable de respuesta.

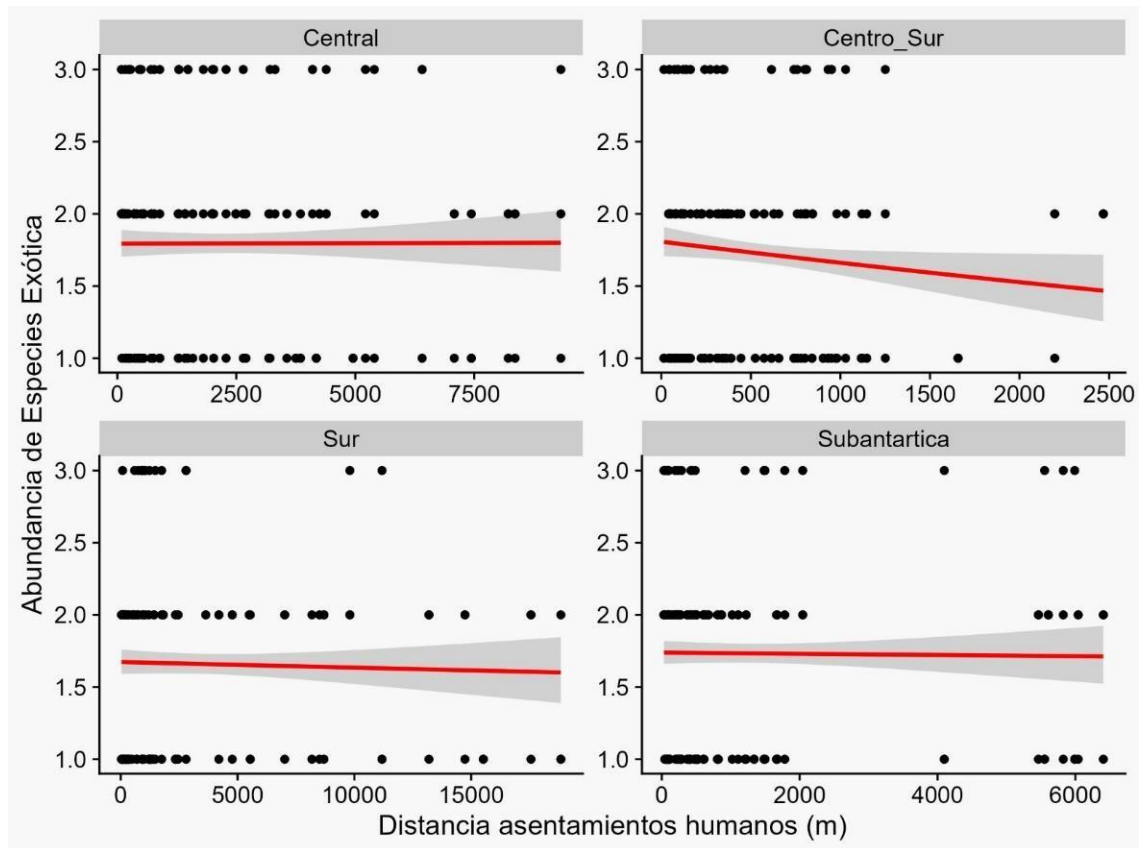


Figura 9. Gráfico de patrones de abundancia de especies exóticas en las cuatro zonas de estudio según distancia del transecto a asentamientos humanos. Con un intervalo del 95% de confianza.

### 3.7 Abundancia según elevación

Asimismo, ocurre entre la variable predictora (elevación) y la variable predictora (abundancia), no se observa una relación estadísticamente significativa (Tabla 2) que permitan hipotetizar un aumento o disminución de la abundancia de especies exóticas según la elevación del transecto sometido a muestreo.

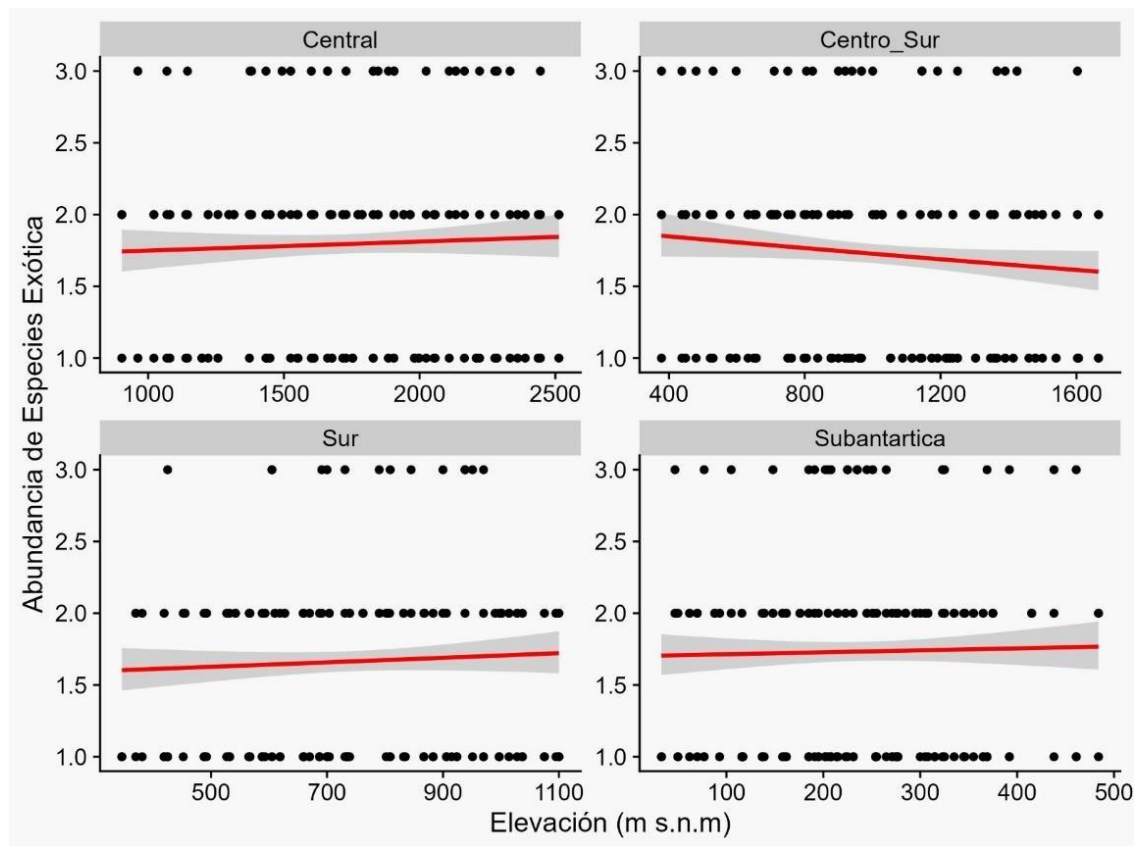


Figura 10. Gráfico de patrones elevacionales de abundancia de especies exóticas, según la distancia del plot a la carretera. El gráfico incluye un intervalo del 95 % de confianza.

Tabla 2. Resultados de los modelos lineales generales mixtos para la abundancia de especies exóticas.

	Estimación	Error estándar	Valor z	Pr (>  z )
Intercepto	0,529904	0,049637	10,676	<2e-16
Elevación	0,019179	0,030542	0,628	0,530
Plot 2	0,001865	0,070451	0,026	0,979
Plot 3	0,057189	0,070669	0,809	0,418
Huella Humana	0,012834	0,030603	0,419	0,675
Distancia asentamientos humanos	-0,009237	0,031143	-0,297	0,767

#### IV. DISCUSIÓN

Para responder la pregunta de investigación, los factores de origen antrópico que explican los patrones de riqueza de especies exóticas fueron cuatro: Cobertura de usos de suelo, Distancia asentamientos humanos, índice de huella humana y presencia de camino, siendo estos últimos tres los más significativos (Tabla 1), ya que han sido identificados como los factores principales que potencian el incremento de la riqueza de especies exóticas en estos ecosistemas de montaña, pertenecientes a los Andes de Chile, sin embargo esto sucede en ecosistemas de alta montaña de todo el mundo como por ejemplo el caso del noroeste patagónico altoandino de Argentina (Costa, 2023), Parque nacional Torres del Paine (Vidal et al., 2015), Parque nacional Sangay, Ecuador (Brito & Ojala-Barbour, 2014) que determinaron que la presencia humana ha potenciado invasiones biológicas en estos ecosistemas que son considerados remotos, bajo este punto la presencia de carreteras puede explicar el patrón de riqueza de especies exóticas, puesto que funcionan como vectores para el transporte de propágulos (Fuentes-Lillo et al., 2021) y por causa de los disturbios de origen antrópico se incrementa la probabilidad de colonización de plantas invasoras (Velasco-Linares & Vargas, 2008). Como afirman los autores (Espinoza & Francioli, 2022), el índice de huella humana y el ser humano como tal, ha dejado ecosistemas altamente degradados por la introducción de especies invasoras, actuando como un

vector de propagación. En esta habilitación se ha puesto a prueba esta idea, al analizar el patrón de abundancia de especies exóticas en las cuatro zonas de estudio, dejando como resultado una clara tendencia de aumento de la abundancia de estas especies, junto con el aumento del índice de huella humana; en las zonas centro-sur, Sur y subantártico, no así en la zona central, esto se debe a que el índice de huella humana no posee valores inferiores a 7.5 (Figura 3), por el contrario de las otras zonas de estudio. De esta manera esta habilitación apoya la idea, que el índice de huella humana a medida que aumenta, también lo hace la riqueza de especies exóticas.

El fenómeno de las invasiones biológicas es considerado como uno de los principales factores que afectan negativamente a la biodiversidad de los ecosistemas (Capdevila-Argüelles et al, 2013). Este fenómeno de invasión en el mundo es potenciado por la presencia del ser humano, que actúa como un vector de dispersión (Herrera et al, 2016). De esta manera la distancia a los asentamientos humanos puede explicar la tendencia que se presenta en la figura 4, donde se observó una mayor riqueza de especies exóticas a medida que disminuye la distancia a los asentamientos. Bajo esta misma afirmación se explica como el tránsito humano y la presencia del camino influye en la riqueza de estas especies, la remoción de vegetación y el movimiento de suelo para la construcción de estos caminos, generan cambios en las comunidades naturales, exponiendo los suelos a procesos de erosión, creando nuevos

hábitats carentes de vegetación, liberando recursos (e.g., luz, agua, nutrientes) para ser ocupados por especies de rápido crecimiento (Chichizola et al,2023), así se demuestra en la figura 5, donde el plot 1, que se encuentra a 0 m. del camino posee una mayor riqueza de especies exóticas, por otro lado en los plot 2 (25 metros de distancia al camino) y 3 (75 metros de distancia al camino) decrece la riqueza de estas especies a medida que aumenta la distancia del camino. Además de la presencia humana como tal, el cambio de la cobertura vegetal (e.g., deforestación, habilitación de terrenos para agricultura, plantaciones forestales) al ser hábitats disturbados se reconocen como potenciales nichos para la colonización de especies exóticas (Vasquez-Valderrama et al., 2017), por su capacidad de adaptarse a las condiciones micro climáticas del lugar e invadir el suelo desnudo (Molina-Montenegro et al., 2015). Esta condición se presenta en las zonas Sur y subantártica, donde el suelo descubierto presenta una mayor riqueza de especies exóticas, al contrario de la zona central que se presenta la mayor riqueza en la cobertura de matorral y finalmente en la zona centro sur en la zona urbana se presenta esta condición de mayor riqueza.

## V. CONCLUSIONES

En conclusión, la presente investigación ha arrojado luz sobre la influencia significativa de factores de origen antropogénicos, tales como el uso de suelo, distancia a las carreteras, índice de huella humana y la proximidad a asentamientos humanos, en el enriquecimiento de la diversidad de especies exóticas a lo largo de gradientes altitudinales en la Cordillera de los Andes de Chile. No así en los resultados obtenidos para la abundancia de las especies exóticas, donde se reveló que tales factores no demostraron una relación significativa estadísticamente con la variable analizada. Los resultados obtenidos destacan la importancia de comprender y abordar la interacción entre actividades humanas y la biodiversidad en estos ecosistemas, subrayando la necesidad de estrategias de gestión ambiental que consideren cuidadosamente estos factores antropogénicos para preservar la integridad ecológica de la región. Estos hallazgos no solo contribuyen al conocimiento científico sobre la ecología de la zona, sino que también proporcionan una base sólida para la formulación de políticas y prácticas de conservación que aborden específicamente los impactos humanos en la biodiversidad en este valioso entorno montañoso.

## VI. GLOSARIO

Abundancia de especies: número de individuos de una especie.

Distancia euclidiana: corresponde a la distancia más corta entre dos vectores.

Especies exóticas: corresponde a una especie que se encuentra fuera de su área natural de distribución.

Especies nativas: aquellas especies originaria de un área de distribución.

Hotpots de biodiversidad: corresponde a una región biogeográfica donde hay una alta concentración de biodiversidad de especies amenazadas por la actividad humana.

Invasiones biológicas: se produce cuando especies exóticas se establecen en regiones donde no se distribuyen de manera natural, sino que introducida y comienzan a colonizar y desplazar a especies autóctonas del lugar.

Propágulos: parte de una planta capaz de originar vegetativamente otro individuo.

Riqueza de especies: número de especies en un lugar.

Servicios ecosistémicos: beneficios directos o indirectos que entrega la biodiversidad al bienestar humano.

Transecto: área de muestreo lineal elegida como base para estudiar una característica o levantar datos de información de interés.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

Ahumada, A. L. (2007). El calentamiento global y sus manifestaciones en la criósfera de las altas montañas del norte argentino. *Boletín Geográfico* (30), ág. 57-69.

Álvarez, V., Taboada, J., & Lorenzo, M. (2011). Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: Tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones. *Avances en ciencias de la tierra*, 2, 65-85.

Arroyo, M. T., & Cavieres, L. A. (2013). High-elevation Andean ecosystems.

Azarte, D. A., Villanueva, W. F., Rodríguez, A. L., & Rohrer, M. (2019). *Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales*. Paper presented at the Anales Científicos.

Barros, A., Haider, S., Müllerová, J., Alexander, J. M., Alvarez, M. A., Aschero, V., Arévalo, J. R. (2022). The Role of Roads and Trails for Facilitating Mountain Plant Invasions. In *Tourism, Recreation and Biological Invasions* (pp. 14-26): CABI GB.

Brito, J., & Ojala-Barbour, R. (2014). Presencia de la rata invasora *Rattus rattus* (Rodentia: Muridae) en el Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Therya*, 5(1), 323-329.

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias agrícolas*, 33(2), 117-124.

Capdevila-Argüelles, L., Zilletti, B., & Suárez-Álvarez, V. Á. (2013). Causas de la pérdida de biodiversidad: Especies Exóticas Invasoras. *Memorias Real Sociedad Española de Historia Natural*. 2a. época, 10, 55-75.

Chanquey, Y., Lagos, N., & Llanco, C. (2021). Análisis del crecimiento económico en función del turismo en Chile, periodo 2000-2018. *Revista interamericana de ambiente y turismo*, 17(1), 34-46.

Chichizola, G. A., Gonzalez, S. L., & Rovere, A. E. (2023). Efectos de los bordes de caminos y las plantas invasoras sobre la vegetación en pie y el banco de semillas en matorrales norpatagónicos. *Ecología Austral*, 923-937.

Costa, M. C. (2023). *Pináceas invasoras en ambientes altoandinos del*

*Noroeste patagónico*. Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche,

Cruz-Elizalde, R., Ramírez-Bautista, A., Aguillón-Gutiérrez, D. R., Magno-Benítez, I., & Hernández-Austria, R. (2017). Principales amenazas para la biodiversidad y perspectivas para su manejo y conservación en el estado de Hidalgo: El caso de los anfibios y reptiles. *Biodiversidad del Estado de Hidalgo*, 2, 577-590.

Díaz, J. A. G., & Villalobos, F. (2020). Montañas: cómo se definen y su importancia para la biodiversidad y la humanidad. *CIENCIA ergo-sum*, 27(2).

Dollenz Alvarez, O., & Santana, A. (2000). *Clasificación y distribución espacial de la vegetación de Cabo Negro (Magallanes, Chile) utilizando imágenes satelitales*. Paper presented at the Anales del Instituto de la Patagonia.

Egan, P., & Price, M. (2014). Las montañas como torres de agua del mundo: Protegiendo el agua y los servicios ecosistémicos de montaña ante el cambio climático. *Informe de política. UICN Comisión para la Gestión de Ecosistemas*. (Accessed September 1, 2018).

Espinoza, F. V., & Francioli, S. E. (2022). La Huella Humana en la Isla Robinson Crusoe (Archipiélago de Juan Fernández) entre los Siglos XVI y los Albores del Siglo XVII: Una Impronta para el Futuro. *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha*, 12(1), 388-430.

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.

Glave, M. (2016). Cambio global, alta montaña y adaptación: una aproximación social y geográfica.

Haider, S., Kueffer, C., Bruelheide, H., Seipel, T., Alexander, J. M., Rew, L. J., Milbau, A. (2018). Mountain roads and non-native species modify elevational patterns of plant diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 27(6), 667-678.

Haider, S., Lembrechts, J. J., McDougall, K., Pauchard, A., Alexander, J. M., Barros, A., Aleksanyan, A. (2022). Think globally, measure locally: The MIREN standardized protocol for monitoring plant species distributions along elevation gradients. *Ecology and evolution*, 12(2), e8590.

Herrera, I., Goncalves, E., Pauchard, A., & Bustamante, R. O. (2016). *Manual de plantas invasoras de Sudamérica*: IEB Chile, Instituto de Ecología y Biodiversidad Región de O'Higgins, Chile.

Liedtke, R., Barros, A., Essl, F., Lembrechts, J. J., Wedegärtner, R. E., Pauchard, A., & Dullinger, S. (2020). Hiking trails as conduits for the spread of non-native species in mountain areas. *Biological Invasions*, 22, 1121-1134.

Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*: Editorial Universitaria.

Molina-Montenegro, M. A., Gaxiola, A., Cavieres, L. A., Gianoli, E., García, R. A., & Pauchard, A. (2015). Invasiones biológicas en ambientes extremos: Chile como laboratorio natural. *Revista de invasiones biológicas de América Latina y el Caribe*, 1, 34.

Moreno, Y., & Troncoso, J. (2000). Estudios vegetacionales en el Parque Nacional Laguna Laja VIII Región de Chile.

Muñoz-Schick, M., Moreira-Muñoz, A., Villagrán, C., & Luebert, F. (2000). Caracterización florística y pisos de vegetación en los Andes de Santiago, Chile Central. *Boletín Museo Nacional de Historia Natural*, 49, 9-50.

Pauchard, A., Kueffer, C., Dietz, H., Daehler, C. C., Alexander, J., Edwards, P. J., . . . Haider, S. (2009). Ain't no mountain high enough: plant invasions reaching new elevations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(9), 479-486.

Vasquez-Valderrama, M. Y., López-Camacho, R., & Baptiste, M. P. (2017). La transformación histórica de las coberturas naturales impulsa el potencial invasor de las plantas en los bosques secos del río Magdalena, Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), 132-144.

Velasco-Linares, P., & Vargas, O. (2008). Problemática de los bosques altoandinos. *Estrategias para la restauración ecológica del bosque alto andino (El caso de la Reserva Forestal Municipal de Cogua, Cundinamarca)*, 41-56.

Vidal, O. J., Aguayo, M., Niculcar, R., Bahamonde, N., Radic, S., San Martín, C., . . . Féliz, J. (2015). *Plantas invasoras en el Parque Nacional Torres del Paine (Magallanes, Chile): estado del arte, distribución post-fuego e implicancias en restauración ecológica*. Paper presented at the Anales del Instituto de la Patagonia.