



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

Análisis espacial del hábitat potencial del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en la Reserva de Biosfera Corredor biológico Nevados de Chillán- Laguna del Laja

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Javiera Fernanda Jiménez Cares

Profesor Guía:
Dr. Mauricio Aguayo Arias

CONCEPCIÓN (Chile), 2026



Universidad de Concepción



Análisis espacial del hábitat potencial del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en la Reserva de Biosfera Corredor biológico Nevados de Chillán- Laguna del Laja

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Alumna: Javiera Fernanda Jiménez Cares

Profesor guía: Mauricio Aguayo

CONCEPCIÓN (Chile), 2026

Hoja de Calificación



“Análisis espacial del hábitat potencial del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán- Laguna Laja”

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesor Guía: Ms. Jorge Féliz Bernal

Profesor Comisión: Dr. Claudio Valdovinos Zarge

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, julio 2026

Índice

1.	Agradecimientos	7
2.	Resumen.....	8
3.	Introducción.....	9
3.1	La importancia del Huemul	9
4.	Problemática	10
4.1	Pregunta de investigación	10
4.2	Objetivo General	10
4.3	Objetivos Específicos.....	10
5.	Antecedentes	11
5.1	Nicho ecológico.....	11
5.1.1	Modelos de distribución de especies	11
5.2	El huemul	12
5.2.1	Biología del Huemul	12
5.2.2	Distribución	13
5.2.3	Hábitat.....	14
5.2.4	Dieta y alimentación.....	15
5.3	Estado de conservación	16
5.3.1	Esfuerzos de conservación del huemul de Chile central	17
5.3.2	Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja ..	18
6.	Metodología	19
6.1	Área de estudio	19
6.2	Modelación del hábitat potencial del huemul	20
6.2.1	Fuentes de información	20
6.2.2	Modelo estadístico	21
6.2.3	Análisis exploratorio de los datos (EDA) y depuración de las variables	21
6.2.4	Calibración y validación del modelo	22

6.3	Identificación de amenazas	22
6.3.1	Fuente de información	22
6.3.2	Análisis espacial y cuantificación de amenazas	22
6.3.3	Análisis espacial de coberturas y uso de suelo	23
6.3.4	Proyección del hábitat potencial bajo escenario de cambio climático	24
6.4	Propuestas	25
7.	Resultados y discusión	25
7.1	Hábitat potencial del huemul	25
7.1.1	Validación del modelo de distribución	25
7.1.2	Proyección espacial del hábitat potencial	27
7.1.3	Variables ambientales determinantes	30
7.2	Amenazas	32
7.2.1	Cartografía	36
7.3	Implicancias para la conservación.....	45
7.3.1	Representatividad del hábitat potencial en áreas de importancia para la conservación.....	45
7.4	Síntesis de resultados y jerarquización de amenazas.....	47
7.5	Alcances y limitaciones del modelo predictivo	48
7.6	Propuestas de conservación	49
7.6.1	Fortalecimiento del Sistema de Áreas Protegidas	49
7.6.2	Reconocimiento Institucional de la Reserva de Biosfera.....	49
7.6.3	Gestión de la Zona de Amortiguación y Corredores Buffer	50
7.6.4	Regulación Turística y Transición hacia el Ecoturismo.....	50
7.6.5	Monitoreo Estratégico y Tecnológico de Bordes	50
7.6.6	Educación Ambiental Integral y el legado de Mistral	50
7.6.7	Restauración Ecológica y Resiliencia del Paisaje.....	51
8.	Conclusiones.....	51

9.	Referencias	54
10.	Anexos	57

1. Agradecimientos

Creo que el errar es humano,
Que los errores son cosa del humano,
son ese espacio donde se transforma el miedo en valentía
donde decidiste cambiar de dirección y correr riesgos
que te acercan a lo que necesitas para evolucionar en sabiduría
creo que los errores no son tan malos como nos han dicho.

Agradezco a los errores que me mostraron como acertar
a todos aquellos seres que han sido parte de este viaje,
a Gabriela por guiar mi camino.

2. Resumen

El huemul (*Hippocamelus bisulcus*) “*quiere decir la sensibilidad de una raza: sentidos finos, inteligencia vigilante, gracia. Y todo eso es defensa, espolones invisibles, pero eficaces, del espíritu*” (Mistral, 1925). Cérvido endémico y en Peligro Crítico en Chile central, enfrenta un severo riesgo de extinción en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja. La presente investigación tuvo como objetivo analizar espacialmente el hábitat potencial de la especie, cuantificando su nivel de conservación y su vulnerabilidad ante presiones territoriales. Metodológicamente, se desarrolló un modelo predictivo mediante el algoritmo de machine learning Maxent, utilizando registros de presencia y variables bioclimáticas y topográficas. Posteriormente, mediante geoprocésamiento, la predicción fue traslapada con el catastro de usos de suelo, cartografía de amenazas antrópicas y proyecciones de cambio climático.

Los resultados evidencian un modelo altamente robusto ($AUC = 0.985$), indicando que el 76% del hábitat de alta idoneidad se asocia a coberturas de vegetación natural. Sin embargo, más del 60% de este hábitat óptimo recae en la zona de amortiguación, careciendo de protección formal. A nivel de amenazas, la infraestructura, la red vial y el turismo comprometen de manera directa las áreas de refugio, fragmentando el paisaje y facilitando el ingreso de perturbaciones secundarias como el ganado y perros de libre deambular. Asimismo, la proyección climática advierte una pérdida severa de las áreas de alta idoneidad a mediano plazo. Se concluye que la actual designación de áreas núcleo es insuficiente, por lo que se proponen medidas como: la ampliación de áreas protegidas, el establecimiento de corredores, la regulación de la capacidad de carga turística, la restauración del paisaje y una educación ambiental integral. Estas medidas buscan forjar la voluntad social y la conectividad estructural necesarias para garantizar la supervivencia de la especie.

Palabras clave: *Hippocamelus bisulcus*, Maxent, modelación espacial, conservación, manejo adaptativo, Reserva de Biosfera

3. Introducción

3.1 La importancia del Huemul

La gran maestra, pedagoga, poetisa chilena y premio Nobel Literatura, Gabriela Mistral en 1925, escribió sobre la situación del huemul:

“Mucho se ha insistido, lo mismo en las escuelas que en los discursos gritones, en el sentido del cóndor, y se ha dicho poco de su compañero heráldico, el pobre huemul, apenas ubicado geográficamente.”

A través del recado titulado “Menos Condor y Más Huemul” Gabriela realiza una metáfora entre dichas especies, desvelando su valor como símbolo de la identidad chilena (Sepúlveda, 2022). Allí, la autora deja en claro que el huemul es más que solo un ciervo nativo de Chile; pues encarna la gracia y refleja la dualidad del espíritu en el emblema patrio, o como también menciona en su recado *“quiere decir la sensibilidad de una raza: sentidos finos, inteligencia vigilante. Y todo eso es defensa, espolones invisibles, pero eficaces, del espíritu”* (Mistral, 1925).

La poetisa logra destacar con palabras lo intangible de una especie, le entrega realidad a aquello que se siente, destacando sus cualidades por el solo hecho de ser y de esta manera dilucidando su valor intrínseco. Desde una apreciación cultural y espiritual, resalta la necesidad de prestar mayor atención a la protección del huemul, abogando por una identidad nacional que valore la conservación y el respeto por la naturaleza. Siendo el huemul un símbolo vital para el futuro del patrimonio natural del país.

En la actualidad la población del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) está presente en las regiones más australes de Chile y Argentina, desde la región de los Ríos hacia el sur (Vila, 2006). Existiendo una pequeña población al norte de la Patagonia, en las regiones de Ñuble y Biobío. Esta población representa un remanente con respecto a la distribución histórica y se encuentra aislada en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillan - Laguna del Laja (San Martín 2014), conformando uno de los 3 refugios de eco tipo de huemul, esto quiere decir, que debido a su adaptación evolutiva este grupo posee una genética única y de gran importancia evolutiva (Marín 2013).

Esta población septentrional de huemules, como dijo Gabriela, sigue *“... apenas ubicado geográficamente.”*, debido a qué desde 1970 los esfuerzos se han centrado en el estudio de la especie, con enfoque en los individuos y su monitoreo a través de avistamientos, toma de muestras y registros con cámaras trampa (Conaf 2009, Povilitis, López). Si bien esta información

es la base para otros estudios, aún existen brechas de conocimiento con respecto a otros temas de igual importancia para su conservación como lo son sus dinámicas de meta población (Vila et al. 2006).

Bajo este contexto, la presente investigación aborda su 'ubicación geográfica' desde el punto de vista del nicho ecológico, determinando un hábitat potencial, con ayuda del software de modelación Maxent, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos: del Plan de recuperación, conservación y gestión (RECOGE) del huemul (2021), al diseño de estrategias más eficaces de conservación en beneficio de la especie y el ecosistema circundante (Caro et al., 2004), promoviendo el mantenimiento integral de la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillan - Laguna del Laja área de importancia mundial por su gran biodiversidad (Moreira 2014) y al fortalecimiento de la resiliencia del ecosistema frente a amenazas presentes y futuras.

4. Problemática

4.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es el hábitat potencial del huemul en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillan - Laguna del Laja en Chile?

4.2 Objetivo General

Analizar el hábitat potencial del huemul para contribuir a su conservación en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillan - Laguna del Laja en Chile.

4.3 Objetivos Específicos

- Determinar y caracterizar el hábitat potencial del huemul.
- Analizar la relación espacial entre el hábitat potencial del huemul, las amenazas territoriales y las áreas bajo figuras de protección en el corredor biológico.
- Analizar las medidas de conservación del hábitat potencial del huemul.

5. Antecedentes

5.1 Nicho ecológico

La biogeografía se ha centrado en identificar los patrones espaciales y temporales lo que permite caracterizar áreas de distribución, partiendo en la relación entre especies vegetales con el clima, lo que en actualidad se ha expandido a diversos temas de todo tipo de especies incluyendo microorganismos (Pliscoff et al 2011).

Desde esta disciplina surge el concepto de nicho ecológico, en busca de la relación con el ambiente ocupado por las especies y su rol en este hábitat. Otra concepción de este concepto es la de Hutchinson (1957), quien propone que el nicho es un “hipervolumen de n-dimensiones donde se encuentran las condiciones ambientales (factores) en las cuales la especie puede sobrevivir”.

Esta última definición es fundamental para la base conceptual de modelos de distribución de especies ya que permite relacionar el espacio geográfico como un espacio multidimensional compuesto por variables ambientales. Pudiéndose identificar y caracterizar tanto los lugares donde efectivamente habita una especie que corresponde al nicho realizado, como aquellos con el potencial de sostener a la especie conocido como nicho o hábitat potencial (Pliscoff et al 2011).

5.1.1 Modelos de distribución de especies

Los primeros modelos de distribución se enfocaron en definir el nicho en base a la distribución espacial tanto matemáticamente como experimental. Luego, el desarrollo de sistemas de información geográfica sumado a los avances tecnológicos que permitieron el manejo de bases de datos de mayor tamaño permitió incluir nuevas herramientas al estudio biogeográfico del nicho (Pliscoff et al 2011). Así surgen nuevas aproximaciones estadísticas y programas computacionales basadas en la presencia y/o ausencia de especies que permiten obtener modelos de distribución simples desde la aplicación de un conjunto de principios, teorías, y análisis de la biogeografía a problemas relacionados a la conservación de la biodiversidad (Pliscoff et al 2011).

Estas herramientas permiten predecir la distribución geográfica de una especie en función de las condiciones ambientales y su relación con los registros de presencia o ausencia de una especie a través de métodos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático o “machine learning”. Estas predicciones generan mapas continuos de probabilidad, que se validan usando datos

externos y métricas como el AUC (área bajo la curva) para evaluar la precisión del modelo (Alaniz 2017).

Entre estos modelos existen los basados en algoritmos específicos, donde destaca el software Maxent, mediante el principio de “máxima entropía” estima las áreas potenciales de distribución uniforme de una especie, dadas ciertas condiciones ambientales conocidas. El software se fundamenta en técnicas de machine learning, ajustando iterativamente el modelo para aumentar su precisión utilizando pruebas estadísticas como jackknife y validación cruzada (Phillips et al., 2006). El Modelo funciona a partir de puntos de presencia que se cruzan con datos de variables ambientales para identificar patrones en las condiciones ambientales preferidas por la especie y luego los extrapola para predecir áreas con parámetros similares. Como resultado, genera archivos en formato de grilla, donde cada celda almacena el porcentaje de probabilidad de presencia lo que permite estimar el nicho ecológico de una o más especies a partir del nivel de idoneidad del territorio y del nivel de contribución de los parámetros biogeográficos utilizados.

5.2 El huemul

"El huemul es una bestezuela sensible y menuda; tiene parentesco con la gacela, lo cual es estar emparentado con lo perfecto. Su fuerza está en su agilidad. Lo defiende la finura de sus sentidos: el oído delicado, el ojo de agua atenta, el olfato agudo. El, como los ciervos, se salva a menudo sin combate, con la inteligencia, que se le vuelve un poder inefable. Delgado y palpitante su hocico, la mirada verdosa de recoger el bosque circundante; el cuello del dibujo más puro, los costados movidos de aliento, la pezuña dura, como de plata. En él se olvida la bestia, porque llega a parecer un motivo floral. Vive en la luz verde de los matorrales y tiene algo de la luz en su rapidez de flecha". (Mistral, 1925)

El huemul o Wümul en mapudungun, significa: seguir a otro haciendo referencia a cómo la especie se mueve y escabulle. Su nombre científico: *Hippocamelus bisulcus*, proviene de diversas designaciones equívocas debido a la dificultad de observación por parte de científicos, su traducción del latín sería: caballo-camello bifurcado (Aldridge et al. 2005).

5.2.1 Biología del Huemul

El huemul es un mamífero perteneciente a la familia Cervidae, de tamaño mediano, cuerpo robusto y patas cortas como respuesta a la evolutiva a su hábitat (Vila et al. 2010). Su pelaje es denso de color café grisáceo, aunque varía estacionalmente, está compuesto por cabellos tipo

neumático, ahuecados en su interior, como parte de sus adaptaciones fisiológicas, al clima frío y a las condiciones extremas de su hábitat (Povilitis 1978).

Así como otros cérvidos y ungulados, posee pezuñas que recubren el extremo de sus dedos de los cuales solo utiliza dos de apoyo (Aldridge et al. 2005) donde se encuentran las glándulas pedales, que en conjunto a las glándulas tarsales presentes en sus patas traseras y la glándula preorbital ubicada bajo el lagrimal (Vila et al. 2010), le permiten comunicarse con su entorno a través del roce con la vegetación mientras liberan feromonas con información sobre su estado reproductivo y territorialidad (Apfelbach et al. 2005, Muller-Schwarze 2006). Además, gracias a su órgano vomeronasal es capaz de detectar estas feromonas en el ambiente (Brennan 2006) agudizando sus sentidos para la detección temprana de amenazas (Aldridge et al. 2005). Si bien la presencia de estos mecanismos no ha sido descrita para el huemul, existen antecedentes para mamíferos y especies similares (Apfelbach et al. 2005, Muller-Schwarze 2006).

El dimorfismo sexual es un rasgo distintivo del huemul, observable en la diferencia de tamaño y peso corporal entre la hembra y el macho, donde la hembra puede alcanzar un largo de 1,55 metros y un peso de 70 kilogramos mientras que el macho alcanza 1,60 metros de largo y de 75 a 80 kilogramos de peso, además este último desarrolla un par de astas bifurcadas desde los 6 meses de edad que voltea cada año y vuelven a aparecer en época de invierno y poseen una marca facial oscura en forma de 'Y' (Vila et al. 2010).

En cuanto a su reproducción, esta se caracteriza porque la hembra da a luz un único cervatillo por año tras 7 meses de gestación, que es cuidado hasta el año de vida por ambos padres, quien de ser hembra se mantiene con la pareja por un tiempo prolongado y de ser macho es ahuyentado, siendo estos los que se movilizan en búsqueda de su par, gracias a esto existe un intercambio de genes entre grupos, sin embargo, este viaje en solitario aumenta las probabilidades de mortalidad frente a predadores naturales como el puma (*Puma concolor*) y el zorro culpeo (*Pseudalopex spp.*) y amenazas externas como la caza furtiva y el ataque de perros domésticos o asilvestrados (Aldridge et al. 2005, Vila et al. 2010)

5.2.2 Distribución

Endémico del sur de la cordillera de los Andes el huemul originalmente se encontraba desde el río Cachapoal (34,5° S) hasta el estrecho de Magallanes (54° S) en Chile y en Argentina entre los 36,5° y 54° latitud sur (Marín et al. 2013). Con la llegada de los colonos europeos (acostumbrados a cazar ciervos) la abundancia poblacional se redujo, sumado a la expansión de la actividad antropogénica y la modificación de ecosistemas terrestres, la introducción de ganado

con sus respectivas enfermedades provocó una reducción significativa de las áreas ocupadas por poblaciones de huemul (Aldridge et al. 2005), extinguiéndose de la región del Maule y sin registros de presencia entre los 38° y los 41° Sur en Chile (Vila et al. 2004)

La distribución actual en Chile corresponde a menos del 50% con respecto a la histórica (Marín et al. 2013). Se concentra en las regiones más australes de Chile y Argentina, desde la región de los Ríos hacia el sur (Vila, 2006). Sin embargo, a 400 y 700 Km de distancia de la población más cercana en Argentina y Chile respectivamente, existe una pequeña población septentrional entre las regiones de Ñuble y Biobío (Marín et al. 2013, Vila et al. 2010). Este núcleo de huemules remanente altamente aislado en la zona del Nevados de Chillán, dentro de la Reserva de Biosfera Corredor biológico Nevados de Chillán tiene alta probabilidad de extinguirse (San Martín 2014, Vila et al. 2010, Vila et al. 2004), y un alto valor de conservación ya que conforma uno de los 3 refugios de eco tipo de huemul, esto quiere decir, que debido a su adaptación evolutiva en esta zona tan específica, el grupo posee una genética muy diferente a la genética del resto de huemules en Chile y de gran importancia evolutiva (Marín et al. 2013).

5.2.3 Hábitat

El huemul de Chile central habita en la cordillera de los Andes a gran altitud donde predominan terrenos escarpados, bosques de Nothofagus, vegetación altoandina y zonas con pendiente rocosas (Povilitis, 1998), comprende un extenso y diverso territorio ya que en épocas estivales de calor prefiere las cumbres, pero en las épocas frías baja a las laderas en busca de cobijo.

Si bien el huemul no realiza migraciones, tiende a desplazarse estacionalmente. De acuerdo con el estudio realizado por Figueroa et al. (2007) en los Nevados de Chillán, se distinguen 2 tipos de hábitat:

- Hábitat invernal: En invierno tiende a desplazarse hacia sitios de menor elevación en busca de refugio contra las bajas temperaturas y la nieve, ocupando bosques densos de Nothofagus combinado con especies esclerófilas como arrayán (*Luma apiculata*) y radial (*Lomatia hirsuta*) que forman un dosel lo suficientemente cerrado para su resguardo y alimentación.
- Hábitat estival: En la temporada cálida y de reproducción el hábitat del huemul se caracteriza por la ocupación de pequeñas zonas entre los 1.500-2.200 m de elevación, con presencia de agua, pastizales húmedos y parches densos de bosque achaparrado en medio de extensas áridas, lo que Figueroa (2007) llamó oasis y que correspondería a mallines según la definición de humedales altoandinos (Ramsar 2008), la vegetación

corresponde a parches de páramela (*Adesmia emarginata*), notro (*Embothrium coccineum*), ñirre (*Nothofagus antártica*), lenga (*N. pumilio*), estos parches también son utilizados como zonas de refugio y pernoctación.

En la época estival el huemul se ve forzado a compartir el hábitat con ungulados exóticos como bovino y caprinos debido a las veranadas, un tradicional movimiento de ganado por parte de arrieros a las zonas altas con el fin de alimentarlo. Esto provoca un desplazamiento por competencia tanto de espacio como de alimento del huemul, hacia el sur en Parque nacional Bernardo O'Higgins se ha reportado cambios en el uso del hábitat por la introducción de vacuno (Vila et al. 2010) además existe mayor probabilidad de transmisión de enfermedades entre ungulados y ataque de perros (Vila et al. 2010, Marín et al. 2013, Povilitis 1998)

5.2.4 Dieta y alimentación

El huemul es un herbívoro rumiante por lo que evita pastos altos en fibra que dificultan la digestión, en cambio prefiere brotes, ramitas de plantas leñosas de buena calidad nutricional, aunque su disponibilidad sea menor (Figuerola et al. 2007, Vila et al. 2010)

Figuerola (2007) identificó que en la dieta del huemul de Niblinto predominan herbáceas como la páramela (*Adesmia emarginata*), especies de orquídeas (*Chloraea spp.*) y algunas Calceolaria spp., seguidas de arbustos como el notro (*Embothrium coccineum*), la chaura (*Gaultheria pumila*), leña dura (*Maytenus disticha*), Lilén de la cordillera (*Azara alpina*), y muy pocas especies arbóreas principalmente de *Nothofagus* como el ñirre (*Nothofagus antártica*).

En resumen, la dieta del huemul se compone mayormente de flora autóctona de esta zona de la cordillera de los Andes, cuya disponibilidad es crucial para su supervivencia. Al depender de estas especies vegetales propias del entorno, el huemul se clasifica como una especie especialista, dado que su existencia está estrechamente vinculada a las características específicas de su hábitat (Devictor et al. 2010).

Figura 1.

Especies de flora nativa que forman parte de la dieta del huemul de la Reserva Nacional Huemules de Niblinto.



Nota: a) Notro (*Embothrium coccineum*), b) Chaura (*Gaultheria* spp.), c) Barba de viejo (*Protousnea* spp.), d) Páramela (*Adesmia* spp), e) Orquídeas (*Chloraea* spp.), f) Ñirre (*Nothofagus antártica*).

5.3 Estado de conservación

Actualmente, la población septentrional de huemules de Ñuble y Biobío se clasifica En Peligro Crítico (CR), bajo los criterios de la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Esta categoría refleja su alto nivel de aislamiento geográfico, un tamaño poblacional reducido debido a amenazas latentes, sumado a riesgos asociados a su singularidad genética y su especificidad de hábitat, en contraste con otras poblaciones de Chile clasificadas como En Peligro (EN) (Garces 2020, Povilitis 1998, Marín et al., 2013).

Las medidas de conservación implementadas abarcan un extenso territorio que incluye ecosistemas críticos como mallines, estepa altoandina, bosque templado valdiviano y matorral esclerófilo. Estos hábitats albergan, a su vez, una gran biodiversidad, desde anfibios endémicos como el sapito hermoso (*Telmatobufo venustus*), aves emblemáticas como carpintero negro (*Campephilus magellanicus*), hasta grandes depredadores como el puma (*Puma concolor*). Debido a esto el huemul actúa como especie paraguas, ya que su conservación asegura indirectamente la supervivencia de estas especies y la integridad de los ecosistemas que coexisten, tal como propone el concepto de Caro et al. (2004).

5.3.1 Esfuerzos de conservación del huemul de Chile central

La primer acción por la conservación del huemul se remonta a 1929 con la proclamación de la Ley N°4.601 que prohibió su caza y comercialización. Décadas más tarde pese a las dudas sobre la existencia de la especie, con financiamiento internacional y la asesoría de Anthony Povilitis, CONAF llevó a cabo a inicio de la década de los 70 investigaciones con el fin de confirmar la presencia del Huemul en la zona del Nevados de Chillán, con las cuales se elaboró un plan de acción y requerimientos para una posible área protegida.

Gracias a estas bases, mediante los Decretos Supremos N° 295 de 1974 y N° 391 de 1978 del Ministerio de Agricultura, se crea un Área de Protección Cordillerana en las cuencas de los ríos: Laja, Polcura, Cholguán, Diguillín, Chillán, Niblinto y Ñuble. Con el fin de proteger, entre otras cosas, los últimos recursos de flora y fauna, preservar las bellezas escénicas y los lugares donde habitaba el huemul (Garcés 2020).

A finales de la década de los 70, se crea en predios fiscales la Reserva Nacional Ñuble abarcando 75.000 ha. para la conservación del huemul a cargo de CONAF destacando el trabajo del guardaparques Eladio Ramírez. Este avance permitió destinar fondos y mantener un monitoreo del estado de la población de huemules durante las siguientes décadas, desde el río Ñuble hasta la laguna del Laja donde diversas instituciones han sido parte, tanto internacionales como nacionales, incluyendo al centro EULA de la Universidad de Concepción.

Posteriormente en los 90' se crea un el “Comité de recuperación del Huemul en los Nevados de Chillán” dirigido por CONAF y CODEFF. Su principal función fue la coordinación entre el mundo público, privado y la academia para el monitoreo del huemul en la zona. Generando planes de trabajo con acciones como educación ambiental, protección hábitat para futuras áreas protegidas y campañas de difusión.

En 1998, la Sociedad Zoológica de Frankfurt financia la creación del Santuario de la Naturaleza Huemules de Niblinto con un área de 7.530 ha. a cargo de CODEFF. Al año siguiente, la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), como parte de una compensación ambiental, permite anexar una superficie de 2.022 ha. denominada Reserva Nacional Huemules de Niblinto y administrada por CONAF. De la misma manera, mediante una compensación ambiental por la construcción del gaseoducto y oleoducto Trasandino que pasa por la Reserva Nacional Ñuble, esta se amplía en 2.000 ha. en el sector El Trumao permitiendo proteger el hábitat invernal de la especie (CONAF, 2014).

Luego del cambio de milenio, el huemul es declarado Monumento Natural mediante el Decreto Supremo N° 214, revalidando su protección en el marco de la ley de Caza N° 19.473. Y fue declarada especie En Peligro a nivel nacional según el reglamento de clasificación de especies del Ministerio de Medio Ambiente mediante Decreto Supremo N°50.

A estos esfuerzos se le suman iniciativas privadas del rubro forestal, como la creación de “Áreas de Alto Valor para la Conservación” (AVVC) por parte de ARAUCO, con el AVVC Huemules de Ñuble con una superficie de 12331 ha adyacentes al Santuario de la Naturaleza, y por parte de CMPC con el AVVC Rucamanqui con 4601 ha. Entre otras más actuales como Jungla Peumayen.

El esfuerzo más actual corresponde a la elaboración y posterior aprobación bajo el Decreto Supremo N° 4 del Ministerio del Medio Ambiente, del Plan de Recuperación Conservación y Gestión del huemul financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) como parte del programa de la Organización Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Cuya finalidad es disminuir las amenazas que afectan a la especie además de aumentar la protección y su población en la zona de la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja. Esta área fue reconocida por la UNESCO en 2011 como Hotspot de biodiversidad, por su alto valor para la conservación y se le otorga el título de Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja (Marín 2013).

5.3.2 Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja

En 2004 el Área de Protección Cordillerana creada en 1978 por el Ministerio de Agricultura, evoluciona al Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja abarcando 560.000 ha, ya que se identifica como una zona de alta prioridad para la conservación de la biodiversidad y se formaliza en 2006 a través de un convenio multisectorial de más de 30 organizaciones encabezadas por el Gobierno Regional del Biobío e identifica al huemul como uno de sus objetos de conservación.

En junio del 2011 el Corredor Biológico es reconocido internacionalmente por la UNESCO Bajo la distinción de Reserva de Biosfera por su importancia para la conservación por su alta biodiversidad. Dentro de los compromisos de la declaración se encuentra la elaboración de un plan de gestión de esta área donde se identifican zonas núcleo, de amortiguación y transición. Dentro de zonas núcleo se encuentran las áreas protegidas por el estado de Chile caracterizadas por la protección del huemul, Reserva Nacional Ñuble y Reserva Nacional y Santuario de la Naturaleza Huemules de Niblinto además del Parque Nacional Laguna del Laja.

Actualmente, gracias a una colaboración público-privada y el apoyo de instituciones académicas el plan de gestión está en proceso de ejecución. Este esfuerzo busca implementar acciones concretas para la conservación del huemul y su hábitat, mediante principios de desarrollo sostenible en las zonas de amortiguación y transición. Las iniciativas incluyen prácticas de ecoturismo, educación ambiental, monitoreo de la biodiversidad, entre otras que aseguren la preservación de este ecosistema único en el mundo.

6. Metodología

Con el objetivo de contribuir a la conservación del huemul en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja esta tesis analiza el hábitat potencial del huemul utilizando herramientas de modelación y análisis espacial como Maxent y Qgis. Además, se realizó una revisión bibliográfica para identificar amenazas clave relacionadas con la presión humana y el cambio climático, lo que se analizó mediante mapas y métricas que permiten conocer el estado actual del hábitat y proponer medidas de conservación para la especie.

6.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja. Se localiza en la zona cordillerana de Ñuble y Biobío, abarca un aproximado de 560.000 ha. que conectan áreas protegidas destinadas a la conservación del huemul y otros elementos clave para la biodiversidad. Este territorio se destaca por ser un ecotono o zona de transición, donde convergen ecosistemas característicos del clima mediterráneo y del clima templado lluvioso.

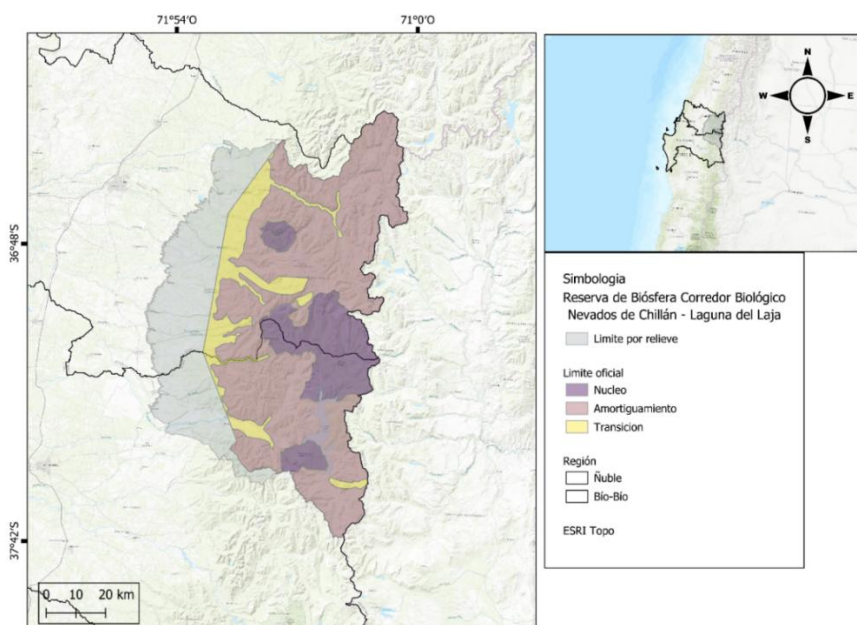
- Ecorregión mediterránea: presenta veranos con baja disponibilidad hídrica e inviernos lluviosos. Genera un ecosistema dominado por especies adaptadas a condiciones de sequía que componen el bosque esclerófilo como el radal.
- Ecorregión templado lluvioso: se caracteriza por una pluviosidad y biodiversidad altas, con bosque de tipo valdiviano donde predominan especies de la familia *Nothofagus* como la lenga y el ñirre.

Además, se pueden encontrar zonas de estepa altoandina, ecosistema de alta montaña que constituyen el principal refugio del huemul. La combinación de estos ecosistemas genera una riqueza ecológica que posiciona a la reserva, a nivel internacional, como un Hotspot de biodiversidad y refuerza su importancia de área clave para la conservación del huemul.

Considerando que los límites establecidos en la declaratoria de Reserva de Biosfera presentada ante la UNESCO no responden a criterios geomorfológicos, para el cálculo de estadísticas zonales y un análisis espacial más representativo se utilizó un shapefile con límites que se ajustan a dichos criterios, facilitado por el investigador Jorge Felez de la Universidad de Concepción.

Figura 2.

Mapa del área de estudio Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja.



6.2 Modelación del hábitat potencial del huemul

6.2.1 Fuentes de información

Los datos de presencia de huemul (*Hippocamelus bisulcus*) utilizados para la calibración del modelo predictivo provienen del repositorio de datos georreferenciados administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la Región de Ñuble, en el marco del Plan de Recuperación, Conservación y Gestión (RECOGE) de la especie. Dicha información fue facilitada para la presente investigación a través del proyecto FIC "Gestión Ambiental Sustentable de la Reserva de la Biósfera Nevados de Chillán - Laguna Laja", vinculado al Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. Corresponden a una grilla en formato shapefile con resolución de 2 km² de presencia, que compila monitoreos históricos del huemul por parte de CONAF y privados. A partir de esta grilla se obtuvieron puntos de presencia utilizando Qgis, que corresponden al centroide de cada celda. Este procedimiento permitió evitar datos duplicados y reducir el riesgo de sobre muestreo obteniendo un total de 119 puntos de presencia.

En cuanto a las variables ambientales y biogeográficas, estas fueron descargadas desde la plataforma WorldClim en formato ráster con una resolución espacial de $\sim 1 \text{ km}^2$, luego fueron ajustadas en Qgis al área de estudio y transformadas a un formato compatible con Maxent. Entre las variables descargadas se incluyen parámetros climáticos y biogeográficos clave, tales como:

Temperatura – Precipitación – Elevación – Producción Primaria neta de Carbono (NPP) – Carbono fijado en el suelo (SOC) – Biomasa – Fracción de carbono vegetal (VCF) – índice de vegetación (EVI) – índice de diferencia normalizada de agua (NDWI) – Evapotranspiración (ET)

6.2.2 Modelo estadístico

Para determinar el hábitat potencial del huemul se utilizó el software Maxent (versión 3.4.4), que modela la distribución de especies en función de datos de presencia y variables ambientales, permitiendo identificar patrones de preferencias de hábitat de la especie. Maxent extrapola estos patrones para predecir áreas con parámetros similares dentro del área de estudio generando un mapa de probabilidad de presencia que permite identificar el hábitat potencial del huemul y así orientar estrategias de conservación.

Siguiendo los enfoque metodológicos de Alaniz (2017) para la evaluación de idoneidad de hábitat, se utilizó Cross-validation como método de evaluación del modelo en función de la cantidad de datos de presencia y la extensión del área de estudio. En total se realizaron 7 réplicas por modelo, es decir, los datos se dividieron en 7 subconjuntos aleatorios, iterando el modelo de manera que 6 grupos se destinan a entrenamiento y 1 a la validación independiente. Esta partición en 7 réplicas garantiza que el modelo maximice el uso de registros sin incurrir en un sobreajuste estadístico, asegurando que el modelo resultante sea representativo. Además, se utilizó random-seed para reducir el sesgo derivado del muestreo, lo que permitió estimar la variabilidad del modelo y garantizar una predicción robusta del hábitat potencial del huemul.

6.2.3 Análisis exploratorio de los datos (EDA) y depuración de las variables

Previo a la ejecución del modelo predictivo, se llevó a cabo un Análisis Exploratorio de Datos (EDA) para asegurar la calidad y coherencia de las variables bioclimáticas y topográficas de entrada. Para esto se utilizó el software R (versión 4.3.3) en R studio (versión 2024.04.1 Build 748). En primera instancia los datos fueron normalizados para estandarizar las diferentes escalas de medición de las variables ambientales y asegurar su comparabilidad dimensional.

Luego se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables para identificar multicolinealidad entre variables. Del conjunto inicial de 30 variables ambientales aquellas con

un coeficiente de correlación superior a 0.7 fueron descartadas, obteniendo un subconjunto de 13 variables predictoras con baja colinealidad para la ejecución del modelo final. Este rigor analítico garantizó la reducción del ruido estadístico, conservando únicamente los parámetros con mayor significancia e independencia ecológica, lo que mejoró sustancialmente la robustez, precisión e interpretabilidad del modelo generado en Maxent.

6.2.4 Calibración y validación del modelo

Inicialmente, se realizó una modelación preliminar utilizando todas las variables ambientales disponibles para evaluar el comportamiento del modelo. Posteriormente, tras el análisis de correlación realizado en R, se generó un segundo modelo utilizando aquellas variables que no presentaban una correlación significativa (coeficiente de correlación < 0.7).

Ambos modelos se validaron mediante la técnica de cross-validation con un total de 7 réplicas. Y el desempeño de los modelos se evaluó mediante métricas como el área bajo la curva (AUC) y jackknife que entrega el mismo software Maxent.

6.3 Identificación de amenazas

6.3.1 Fuente de información

La principal fuente de información para la identificación de amenazas correspondió a la revisión bibliográfica existente entre los que destaca el libro “los últimos senderos del huemul” además de estudios científicos donde destacan autores como Anthony Povilitis que ha centrado sus investigaciones en el área de estudio.

En cuanto a la información cartográfica de algunas de estas amenazas, estas fueron obtenidas de distintas bases de datos de libre acceso tanto gubernamentales como no gubernamentales, entre ellas se encuentra la base de datos del Instituto nacional de Estadística INE y CONAF. Además, se utilizaron datos obtenidos mediante Google Earth Engine desde bases de datos abiertas como Open Buildings con una resolución de 50 cm y OpenStreetMap (OSM).

6.3.2 Análisis espacial y cuantificación de amenazas

Para evaluar la vulnerabilidad del hábitat potencial del huemul frente a las presiones antrópicas identificadas, se realizó un análisis mediante la superposición espacial de capas de amenazas georreferenciadas y los resultados de la modelación espacial entregada por Maxent a través del software QGIS (versión 3.34.2)

Para esto, el modelo continuo de probabilidad de presencia generado por Maxent fue importado al entorno SIG y reclasificado para definir las áreas de hábitat potencial, lo que permitió categorizar el territorio en niveles de idoneidad, tal como indica la tabla resumen

Tabla 1:

Umbral de clasificación para las categorías de idoneidad del hábitat potencial del huemul.

Idoneidad	Límite inferior	Límite superior
Nula	0	0.25
Baja	0.26	0.5
Media	0.51	0.75
Alta	0.76	0.1

6.3.3 Análisis espacial de coberturas y uso de suelo

En cuanto a las capas correspondientes a las amenazas identificadas tales como: Edificaciones, incendios, peligro volcánico, rutas turísticas, fueron proyectadas en el sistema de coordenadas geográficas estandarizado UTM SIRGAS-Chile 2021. Además, se generaron áreas de influencia o buffers de 150 metros para cada lado desde el eje central tanto para edificaciones puntuales como lineales incluyendo red vial, rutas turísticas, como para infraestructura puntual principalmente del tipo habitacional. Esto con el fin de asegurar un análisis más exhaustivo que incorpora la dinámica territorial entorno a la presencia antrópica, representando un área de influencia más realista sobre el hábitat de la especie.

Para evaluar la disponibilidad física de los refugios y comprender la configuración de la matriz paisajística del área de estudio, utilizó al Catastro de los Recursos vegetacionales nativos de Chile elaborado por CONAF (2024) tanto para la región del Biobío como Ñuble. Dado el alto nivel de especificidad de este catastro, el cual desglosa el territorio en más de 20 sub usos distintos, se procedió a realizar una reclasificación cartográfica mediante herramientas de geoprocésamiento en QGIS (versión 3.34.2).

Esta reclasificación se basó en la funcionalidad ecológica que cada cobertura ofrece a los requerimientos biológicos del huemul, agrupándolas en cinco categorías representativas como se puede ver en la Tabla 2. Así, algunos elementos fundamentales para la supervivencia estival e invernal de la especie, como los mallines (clasificados como Vegas en el catastro), el Bosque Nativo y el Bosque Mixto, fueron agrupados bajo la clase de Cobertura Vegetal, asumiendo que mantienen una estructura de dosel y sotobosque capaz de brindar forraje y protección.

Tabla 2:
Reclasificación funcional de usos de suelo.

Categoría	Sub-Uso de Suelo
Cobertura Vegetal	Bosque nativo, Bosque mixto, Matorral, Matorral arborescente, Otros terrenos húmedos, Vegas
Zonas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos, Corridas de Lavas y Escoriales, Derrumbe sin Vegetación, Otros sin Vegetación, Terrenos sobre el Límite Altitudinal de la Vegetación, Playas y Dunas
Cuerpos de agua y hielo	Lagos, Lagunas, Embalses, Tranques, Ríos, Cajas de Ríos, Nieves, Glaciares
Actividad Agropecuaria	Praderas, matorral-pradera, Rotación Cultivo-Pradera, Terreno de Uso Agrícola
Plantaciones Forestales	Plantaciones Forestales
Asentamientos e Industria	Ciudades, Pueblos, Zonas Industriales, Minería Industrial

6.3.4 Proyección del hábitat potencial bajo escenario de cambio climático

Para evaluar la resiliencia y la respuesta espacial del hábitat del huemul ante la crisis climática, se proyectó el modelo de distribución a un horizonte de 50 años. Los datos espaciales fueron obtenidos desde la plataforma WorldClim (CMIP6) que utiliza la base de datos WorldClim v2.1 como clima de referencia actual.

Considerando el estatus de conservación de la subpoblación evaluada (En Peligro Crítico), se seleccionó el escenario de emisiones más catastrófico para evaluar la peor respuesta posible del hábitat (SSP5-8.5). Para el período de 20 años comprendido entre 2061 y 2080. Con una resolución espacial de 30 segundos (aproximadamente $\sim 1 \text{ km}^2$), garantizando así la total consistencia geométrica dimensional con las variables ambientales utilizadas en la calibración del modelo presente. Así, estas capas futuras fueron integradas al algoritmo Maxent como variables de proyección, permitiendo mapear cartográficamente la persistencia, pérdida o desplazamiento de los núcleos de alta idoneidad en el mediano plazo.

Finalmente se cruzaron los polígonos de idoneidad de hábitat con las coberturas de cada amenaza mediante la herramienta de intersección espacial de Qgis para luego cuantificar a través de la calculadora de campos geométrica la superficies en hectáreas. Esto permitió establecer porcentajes de afectación para las distintas áreas de idoneidad de hábitat para el huemul.

6.4 Propuestas

Las propuestas de conservación presentadas en este estudio se basan en los resultados obtenidos a partir de la modelación del hábitat potencial del huemul, el análisis de las amenazas identificadas en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán Laguna del Laja y en las sugerencias propuestas por especialistas en base a una exhaustiva revisión bibliográfica.

Para la efectividad de las medidas propuestas se clasificaron los resultados de probabilidad de presencia en niveles de idoneidad (IDN) de la siguiente manera:

Con esto se buscó identificar las áreas críticas en la conservación de esta especie presentando propuestas enfocadas en mitigar las amenazas y estrategias orientadas en la gestión sostenible del territorio.

7. Resultados y discusión

7.1 Hábitat potencial del huemul

Esta sección expone los resultados obtenidos mediante la modelación del hábitat potencial del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en el Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja. La modelación se desarrolló en MaxEnt considerando datos georreferenciados de presencia y variables ambientales clave (climáticas, topográficas y de cobertura vegetal). Para garantizar la robustez de las predicciones, se implementó una validación cruzada con 7 réplicas, evaluando el desempeño del modelo mediante el AUC y el análisis de tasas de omisión/comisión. Los valores de AUC superiores a 0.8 indicaron una alta capacidad predictiva, respaldando la confiabilidad de los patrones espaciales identificados. A continuación, se detallan los mapas de idoneidad de hábitat, las contribuciones de las variables ambientales y los patrones de distribución asociados a la presencia de la especie en su rango septentrional.

7.1.1 Validación del modelo de distribución

El modelo de distribución desarrollado en Maxent mostró un AUC promedio de 0.985 en las 7 réplicas de validación cruzada con una desviación estándar de ± 0.003 , indicando una capacidad predictiva muy alta según los criterios de Phillips et. al. (2006) donde valores mayores a 0.9 se consideran robustos para estudios ecológicos.

Figura 3.

Sensibilidad del modelo predictivo (Curva ROC) para Hippocamelus bisulcus.

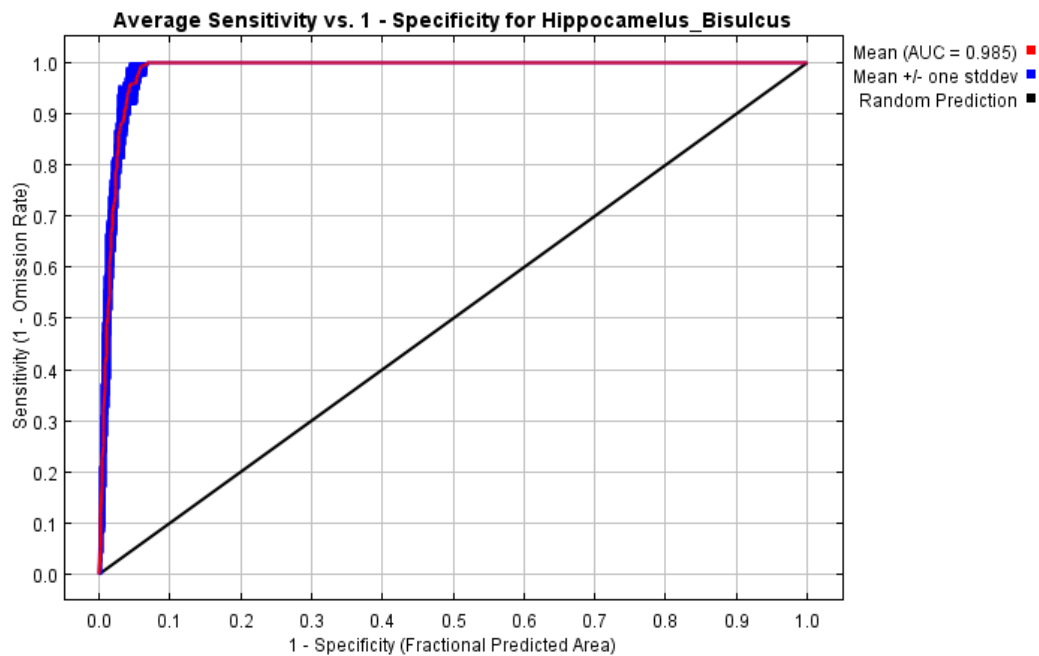
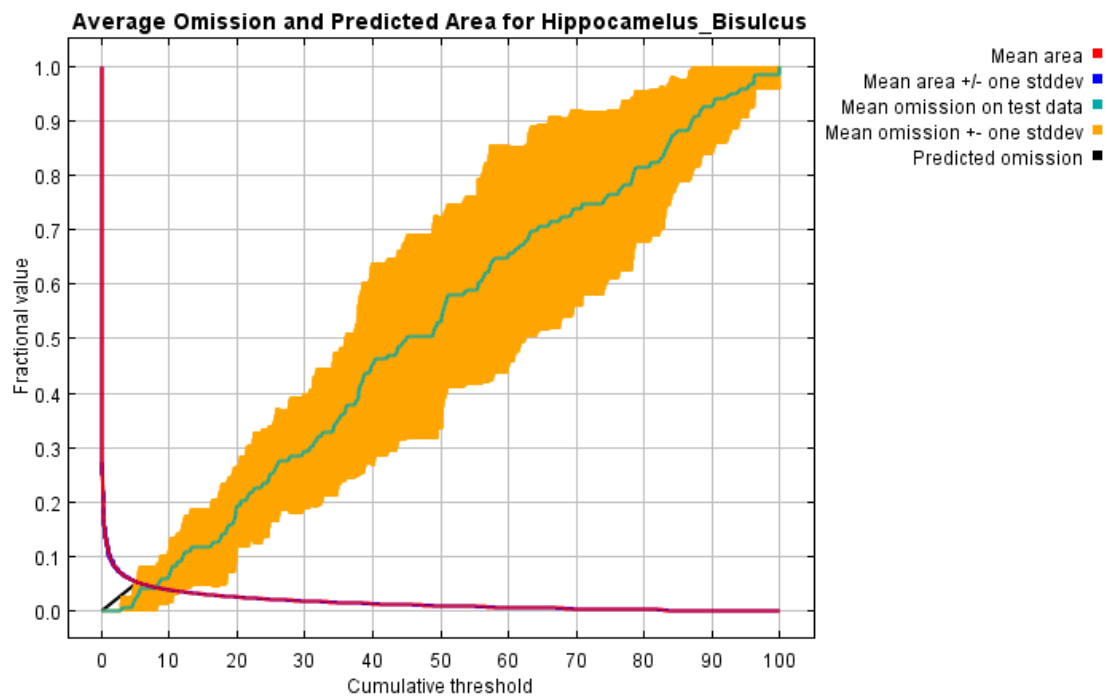


Figura 4.

Tasa de omisión promedio y fracción del área predicha para Hippocamelus bisulcus.



La forma de la curva (Figura 3) refleja una alta especificidad y sensibilidad, con baja tasa de falsos positivos, es decir el modelo detecto correctamente áreas con presencia y ausencia de huemul, capturando patrones ecológicos confiables y evitando incluir áreas no relevantes. Por otra parte, la tasa de omisión observada se ajustó a la esperada, es decir la curva observada se acerca mucho a la teórica por lo que no hay sobreajuste, validando la consistencia espacial del modelo.

El alto AUC coincide con estudios previos de modelación de cérvidos en ambientes andinos (ej. 0.92 en Alaniz, 2017). La baja variabilidad entre réplicas (± 0.003) sugiere que el modelo es estable ante particiones aleatorias de los datos.

En cuando a la valor p para validar el modelo, dentro de los resultados, el mayor valor del estadístico t de student entregado por Maxent es cercano a 0 (0.1758) lo que quiere decir que la diferencia entre os modelos creados es muy baja por tanto el modelo final es representativo para la especie.

7.1.2 Proyección espacial del hábitat potencial

Figura 5.

*Mapa de hábitat potencial para *Hippocamelus bisulcus* modelada en Maxent.*

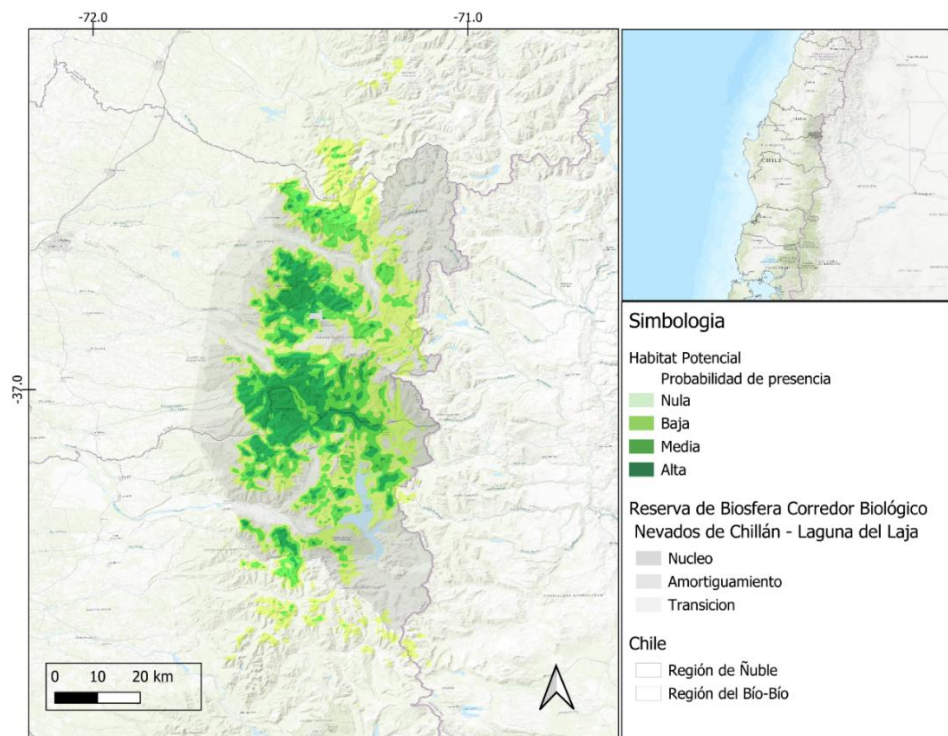


Figura 6.

Distribución del hábitat potencial para Hippocamelus bisulcus en la Reserva de biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja.

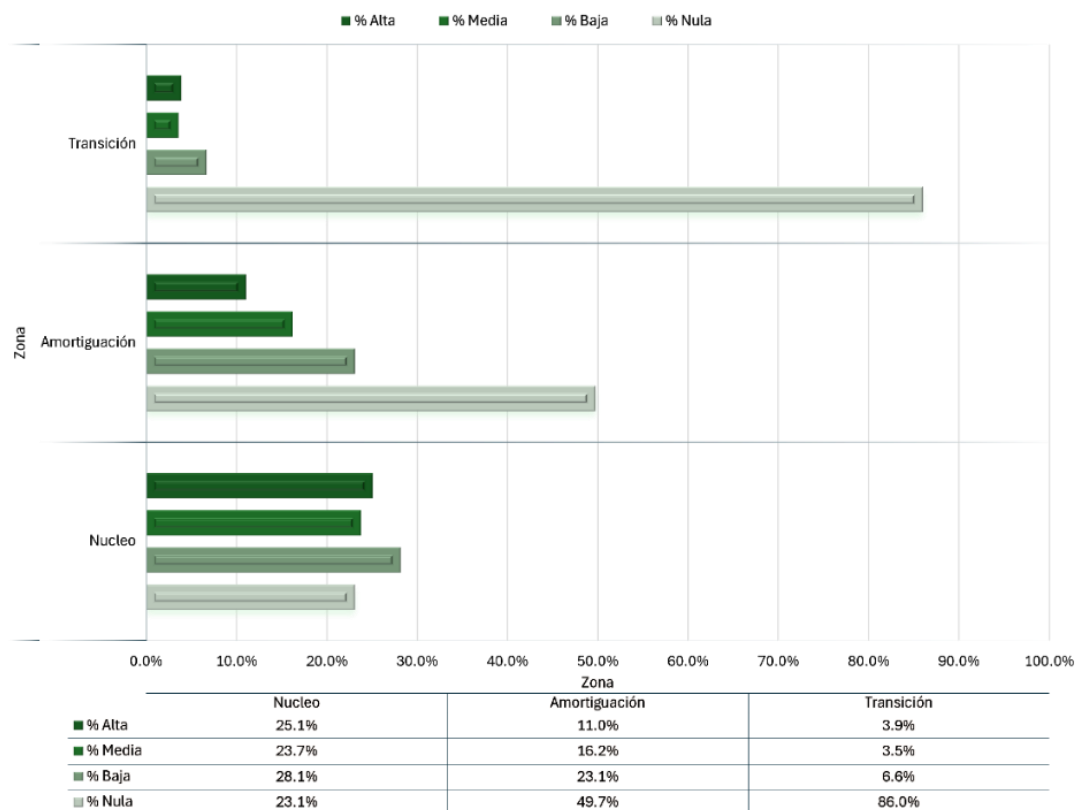


Tabla 3.

Distribución porcentual de la idoneidad dentro de cada zona de la RB (% Zonal)

Zona		Total (Ha)	% Total	% Alta	% Media	% Baja	% Nula
Núcleo	SN Huemules de Niblinto	6983.45	1.2%	59.2%	16.0%	19.5%	5.3%
	RN Huemules de Niblinto	2042.86	0.4%	83.4%	2.8%	11.1%	2.7%
	RN Ñuble	81872.42	14.3%	24.0%	26.7%	28.8%	20.5%
	PN laguna del Laja	11996.47	2.1%	2.6%	11.2%	31.9%	54.2%
Zona	Núcleo	102895.20	18.0%	25.1%	23.7%	28.1%	23.1%
	Amortiguación	395304.68	69.1%	11.0%	16.2%	23.1%	49.7%
	Transición	73701.47	12.9%	3.9%	3.5%	6.6%	86.0%
Total		571901.35	100.0%	12.6%	15.9%	21.9%	49.6%

Nota: Los porcentajes por categoría se calcularon respecto al área total de cada zona. Los porcentajes globales se refieren al área total de la reserva. Diferencias menores en sumas se deben a redondeo.

Tabla 4.*Distribución porcentual de la idoneidad en la RB (% idoneidad)*

	Zona	% Total	% Alta	% Media	% Baja	% Nula
Núcleo	SN Huemules de Niblinto	1.2%	5.7%	1.2%	1.1%	0.1%
	RN Huemules de Niblinto	0.4%	2.4%	0.1%	0.2%	0.0%
	RN Ñuble	14.3%	27.1%	24.0%	18.8%	5.9%
	PN laguna del Laja	2.1%	0.4%	1.5%	3.1%	2.3%
Zona	Núcleo	18.0%	35.7%	26.8%	23.2%	8.4%
	Amortiguación	69.1%	60.4%	70.3%	72.9%	69.3%
	Transición	12.9%	3.9%	2.9%	3.9%	22.3%
	Total	100.0%	12.6%	15.9%	21.9%	49.6%

Nota: Los porcentajes por categoría se calcularon respecto al área total de cada categoría de idoneidad. Diferencias menores en sumas se deben a redondeo.

El mapa de hábitat potencial (figura 5) identifica las áreas con probabilidad de presencia en una escala del 0% a 100%, donde las tonalidades verdes se vuelven más oscuras en función de la idoneidad. Adicionalmente, se presentan los resultados del cálculo de superficies para cada categoría y su proporción con respecto al total de cada zona (tabla 3) y con respecto al total de cada categoría (tabla 4) a modo de resumen.

El modelo de distribución espacial revela un patrón clave para la conservación del huemul: las áreas de idoneidad alta (76-100% probabilidad de presencia) forman una unidad geográfica continua que abarca tanto las zonas núcleo como la zona de amortiguación adyacente.

La zona de amortiguación alberga el 60.4% del hábitat más idóneo para el huemul, aunque este solo representa al 11.6% de su superficie total (43660 Ha de las 395304 Ha que representan el 70.6 % de la reserva) (tabla 4). Si bien esto indica una distribución en forma de parches dispersos y de baja densidad, el análisis espacial revela que la mayoría de estas áreas son contiguas a las zonas núcleo. Esta contigüidad las convierte en espacios prioritarios que, pese a su relevancia, carecen de protección oficial.

Esta configuración espacial contrasta con las zonas núcleo, donde el 35.7% del hábita más idóneo abarca el 18.01% de dicho espacio. Esto demuestra que las mejores condiciones de hábitat para el huemul se concentran en las zonas núcleo y sus alrededores inmediatos, particularmente en la Reserva Nacional Ñuble y el Santuario de la Naturaleza Huemules de Niblinto. Estas zonas coinciden con bosques mixtos de *Nothofagus* (lenga y ñirre) y estepa

altoandinas, ecosistemas descritos por Vila et al. (2010) y Figueroa et al. (2007), cómo hábitats preferentes para el huemul por su disponibilidad de alimento y refugio tanto estival como invernal.

Complementando este panorama, el modelo identificó que el 23.8% del hábitat potencial total en la Reserva de Biosfera corresponde a áreas de idoneidad media (Tabla 4), ubicadas principalmente en la zona de amortiguación (68% de estas áreas). Estos sectores, aunque presentan condiciones climáticas y topográficas favorables (ej. precipitación anual $\geq 1,200$ mm y elevaciones entre 1,200-1,600 msnm), carecen de protección formal, lo que las expone a presiones antrópicas.

Por último, en cuanto a las áreas de baja idoneidad (25-50 % de probabilidad de presencia), estas coinciden con áreas intervenidas por actividades antrópicas como asentamientos, proyectos de infraestructura, entre otros, que reflejan la presión histórica descrita por Povilitis (1998). Este patrón es particularmente marcado en la zona de transición, donde la fragmentación del hábitat ha sido un factor determinante en el aislamiento de la población septentrional de huemules.

En síntesis, la distribución espacial del hábitat idóneo para el huemul en esta Reserva de Biosfera evidencia:

- a. Las áreas de idoneidad alta se concentran en las zonas núcleo y de amortiguación adyacente, que concuerda con las condiciones de hábitat reportadas en la literatura científica.
- b. Pese a su valor estratégico, existen áreas de idoneidad alta que carecen de protección oficial, evidenciando la necesidad de ampliar los límites de las áreas núcleo para garantizar su conservación efectiva.
- c. Las áreas de idoneidad media (23.8 % del total) carecen de protección formal, ubicándose mayormente en la zona de amortiguación y transición siendo vulnerables a presiones antrópicas.

7.1.3 Variables ambientales determinantes

El modelo utilizó 13 variables ambientales, de las cuales identificó tres predictores críticos que explican 79.7% de la distribución potencial (Tabla 5), revelando mecanismos ecológicos clave:

Tabla 5:*Contribución de variables ambientales al modelo Maxent*

Variable	Porcentaje de contribución	Importancia de permutación
Diversidad Topográfica	34.6%	6.0%
Precipitación anual	25.9%	33.9%
Estacionalidad de la Precipitación	19.2%	45.3%
Elevación	11.9%	0.6%
Fracción de Cobertura Vegetal	3.6%	0.9%
Estacionalidad de la Temperatura	2.5%	1.2%
Isoterma	1.2%	0.4%
Pendiente	0.5%	0.3%
Temperatura media anual	0.2%	9.5%
Índice de Vegetación Mejorado	0.2%	0.2%
Índice de Modificación Humana Global	0.1%	1.3%
Índice de Diferencia Normalizada del Agua	0.1%	0.4%
Carbono Orgánico del Suelo	0.0%	0.1%

La tabla muestra dos métodos para medir la importancia de las variables ambientales en MaxEnt (en porcentajes):

- Por contribución: Evalúa cuánto mejora el modelo cuando se usan los valores reales de cada variable durante el entrenamiento. Se calcula sumando o restando los cambios que provoca la variable en cada paso del algoritmo.
- Por permutación: Evalúa cuánto empeora el modelo al desordenar aleatoriamente los valores de cada variable (como "barajar" sus datos). La caída en precisión (AUC) indica su importancia: a mayor caída, más crítica es la variable.

Las curvas de respuesta (apéndice 2) revelan que el huemul tiene preferencia por lugares en elevaciones de 1,400-1,800 msnm (rango estival/invernal) y con cobertura vegetal del 40-60% (bosques semiabiertos de *Nothofagus*). Esto coincide con observaciones de campo: el huemul evita bosques densos que limitan su movilidad y áreas abiertas que reducen refugio (Figuerola et al., 2007). La variable diversidad topográfica (34.6% de contribución) confirma su dependencia de quebradas y laderas escarpadas, claves para evadir depredadores (Vila et al., 2010), mientras que la Precipitación anual (25.9% con >1,200 mm/año) y la Estacionalidad de la precipitación

(19.2%) con valores medios que favorecen disponibilidad hídrica estable sustenta su asociación con mallines y cursos de agua permanentes.

La preferencia por terrenos escarpados (Diversidad topográfica) concuerda con su estrategia de defensa (Povilitis, 1998). La dependencia de Precipitación anual y Estacionalidad de la precipitación refleja su especialización en microclimas húmedos no extremos como mallines. Estos resultados refuerzan la idea de vulnerabilidad de la especie ante cambios en su hábitat, principalmente asociados al cambio climático. (Plan RECOGE, 2021).

7.2 Amenazas

Para analizar la configuración espacial de las presiones antrópicas y naturales sobre el hábitat potencial de *Hippocamelus bisulcus* se realizó una superposición espacial, donde se cruzaron los polígonos de idoneidad de hábitat resultante del modelo predictivo Maxent para los distintos niveles de idoneidad con las capas correspondientes a amenazas identificadas y a áreas de importancia para la conservación tanto públicas como privadas. Este análisis permitió cuantificar con precisión qué proporción del hábitat de mayor calidad para el Huemul se encuentra bajo protección formal y cuánta superficie está directamente sujeta a presiones antrópicas o disturbios naturales, estableciendo el estado actual del hábitat en la Reserva de biosfera.

Dentro de las amenazas identificadas cartografiables se encuentran presiones antrópicas como edificaciones, turismo, infraestructura lineal como red vial, ductos de gas y petróleo, descritas en la tabla 6. También se identificaron amenazas históricas relacionadas con actividades de desarrollo humano como la ganadería y otras como la introducción de especies exóticas tanto domesticas como silvestres resumidas en la tabla 7. Finalmente se identificaron amenazas relacionadas con riesgos naturales con la existencia del complejo volcánico Nevados de Chillán en el área de estudio y otras detalladas en la tabla 8.

Tabla 6:

Descripción e implicancias ecológicas de las principales amenazas antrópicas cartografiadas en el área de estudio.

Amenazas	Descripción	Implicancia
Cartografiadas		
Proyectos de infraestructura y urbanización	Presencia y aumento de construcciones derivadas de la expansión inmobiliaria y la subdivisión predial por el aumento en la demanda de parcelas de agrado en zonas precordilleranas. Contemplando además de la edificación de viviendas, la instalación de infraestructura asociada a servicios básicos como captación de agua, redes de suministro eléctrico, cercos perimetrales, caminos de servidumbre.	El cambio de uso de suelo derivado del asentamiento humano genera pérdida de cobertura vegetal y degrada la calidad de los servicios ecosistémicos. A nivel espacial, esto se traduce en la inserción de infraestructura en espacios naturales incrementando la fragmentación del paisaje y el efecto borde. Además, eleva el riesgo de interacción del huemul con fauna exótica principalmente domestica (ganado y mascotas), introduciendo vectores de enfermedades patológicas y aumenta la amenaza de depredación o asedio por el aumento de perros asilvestrados.
Infraestructura Lineal	Comprende la red de transporte terrestre incluyendo rutas vehiculares de diversa índole (autopistas, carreteras, pasajes) y materialidad (pavimentadas, revestidas y de tierra). Además de infraestructura lineal como ductos de transporte de gas y petróleo. Considerando para estos un área de influencia adyacente producto de la necesidad de seguridad vial para peatones y automovilistas.	Representan elementos longitudinales que alterar la continuidad física del paisaje fragmentando el hábitat. Esto además genera una 'efecto barrera' que restringe el libre desplazamiento del huemul y aísla sus subpoblaciones, limitando el uso efectivo del corredor biológico. Adicionalmente, aumenta el riesgo de mortalidad por atropellos, y facilita el acceso para otras amenazas como presencia humana, generación de ruido y animales domésticos y asilvestrados.
Turismo	Desarrollo de actividades recreativas al aire libre estivales y densificación de infraestructura para el desarrollo de estas asociado a la designación de zonas de interés turístico (ZOIT) Pinto y San Fabián de Alico.	Genera un escenario de perturbación constante que alteran los patrones naturales de forrajeo y descanso del huemul. Esta exposición constante a la presencia humano y sus impactos como el ruido continuo, la generación de residuos e introducción de patógenos por la presencia de mascotas, fuerza el desplazamiento de la especie, excluyéndolos de sus áreas de refugio natural.

Tabla 7:

Descripción e implicancias ecológicas de las principales amenazas antrópicas históricas en el área de estudio.

Amenazas históricas	Descripción	Implicancia
Prácticas ganaderas	Uso histórico para el pastoreo estival de ganado vacuno y caprino, a través de las llamadas rutas de veranadas atravesando zonas cordilleranas en búsqueda de zonas con abundancia de alimento para el ganado, lo que generó un solapamiento directo con los refugios del huemul.	Producto del solapamiento con espacios usados por el huemul se produce una competencia por los recursos forrajeros que llevan a un desplazamiento de la especie hacia hábitats marginales de menor calidad. Asimismo, el ganado actúa como principal vector de transmisión de enfermedades.
Caza ilegal	Factor de presión antrópica directa hasta la década de 1980 en las regiones de Ñuble y Biobío para la obtención de carnes o como trofeo. Además, se registraron eventos de caza furtiva en 1992 y 2002 cercanos a la Reserva Nacional Ñuble.	Actualmente la caza, captura, tenencia, transporte y comercialización del huemul están prohibidas amparadas en la Ley de caza N° 19.473, sin embargo, representa un factor de riesgo debido al estatus crítico de conservación de la subpoblación.
Presencia de perros	Amenaza vinculada a asentamientos humanos y prácticas ganaderas, relacionada a la tenencia poco responsable de mascotas, que implica mascotas de libre deambular y la proliferación de perros asilvestrados.	El huemul carece de respuestas adaptativas contra nuevos depredadores, por lo que el riesgo de ataques aumenta debido a la libre circulación de mascotas asociadas a parcelaciones de agrado y rutas de veranadas.
Presencia de ungulados exóticos	La introducción de especies con fines económicos como lo es el caso del ciervo rojo (<i>Cervus elaphus</i>) y su posterior dispersión por falta de control en los criaderos.	Representa un riesgo considerable debido al comportamiento territorial de los machos de ciervo rojo, pudiendo competir y desplazar al huemul de su refugio, sumado al riesgo latente de transmisión de enfermedades entre ungulados.

Tabla 8:

Descripción e implicancias ecológicas de las principales amenazas por riesgos natural en el área de estudio.

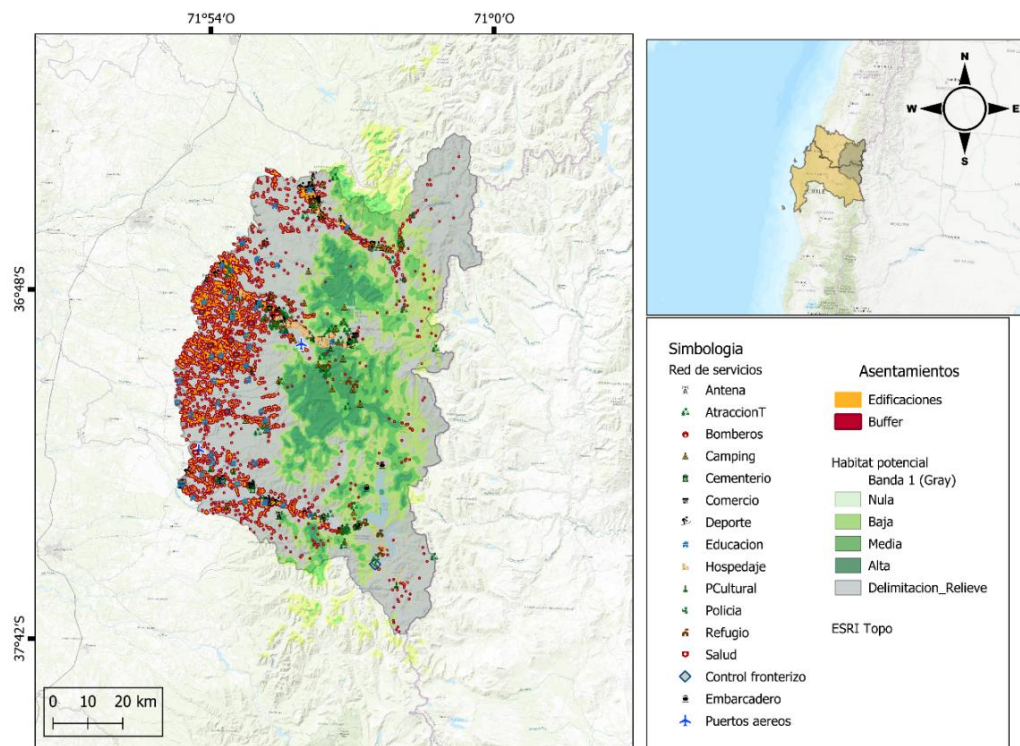
Riesgos Naturales	Descripción	Implicancia
Incendios	Propagación de fuego en bosques cordilleranos, intensificados en períodos estivales con condiciones favorables de temperatura y disminución de humedad, además de la presencia de especies exóticas de alta inflamabilidad.	El difícil acceso a estas zonas de montaña permite una propagación descontrolada del fuego, grandes extensiones de cobertura vegetal se pueden ver afectadas. Con esto la pérdida de especies nativas importantes para la alimentación y refugio del huemul.
Peligro volcánico	Amenaza latente asociada a la actividad histórica del Complejo volcánico Nevados de Chillán. Contemplando perturbaciones derivadas de erupciones, emisión de gases y alteración de la topografía del paisaje cordillerano	Puede llegar a constituir un evento catastrófico que altere drásticamente la disponibilidad de hábitat. Las precipitaciones de cenizas contaminan la fuente de alimento y agua del Huemul., provocando cambios forzados en la dieta, intoxicación, estrés fisiológico y desplazamientos abruptos.
Cambio Climático	La tendencia histórica al aumento de temperaturas se ha visto acelerada por actividades antrópicas. En consecuencia, existe un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como sequías e inviernos anómalos que alteran las dinámicas ecológicas de ecosistemas cordilleranos como mallines, principal refugio del huemul.	Esto impacta directamente la disponibilidad y estructura del hábitat del huemul, el cual es vulnerable ante estos cambios debido a la especificidad de requerimientos ecológicos. Por otro lado, la capacidad de adaptación y resiliencia se ve limitada por la fragmentación del corredor biológico y la pérdida de variabilidad genética de estos grupos espacialmente aislados.

7.2.1 Cartografía

El análisis cartográfico de las amenazas territoriales representadas en las figuras 3, 4 y 5 evidencia una alarmante exposición del hábitat de alta idoneidad frente a la expansión del desarrollo antrópico impulsado principalmente por la diversificación de infraestructura y la intensificación del turismo. El sector que denota mayor intervención corresponde a Termas de Chillán reflejado en la figura 9, en esta área la proliferación de actividades recreativas de montaña tanto invernales como estivales, ha invadido los núcleos de refugio del huemul, provocando un severo efecto de exclusión espacial. El caso más representativo de este desplazamiento es la Laguna del huemul, que históricamente albergó a la especie y que en la actualidad no presenta registros de avistamiento. Este hábitat no sólo fue abandonado por la especie debido a la perturbación constante, sino que debió ser clausurado por las autoridades a raíz de la proliferación de microbasurales derivados de la alta afluencia de visitantes.

Figura 7:

Mapa de presión antrópica por proyectos de infraestructura y urbanización

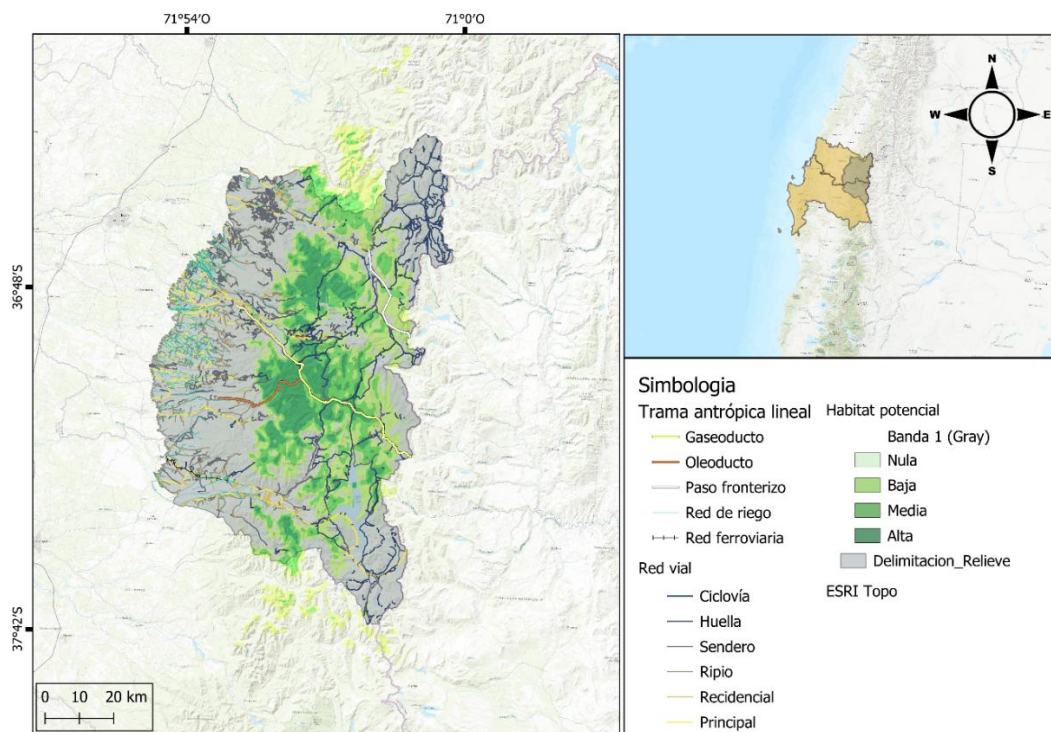


En cuanto a la representación cartográfica de proyectos de infraestructura y urbanización (figura 7), evidencia una preocupante dispersión de los asentamientos humanos, registrándose incluso en sectores remotos de difícil acceso geográfico. Si bien en la actualidad son asentamientos

puntuales por lo que no constituyen un riesgo crítico para la conectividad de la especie, son un factor de vulnerabilidad latente ante eventuales procesos de expansión inmobiliaria, considerando la creciente oferta de proyectos de loteo para parcelas de agrado. Esta coincidencia espacial ente hábitat óptimos y desarrollo de infraestructura, permite comprender la reducción poblacional histórica en el corredor reportada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2009), validando que la intrusión humana es un importante factor de la pérdida de refugios críticos para este cérvido.

Figura 8:

Mapa de presión antrópica por presencia de infraestructura lineal



Al observar la figura 8 donde se superponen el hábitat de alta idoneidad y los proyectos de infraestructura lineal, queda en evidencia como las vías de conexión para humanos fragmentan el paisaje alterando la continuidad de este. Un caso muy característico dentro del área de estudio es el trazado del oleoducto y gasoducto, proyectos emplazados en la Reserva Nacional Ñuble que atraviesa prácticamente por la mitad uno de los núcleos más importantes de hábitat de huemul. Si bien gracias al plan de compensación del proyecto se logró ampliar la superficie oficial de la reserva, los impactos durante su construcción fueron severos. El ruido de las tronaduras y el movimiento de maquinaria pesada generaron un nivel de estrés tan alto en el entorno que

terminó ahuyentando a los huemules, forzándolos a abandonar sectores donde históricamente siempre tuvieron presencia.

Por otra parte, se detectó una extensa matriz de antiguas huellas y rutas de cordillera posiblemente ligadas a la cultura de las veranadas y al paso tradicional de arrieros, con un gran valor patrimonial al conectar localidades como San Fabián, Minas del Prado, Las Trancas y Antuco. Esto constituye una amenaza ligada a las necesidades de conservación del cérvido, ya que actúan como vectores de permeabilidad antrópica, facilitando el ingreso sostenido de humanos, ganado y perros hacia los núcleos más prístinos de la reserva.

Figura 9:

Mapa de presión antrópica por actividades turísticas

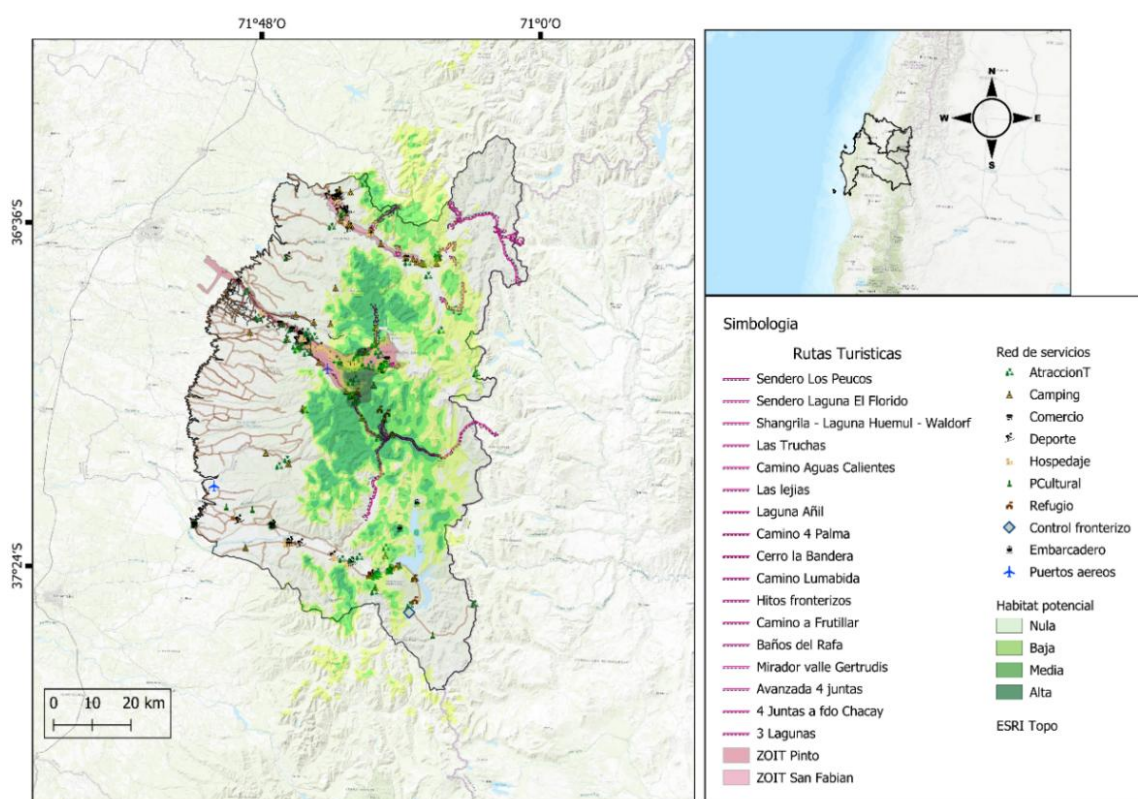


Tabla 9:

Representatividad espacial de la Zona de Interés Turístico (ZOIT) Pinto según nivel de idoneidad del hábitat del huemul

Área de estudio	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% área
ZOIT Pinto	6020.85	22.32%	3767.80	13.97%	4765.45	17.67%	12422.07	46.05%	26976.18	100%
ZOIT San Fabián	63.05	1.18%	104.86	1.97%	67.46	1.26%	5098.73	95.59%	5334.09	100%
Total	6083.90	8.50%	3872.66	4.13%	4832.91	3.84%	17520.80	3.76%	32310.27	4.27%

Al cuantificar espacialmente estas alteraciones (tabla 8), se puede observar la magnitud de la presión antrópica sobre núcleos de mayor idoneidad. Al superponer las áreas con designación de interés turístico con el hábitat potencial del huemul, se determinó que la ZOIT Pinto intercede con 6020.85 hectáreas de hábitat de alta idoneidad, es decir un 22,32% de toda la superficie de esta ZOIT corresponde a áreas identificadas por el modelo con alta probabilidad de presencia. En contraste, la ZOIT San Fabián interfiere solo 63.05 hectáreas que equivale a solo un 1.18 % de el polígono total. Esto confirma que el área más amenazada correspondió a Pinto y zonas de Chile donde se concentra tanto la actividad turística como el hábitat potencial del huemul.

Tabla 10:

Cuantificación de afectación por amenazas en el hábitat potencial de Hippocamelus bisulcus.

Amenaza	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% de área
Infraestructura	3213.69	27.17%	3642.45	30.80%	1491.23	12.61%	3479.02	29.42%	11826.38	100%
Incendios	551.48	0.30%	2427.38	1.33%	6527.73	3.58%	172911.08	94.79%	182417.66	100%
Peligro Volcánico	4149.26	7.54%	8555.91	15.56%	13674.65	24.86%	28617.99	52.03%	54997.81	100%
Totales	7914.43	11.05%	14625.73	15.61%	21693.61	17.23%	205008.09	43.97%	249241.85	32.90%

Por otro lado, al evaluar la infraestructura presente en el área de estudio compuesta por asentamientos humanos, red vial y proyectos de diversa índole, vemos que existen 3212.69 hectáreas de hábitat altamente idóneo comprometidas sumadas a las 3642.45 hectáreas con idoneidad media, abarcando un 57.97% de área impactada por la presencia de infraestructuras sin

considerar el impacto ecologico asociado a practicas cotidianas de la vida humana como la generaci3n de residuos, la perturbaci3n por ruidos dd el entorno natural, la presencia de canes de libre deambular que se pueden transformar en perros asilvestrados. Como se analizo anteriormente estas hectareas afectadas pueden actuar como verdaderas cicatrices en el paisajes, creando barreras que disminuyen la conectividad de los parches idoneos de habitar por el huemul, aislando aun m1s las subpoblaciones.

Figura 10:

Mapa de uso de suelo en el h1bitat potencial de *Hippocamelus bisulcus*

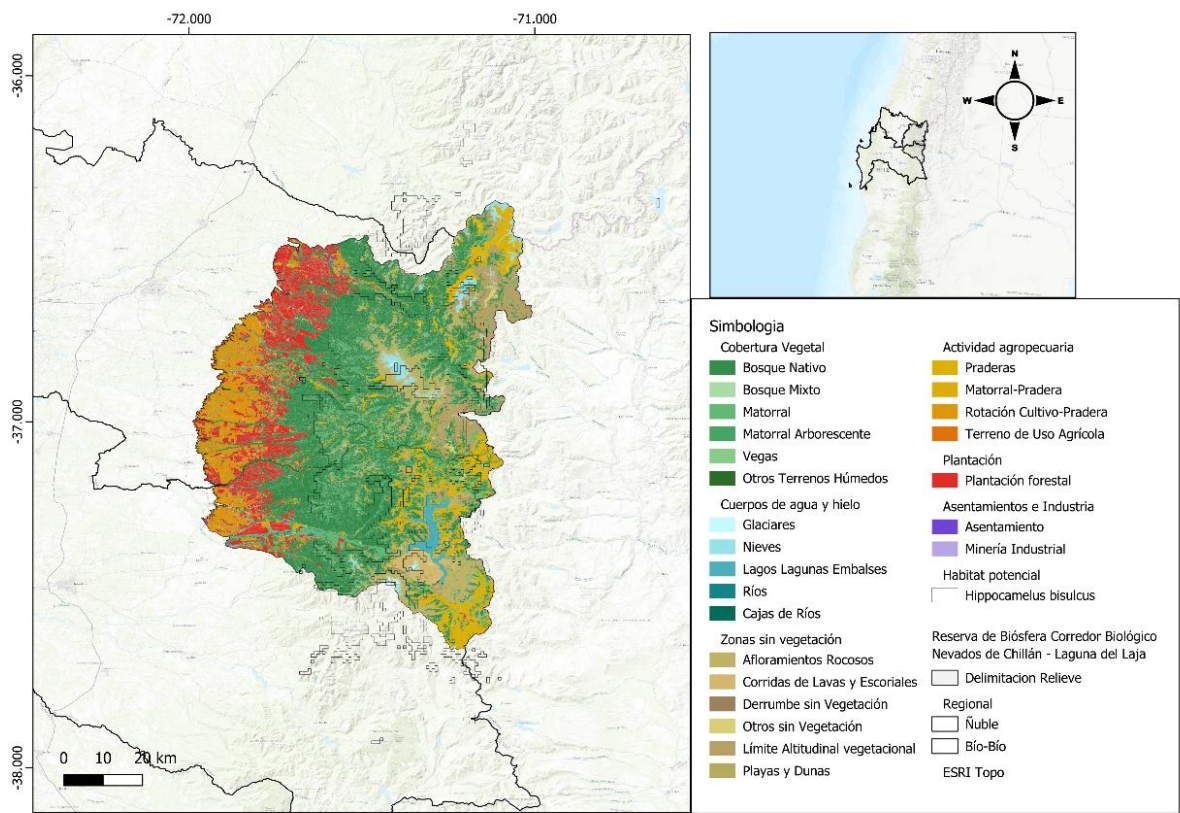


Tabla 11:

Distribuci3n de las categor1as de uso de suelo actual seg1n los niveles de idoneidad del h1bitat potencial de *Hippocamelus bisulcus*.

Categor1a de Uso de Suelo	Idoneidad Alta (Ha)	% de 1rea	Idoneidad Media (Ha)	% de 1rea	Idoneidad Baja (Ha)	% de 1rea	Idoneidad Nula (Ha)	% de 1rea
Cobertura Vegetal	52012.88	72.64%	64132.30	68.43%	74190.61	58.97%	187916.24	40.33%
Zonas sin Vegetaci3n	12064.37	16.85%	17067.94	18.21%	28981.53	23.03%	59491.22	12.77%

Cuerpos de agua y hielo	1239.94	1.73%	2121.78	2.26%	4679.06	3.72%	18216.38	3.91%
Actividad Agropecuaria	6279.09	8.77%	10397.14	11.09%	17902.62	14.23%	109976.58	23.60%
Plantaciones Forestales	5.21	0.01%	0.00	0.00%	43.92	0.03%	89282.03	19.16%
Industria	4.10	0.01%	0.00	0.00%	22.02	0.02%	1102.77	0.24%
Total	71605.60	100%	93719.16	100%	125819.75	100%	465985.23	100 %

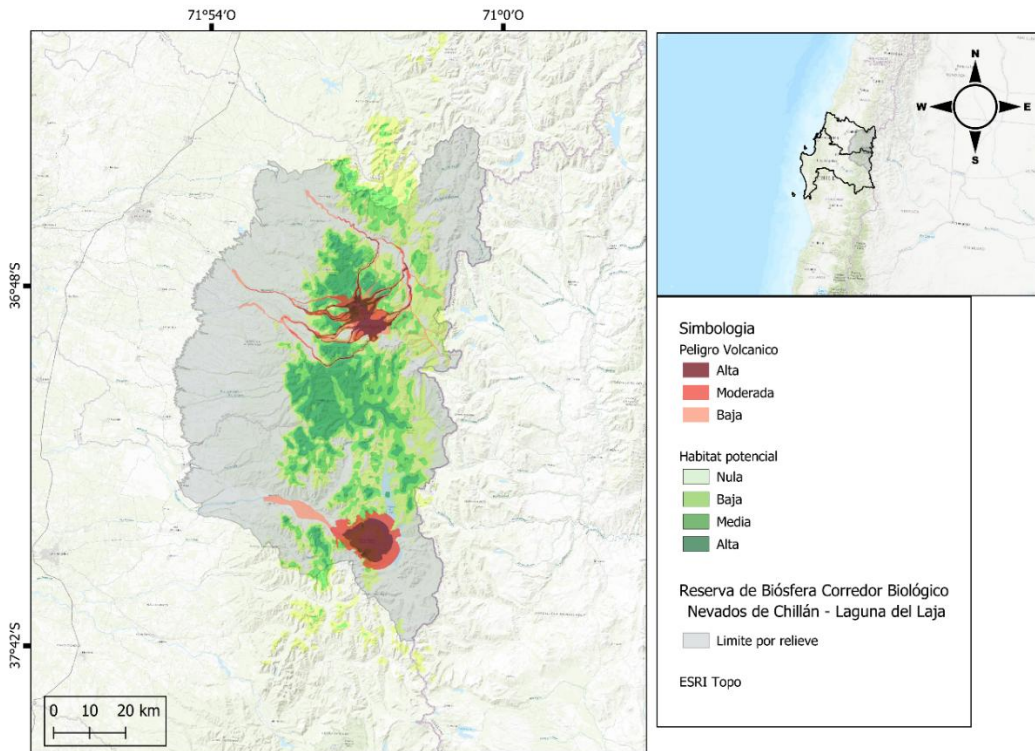
Al evaluar la distribución de los usos de suelo dentro del hábitat potencial, fue necesario agrupar las categorías que trae el catastro oficial. Guiándose por qué tan útiles o perjudiciales resultan ecológicamente para el huemul (Tabla 12). Cruzar esta información con los mapas del modelo nos permitió comprobar si los refugios que se veían bien en la teoría realmente están disponibles en el territorio.

Los resultados obtenidos respaldan fuertemente la predicción hecha en Maxent: la gran mayoría del hábitat de Alta Idoneidad (un 72,64%, equivalente a 52.012,88 hectáreas) coincide exactamente con zonas de cobertura natural, sobre todo bosque nativo y matorrales. Esto es un gran indicador, ya que demuestra que el software no solo dio con las condiciones topográficas ideales, sino que estas áreas efectivamente mantienen la vegetación que el cérvido necesita para alimentarse y cobijarse. A este porcentaje se le suma un 18,58% (13.304,31 ha) correspondiente a cuerpos hídricos, roca y alta montaña; espacios escarpados que históricamente han servido a la especie como barreras físicas para mantenerse asilada de las perturbaciones.

Sin embargo, la cartografía también deja en evidencia zonas de claro conflicto territorial. Se encontró que 6279.093 hectáreas (el 8.77% del mejor hábitat) caen justo sobre sectores de uso agropecuario, principalmente praderas. Este dato refleja de manera espacial el problema histórico de las veranadas y el pastoreo, donde el huemul se ve forzado a competir directamente por el forraje. Por otro lado, resulta interesante notar que los asentamientos humanos y las plantaciones forestales casi no pisan el hábitat de alta idoneidad de forma física (ambos ocupan menos del 0,01%). Aunque a nivel cartográfico parezcan intervenciones minúsculas, en la práctica funcionan como el punto de origen de presiones mucho más invasivas, como el tránsito de personas, vehículos o perros de libre deambular, que terminan rompiendo la conectividad del paisaje.

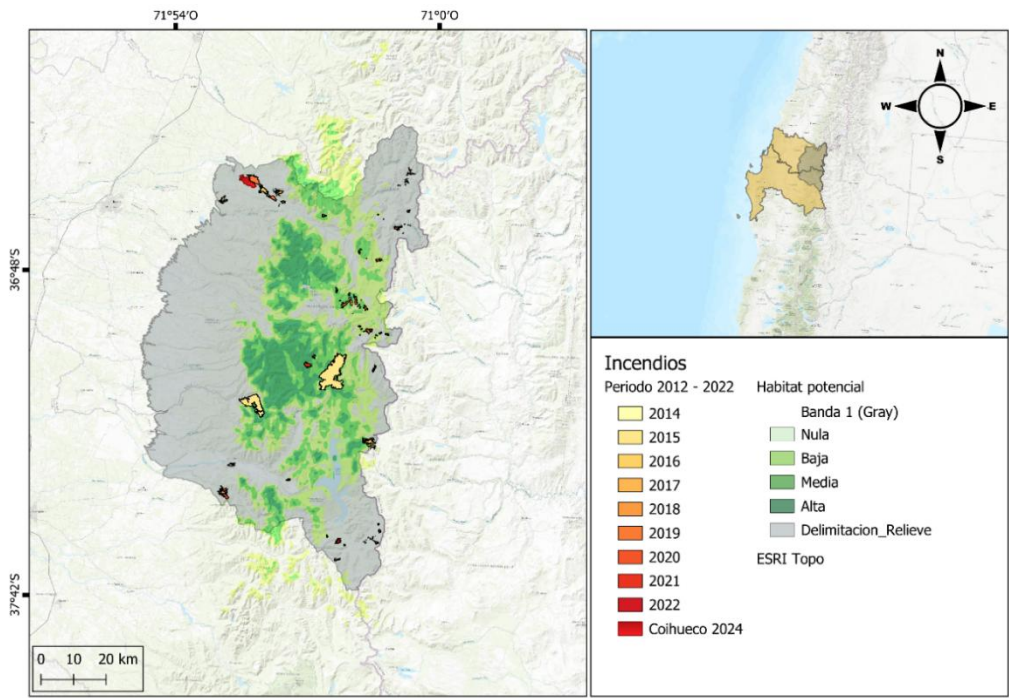
Figura 11:

*Mapa de peligro volcánico para el hábitat potencial de *Hippocamelus bisulcus**



La cartografía resultante para peligro volcánico (figura 11) muestra una coincidencia espacial muy alta con los mejores refugios de la especie, superponiéndose directamente con 4.149,23 hectáreas de hábitat de alta idoneidad. Esto tiene sentido si lo pensamos geográficamente: tanto el complejo volcánico como los hábitats óptimos del huemul comparten las mismas zonas altas de la cordillera de Ñuble. Aunque sabemos que esta es una perturbación natural con la que el cérvido ha lidiado a lo largo de su evolución, hoy en día representa un riesgo latente enorme. Una erupción importante del Volcán Chillán o una caída fuerte de cenizas no solo contaminaría el forraje provocando problemas estomacales y desgaste dental, sino que obligaría a las subpoblaciones a desplazarse de forma abrupta, lo que lamentablemente las expondría a chocar con las amenazas antrópicas de las zonas bajas.

Figura 12:
Mapa de ocurrencia de incendios para el hábitat potencial de Hippocamelus bisulcus



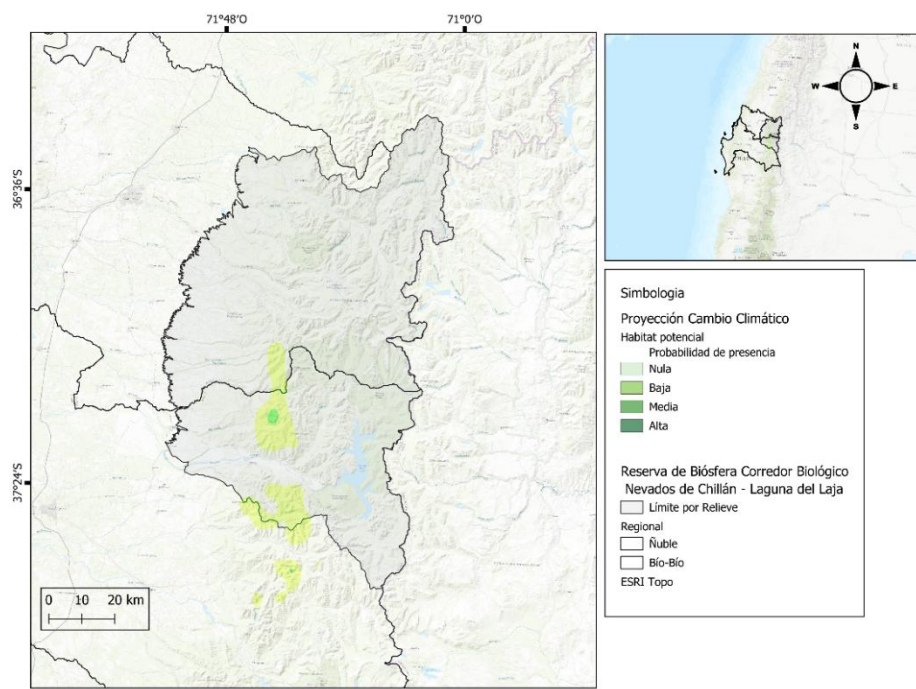
En cuanto a la figura 12 que representa la ocurrencia de incendios dentro de la Reserva de Biosfera en un periodo de 10 años, nos indica un bajo nivel de afectación por incendios en zonas de idoneidad media y alta, alcanzando solo 551.44 hectáreas, esto debido a que los grandes incendios registrados se han concentrados en altitudes bajas asociados a matorrales degradados o áreas que el modelo clasifica con idoneidad baja y nula. El núcleo grueso del hábitat del huemul se ha mantenido relativamente a salvo del fuego gracias al aislamiento topográfico. Sin embargo, esto no significa que podamos bajar la guardia; al contrario, si cruzamos este dato con los resultados del modelo de cambio climático a 50 años, el aumento de las sequías y las temperaturas estivales podrían romper esta protección natural, haciendo que el fuego escale hacia estos últimos santuarios prístinos, lo que sería letal para una población que ya se encuentra aislada y sin espacio para retroceder.

Tabla 12:
Superficie total de hábitat potencial para Hippocamelus bisulcus amenazada

Área de estudio	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% de área
-----------------	---------------------	-----------	----------------------	-----------	---------------------	-----------	---------------------	-----------	------------	-----------

Hábitat	71605.60	9.43%	93719.13	12.34%	125881.06	16.58%	466297.52	61.41%	757503.31	99.76%
Potencial										
Total										
Suma	13998.33	19.55%	18498.39	19.74%	26526.52	21.07%	222528.89	47.72%	281552.12	37.17%
Amenazas										

Figura 13:
 Mapa de proyección del hábitat potencial de *Hippocamelus bisulcus* ante condiciones de cambio climático.



La proyección de hábitat potencial ante variables ambientales futuras con una proyección bajo un escenario de cambio climático arrojó una disminución significativa de áreas de idoneidad baja y media, pero lo más preocupante es la nula existencia de áreas que cumplan con las características ambientales para un hábitat altamente idóneo. Esto significa que los refugios de huemul podrían desaparecer por completo al mediano plazo. Además, el modelo presenta un claro desplazamiento del hábitat hacia el límite sur del corredor, lo que sumado a la expansión demográfica pronosticable para la zona norte de la Reserva de biosfera obligando a la migración del huemul y aumentando la necesidad de asegurar vías y conectividad estructural de esta.

7.3 Implicancias para la conservación

7.3.1 Representatividad del hábitat potencial en áreas de importancia para la conservación

El análisis de representatividad del hábitat en las distintas áreas de conservación tanto privadas como públicas (Tabla 3) expone contrastes importantes en su capacidad como refugio para la especie.

Figura 14:

Mapa de esfuerzos de conservación para el hábitat de Hippocamelus bisulcus

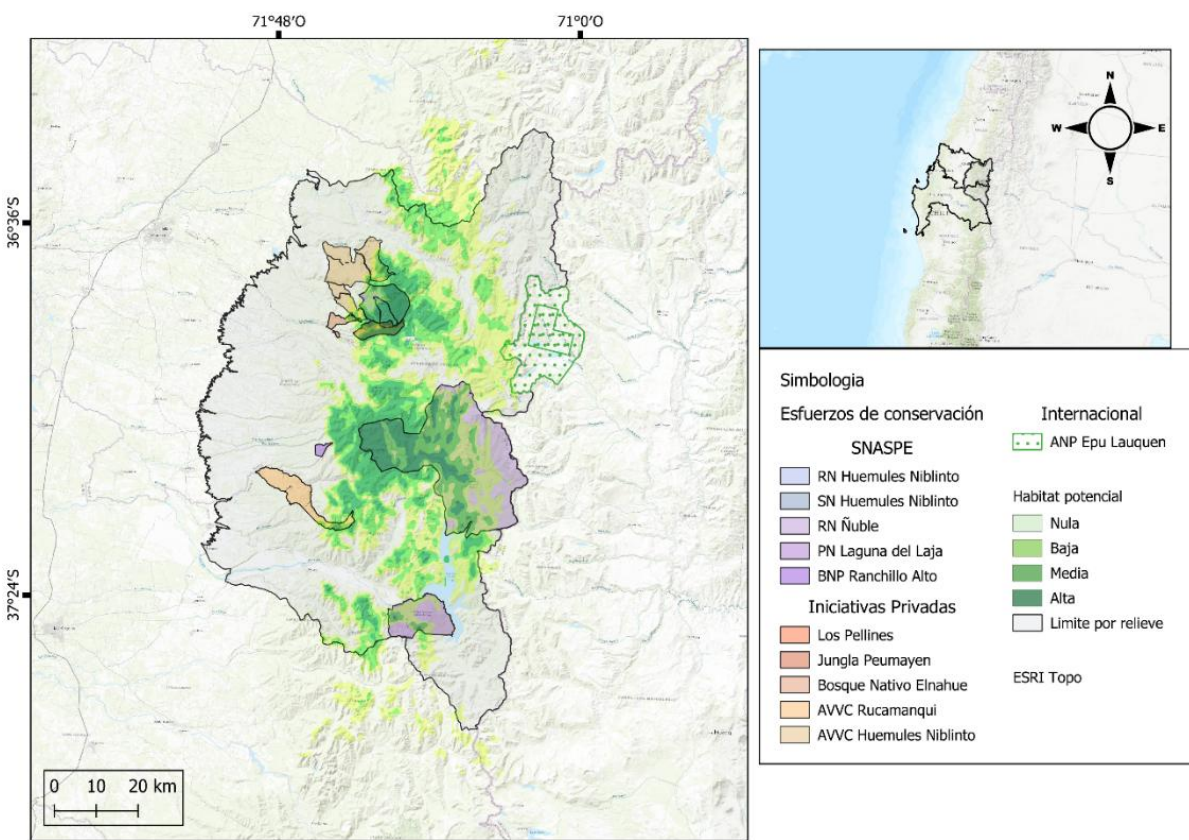


Tabla 13:

Representatividad espacial de las iniciativas de conservación privada según nivel de idoneidad del hábitat del huemul

Área de conservación privada	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% de área
---------------------------------	------------------------	--------------	-------------------------	--------------	------------------------	--------------	------------------------	--------------	------------	--------------

AVVC Huemules de Niblinto	790.93	5.28%	1231.02	8.22%	1549.29	10.34%	11409.05	76.16%	14980.29	100%
Bosque Nativo Elnahue	24.68	1.72%	236.07	16.47%	135.07	9.42%	1037.57	72.39%	1433.39	100%
Jungla Peumayen	2063.63	63.44%	767.56	23.60%	337.86	10.39%	84.01	2.58%	3253.07	100%
Los Pellines	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	126.73	100%	126.73	100%
AVVC Rucamanqui	269.34	3.26%	733.15	8.87%	465.61	5.63%	6795.42	82.23%	8263.51	100%
Totales	3148.59	4.40%	2967.80	3.17%	2487.83	1.98%	19452.76	4.17%	28056.98	3.70%
Diferencia	68457.01	95.60%	90751.32	96.83%	123393.23	98.02%	446844.76	95.83%	729446.33	96.30%

Proporcionalmente, la Reserva Nacional Huemules de Niblinto es la que presenta mayor concentración de hábitat potencial con un 85,3% (1757,5 ha) de idoneidad alta respecto a su superficie total. Le sigue el Santuario de la Naturaleza huemules de Niblinto donde el hábitat de alta idoneidad alcanza un 58% que corresponden a 4051,8 ha. Dado que estas áreas protegidas se encuentran contiguas existiría un parche continuo de 5809,3 ha bajo protección del estado de Chile. Contigua a estas áreas de protección se encuentra Jungla Peumayen, una iniciativa de conservación privada que destaca al poseer un 63,4% de su extensión clasificada con una idoneidad alta. La cercanía espacial de estas tres áreas, que además albergan una considerable proporción de idoneidad media, constituyen un núcleo estratégico y fundamental para asegurar la conectividad del hábitat y el funcionamiento efectivo del corredor biológico.

Tabla 14:

Representatividad espacial de las iniciativas de conservación estatal según nivel de idoneidad del hábitat del huemul

Área de conservación estatal	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% de área
SN Huemules de Niblinto	4136.50	59.23%	1115.15	15.97%	1359.95	19.47%	371.86	5.32%	6983.45	100%
RN Huemules de Niblinto	1704.31	83.43%	56.71	2.78%	226.86	11.11%	54.98	2.69%	2042.86	100%

Reserva Nacional Ñuble	19617.73	23.96%	21896.29	26.74%	23547.42	28.76%	16810.99	20.53%	81872.42	100%
PN Laguna del Laja	317.86	2.65%	1345.08	11.21%	3829.14	31.92%	6504.39	54.22%	11996.47	100%
BNP	0.00	0.00%	0.00	0.00%	6.79	0.99%	677.33	99.01%	684.12	100%
Ranchillo Alto										
Totales	25776.40	36.00%	24413.23	26.05%	28970.15	23.01%	24419.54	5.24%	103579.32	13.67%
Diferencia	45829.21	64.00%	69305.90	73.95%	96910.90	76.99%	441877.98	94.76%	653923.99	86.33%

En cuanto a superficie absoluta, la Reserva Nacional Ñuble destaca como el área núcleo de mayor extensión espacial. Aunque en porcentaje esta área solo presenta un 23% de hábitat de idoneidad alta, corresponde a 17.041,8 hectáreas bajo protección. En contraste, el análisis reveló que el Parque Nacional Laguna del Laja posee una baja superficie de hábitat idóneo para el huemul con apenas un 1,7 % (203,1 Ha), esto probablemente se deba a que representa el límite sur de distribución descrita para esta subpoblación remanente, marcando una transición geográfica y ambiental hacia condiciones menos favorables.

Tabla 15:

*Superficie total de hábitat potencial para *Hippocamelus bisulcus* bajo iniciativas de conservación*

Área de estudio	Idoneidad Alta (Ha)	% de área	Idoneidad Media (Ha)	% de área	Idoneidad Baja (Ha)	% de área	Idoneidad Nula (Ha)	% de área	Total (Ha)	% de área
Hábitat Potencial	71605.60	9.43%	93719.13	12.34%	125881.06	16.58%	466297.52	61.41%	757503.31	99.76%
Suma Esfuerzos	28924.99	36.59%	27381.03	26.32%	31457.98	22.80%	43872.30	9.46%	131636.29	16.32%

Estos resultados respaldan la urgencia de ampliar la Reserva Nacional Ñuble hacia el nororiente, tal como sugieren Hinojosa et al. (2018). La inclusión de variables antropogénicas en futuros modelos podría refinar la identificación de amenazas.

7.4 Síntesis de resultados y jerarquización de amenazas

A modo de cierre, la integración del modelamiento de hábitat y el análisis espacial de presiones permite establecer una jerarquía clara de las vulnerabilidades que enfrenta el Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja.

Al evaluar la cuantificación espacial y el impacto ecológico de cada variable, se concluye que la amenaza más crítica y de mayor impacto en el corto plazo corresponde a la infraestructura, la red vial y la expansión turística. Esta matriz de desarrollo antrópico, focalizada fuertemente en el polígono de la ZOIT Pinto, no solo compromete de forma directa casi el 20% del refugio óptimo del huemul, sino que ejerce un efecto sinérgico: fragmenta los corredores naturales y actúa como el principal vector de permeabilidad para amenazas secundarias, facilitando el ingreso de humanos, ruido y perros de libre deambular hacia las zonas más prístinas.

Por otro lado, si bien el modelo predictivo proyecta que el Cambio Climático representa la amenaza de mayor severidad a largo plazo (al proyectar la reducción a cero de las áreas de alta idoneidad a 50 años), es la ocupación antrópica actual el factor que impide la resiliencia de la especie. La expansión inmobiliaria y la falta de resguardo formal en la zona de amortiguación están bloqueando estructuralmente las vías que el huemul necesitará para desplazarse hacia el sur a medida que las condiciones climáticas del norte se vuelvan inviables.

Esta radiografía territorial nos confirma empíricamente que las actuales áreas protegidas, confinadas a las zonas núcleo, ya no dan abasto frente al nivel de fragmentación que sufre el paisaje. Debido a esto, el diagnóstico espacial hace imperativa la necesidad de generar propuestas de conservación y manejo adaptativo que salgan de los límites tradicionales de la reserva, enfocándose en frenar la intrusión humana y asegurar la conectividad del bosque nativo antes de lamentar la extinción local de la especie.

7.5 Alcances y limitaciones del modelo predictivo

Resulta fundamental reconocer que, si bien el algoritmo Maxent es una herramienta predictiva altamente robusta para la ecología espacial, los resultados de este estudio presentan ciertas limitaciones inherentes a la modelación. Las variables bioclimáticas y topográficas utilizadas logran definir con alta precisión el nicho fundamental del huemul; sin embargo, el modelo no integra interacciones bióticas complejas y de microescala. Factores como la densidad de depredadores naturales (ej. Puma concolor), la transmisión directa de patógenos por parte del ganado introducido, o la fragmentación a resoluciones menores a 1 km², escapan a la sensibilidad de la cartografía empleada.

Asimismo, las proyecciones climáticas a 50 años asumen una tendencia lineal de calentamiento, por lo que deben interpretarse como una advertencia temprana (bajo el principio de precaución) y no como un destino inalterable. Reconocer estas brechas es clave para comprender que el

mapa de idoneidad señala dónde la especie puede vivir, pero es la gestión del territorio la que determina si logrará sobrevivir.

7.6 Propuestas de conservación

Con base en los resultados del modelamiento predictivo y el análisis de las amenazas, se hace evidente que la conservación del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en el Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja requiere transitar desde un enfoque de protección pasiva hacia un manejo adaptativo integral. A continuación, se detallan cuatro lineamientos estratégicos para asegurar la viabilidad de la especie a largo plazo:

7.6.1 Fortalecimiento del Sistema de Áreas Protegidas

Los resultados demuestran que gran parte del hábitat de alta idoneidad se encuentra fuera de los límites oficiales de resguardo. Por lo tanto, es prioritario gestionar la ampliación de las áreas bajo protección del Estado, tanto la Reserva Nacional Ñuble como el Santuario de la Naturaleza Huemules de Niblinto hacia los parches de idoneidad alta contiguos. Esta acción es el primer paso para consolidar la conectividad estructural del paisaje, asegurando que las subpoblaciones mantengan rutas de flujo genético y vías de escape naturales ante eventos de perturbación. Paralelamente, es urgente robustecer la administración de las áreas ya existentes mediante la actualización de sus planes de manejo y un aumento significativo en la dotación y recursos para la fiscalización. Solo a través de un control efectivo en terreno se podrá garantizar que las actividades dentro de estas zonas no vulneren los objetos de conservación.

7.6.2 Reconocimiento Institucional de la Reserva de Biosfera

Actualmente, la categoría de Reserva de Biosfera es un reconocimiento internacional otorgado por la UNESCO, pero carece de un peso normativo en la legislación chilena. Resulta imperativo que el Estado reconozca esta figura dentro de la institucionalidad ambiental. Esto permitiría que las zonificaciones y las medidas establecidas en los planes de gestión del Corredor Biológico adquieran un carácter vinculante, logrando un impacto real en el ordenamiento territorial y obligando a que cualquier proyecto productivo o inmobiliario se someta a estándares de evaluación ambiental mucho más rigurosos.

7.6.3 Gestión de la Zona de Amortiguación y Corredores Buffer

Considerando que la zona de amortiguación alberga más del 60% del hábitat óptimo, es urgente priorizar la creación de corredores *buffer*. Se propone implementar restricciones reguladas de uso de suelo en una franja de 500 metros periféricos a las zonas núcleo. Para mitigar el impacto de las veranadas y la competencia por forraje, resulta clave trabajar junto a las comunidades locales fomentando prácticas de transición como la agroecología, congeniando el sustento rural con la preservación del nicho del huemul. Asimismo, es fundamental establecer normativas estrictas de mitigación en las áreas de influencia en torno a la infraestructura y la red vial, reduciendo la permeabilidad de amenazas como el ingreso de perros de libre deambular y ganado.

7.6.4 Regulación Turística y Transición hacia el Ecoturismo

Ante el crecimiento exponencial de las Zonas de Interés Turístico (ZOIT), resulta fundamental regular la industria y propiciar su evolución hacia un modelo de turismo sustentable y ecológico. Se propone la generación de estudios de capacidad de carga para todas las rutas y senderos cordilleranos, creando bases de datos que permitan establecer cuotas máximas de ingreso diario. El objetivo es disuadir el actual modelo de turismo extractivista, basado principalmente en la mera obtención de una fotografía para redes sociales y fomentar el desarrollo de experiencias significativas. Los visitantes deben reconocer, valorar y educarse sobre el entorno crítico del que están haciendo uso, priorizando el cuidado de la naturaleza por sobre la recreación masiva.

7.6.5 Monitoreo Estratégico y Tecnológico de Bordes

El control de las presiones antrópicas requiere información actualizada y continua. Se propone establecer una red de estaciones de monitoreo mediante cámaras trampa ubicadas específicamente en el ecotono (límite) entre las zonas núcleo y las zonas de amortiguación. Este sistema permitirá evaluar el uso efectivo del hábitat por parte de la especie y, más importante aún, funcionará como un mecanismo de alerta temprana para detectar intrusiones humanas, fauna exótica y variaciones en la cobertura vegetal, facilitando la toma de decisiones preventivas.

7.6.6 Educación Ambiental Integral y el legado de Mistral

Las normativas territoriales carecen de efectividad si no cuentan con el respaldo de las comunidades que habitan el entorno. La educación ambiental se perfila como la herramienta preventiva más poderosa para la conservación. Sin embargo, estructurar talleres y currículos comunitarios requiere trascender la mera transferencia de datos científicos.

Como propuso Gabriela Mistral, la educación no consiste solo en enseñar "de cabeza a cabeza, sino también de corazón a corazón", este pensamiento que trasciende el tiempo, el espacio y las disciplinas, es imperativo para abordar este tipo de problemática. Formar seres capaces de actuar con justicia, pensar con libertad y sentir con sensibilidad el ecosistema que nos rodea es el objetivo último de esta propuesta. A través de experiencias de aprendizaje activo en la naturaleza, es posible empoderar a la población sobre el valor intrínseco del huemul como especie paraguas y símbolo de identidad. Es así como los relatos mistralianos se transforman en un llamado de atención a nuestras dinámicas como sociedad; entregan una nueva mirada desde la vereda de lo intangible que, aunque parezca lejana a las métricas del SIG y la ciencia, inspira a descifrar los misterios de la naturaleza, educar para la resiliencia. En definitiva, la tecnología y el análisis espacial puede entregarnos las coordenadas exactas de los últimos refugios del huemul, pero es la educación ambiental una herramienta capaz de forjar la voluntad social para protegerlos, garantizando que este cérvido no quede relegado a ser una figura de metal en nuestro escudo nacional, sino que siga caminando vivo y libre por el corredor biológico.

7.6.7 Restauración Ecológica y Resiliencia del Paisaje

Las proyecciones del modelo bajo escenarios de cambio climático evidencian una drástica reducción del hábitat idóneo, lo que hace imperativo integrar la restauración ecológica como medida de adaptación. Se propone implementar programas de restauración en las áreas degradadas de la zona de amortiguación, enfocándose en la reconexión de parches de bosque nativo y la recuperación de mallines (vegas) que son críticos para el forrajeo estival. Asimismo, la restauración del paisaje debe abordarse desde una perspectiva socio ecológica. Fomentar la transición hacia nuevas prácticas más resilientes al cambio climático permitirá suavizar el efecto borde como la agroecología, transformando las zonas de conflicto agrícola en paisajes multifuncionales que benefician tanto la economía local como la conectividad estructural del hábitat del huemul.

8. Conclusiones

La presente investigación permitió dar respuesta a la pregunta central de este estudio, cumpliendo con el objetivo general de analizar el hábitat potencial del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) para contribuir a su conservación en la Reserva de Biosfera Corredor Biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja. Mediante la integración de herramientas de machine learning y sistemas de información geográfica, se logró no solo caracterizar espacialmente los

últimos refugios prístinos del cérvido, sino también cuantificar empíricamente el nivel de amenaza al que están sometidos.

En cuanto a la caracterización del nicho ecológico, el modelo predictivo demostró un desempeño estadístico altamente robusto, confirmando que la idoneidad del hábitat está estrechamente ligada a variables como la diversidad topográfica, la elevación y regímenes estables de precipitación. La coherencia biológica de estos resultados se validó al constatar que prácticamente el 76% del hábitat de alta idoneidad recae sobre coberturas de vegetación natural (bosques de *Nothofagus*, matorrales y vegas andinas), ecosistemas que proveen el forraje y el resguardo térmico crítico para la supervivencia de la especie. Sin embargo, el análisis espacial reveló que los parches óptimos no se limitan a las áreas protegidas del Estado (zonas núcleo), sino que más del 60% de este hábitat clave se extiende hacia la zona de amortiguación, un territorio que actualmente carece de protección legal efectiva.

El cruce de esta distribución espacial con las variables de presión territorial permitió identificar las amenazas que ponen en riesgo la viabilidad de esta población septentrional. Se concluye que la amenaza de mayor criticidad en el corto plazo es la fragmentación del hábitat derivada de la expansión de proyectos de infraestructura, la red vial y la intensificación de las actividades turísticas, especialmente en el sector de la ZOIT Pinto. Estas intervenciones actúan como barreras físicas y vectores de permeabilidad antrópica, desplazando al huemul de sus refugios históricos y exponiéndolo al ataque de perros asilvestrados y a la competencia con el ganado introducido por las prácticas de veranadas.

Por otra parte, la proyección del modelo bajo escenarios de cambio climático advierte una amenaza aún más severa a largo plazo, pronosticando la potencial desaparición de las áreas de alta idoneidad en las próximas cinco décadas. Esta predicción subraya que, si la ocupación humana actual continúa bloqueando la conectividad del paisaje hacia el sur, el huemul perderá toda capacidad de adaptación y resiliencia climática.

Finalmente, los resultados de esta tesis evidencian que la sola declaración de áreas núcleo es insuficiente para garantizar la perpetuidad del huemul en Chile central. Se concluye que es imperativo implementar un manejo adaptativo a escala de paisaje, que incluya la ampliación de la Reserva Nacional Ñuble, el establecimiento de corredores buffer con regulaciones estrictas de uso de suelo, y la transición hacia un modelo de ecoturismo sustentable con capacidades de carga definidas. Proteger al huemul implica salvaguardar la integridad de todo el ecosistema andino, un desafío que requiere el compromiso de la institucionalidad, el rigor de la ciencia y la

voluntad educativa de las comunidades para asegurar que este emblema nacional siga siendo una realidad viva en nuestras cordilleras.

9. Referencias

- Apfelbach, R., Parsons, M. H., Soini, H. A., & Novotny, M. V. (2005). "Communication by chemical signals: Behavior, social recognition, pheromones and odors." *Chemical Senses*, 30(1), i73-i74.
- Alaniz, A. (2017). Interacción espacial actual entre la especie invasora *harmonia axyridis* (coleoptera: coccinellidae) y los coccinélidos nativos y endémicos de Chile [Tesis de Magíster] Universidad de Chile.
- Aldridge, D., López, D., Saucedo, R., Vila, C., Rubén, A. (2005). *Los Últimos Senderos del Huemul*. Editorial: Enersis/Fundación Huinay, Santiago de Chile, 1ª Edición.
- Brennan, P. A., & Zufall, F. (2006). "Pheromonal communication in vertebrates." *Nature*, 444(7117), 308-315.
- Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA. 2008. *Estrategia Regional para la Conservación y Uso Sostenible de Humedales Altoandinos*. Gobiernos de Ecuador y Chile, CONDESAN y TNC-Chile
- Corporación Nacional Forestal; Servicio Agrícola y Ganadero; Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2009. *Plan Nacional de Conservación del Huemul (Hippocamelus bisulcus, Molina 1782) en Chile*. 2008 – 2012. Taller Participativo para la Elaboración del Plan, Puerto Fuy, Agosto de 2007. 50 Pp
- Devictor, V., Clavel, J., Julliard, R., Lavergne, S., Mouillot, D., Thuiller, W., Venail, P., Villéger, S., Mouquet, N. (2010). Defining and measuring ecological specialization. *Journal of Applied Ecology*. 47. 15 - 25.
- FAO. 2019. *Guía de educación ambiental para funcionarios públicos: Conservación de especies amenazadas, región del Biobío, Queule, Zorro de Darwin y Huemul*. Santiago, Chile. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Figueroa, R., Corales, S., (2007) Hábitat y dieta del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en el corredor biológico Nevados de Chillán-Laguna Laja: la importancia de la flora andina para la conservación de un cérvido en peligro de extinción. *Revista del Jardín Botánico Chagual*. 5. 21-32.
- Flueck, W. T. (2021). Functional limb anatomy in a refugee species: The endangered Patagonian huemul deer (*Hippocamelus bisulcus*). *Anatomia, Histologia, Embryologia: Journal of Veterinary Medicine Series C*, 50(2), 411–416.
<https://doi.org/10.1111/ahe.12624>

- Garcés, C (2020) Ficha fase participación ciudadana de antecedentes de especie Huemul (*Hippocamelus bisulcus*). 17mo proceso del Reglamento de clasificación de especies según estado de conservación del Ministerio del Medio Ambiente.
- Hinojosa A., Ramírez E. (2014). Arriba en la Cordillera: Historia y visiones de la Reserva Nacional Ñuble y los esfuerzos para la conservación del huemul. Corporación Nacional Forestal.
- Hinojosa, A., López R. (2014). Estado Actual del conocimiento del huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en Chile. Boletín Biodiversidata, Conservación, Gestión y Manejo de Áreas Silvestres Protegidas. 2. 53-76.
- Hinojosa, A., Ramírez, E., Rojas, P y López, R. (2018) Extensión de la presencia y área de ocupación del huemul del sur (*Hippocamelus bisulcus*, Cervidae) en la zona central de Chile. Revista Biodiversidata, CONAF, pp. 59-71.
- Hutchinson, G. E. Concluding remarks. Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology, 1957, vol. 22, p. 415-427.
- Marín, J.C., Varas, V., Vila, A.R., López, R., Orozco-ter Wengel, P. and Corti, P. 2013. Refugia in Patagonian fiords and the eastern Andes during the Last Glacial Maximum revealed by huemul (*Hippocamelus bisulcus*) phylogeographical patterns and genetic diversity. J. Biogeogr., 40: 2285-2298. <https://doi.org/10.1111/jbi.12161>
- Mistral, G.1925. Menos cóndor y más huemul. En F. Pérez (selección, prólogo y notas), Gabriela Mistral. 50 prosas en El Mercurio 1921-1956. Aguilar Chilena de Ediciones.
- Muller-Schwarze, D. (2006). Chemical Ecology of Vertebrates. Cambridge: Cambridge University Press. Pp 80
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pliscoff, Patricio, & Fuentes-Castillo, Taryn. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. Revista de geografía Norte Grande, (48), 61-79. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Povilitis, A. (1998) Characteristics and conservation of a fragmented population of huemul (*Hippocamelus bisulcus*) in central Chile. Biol. Cons. 86:97-104.
- Povilitis, A. (2002). El estado Actual del Huemul (*Hippocamelus bisulcus*, Cervidae) En Chile Central. Gayana 66: 59-68.2002.

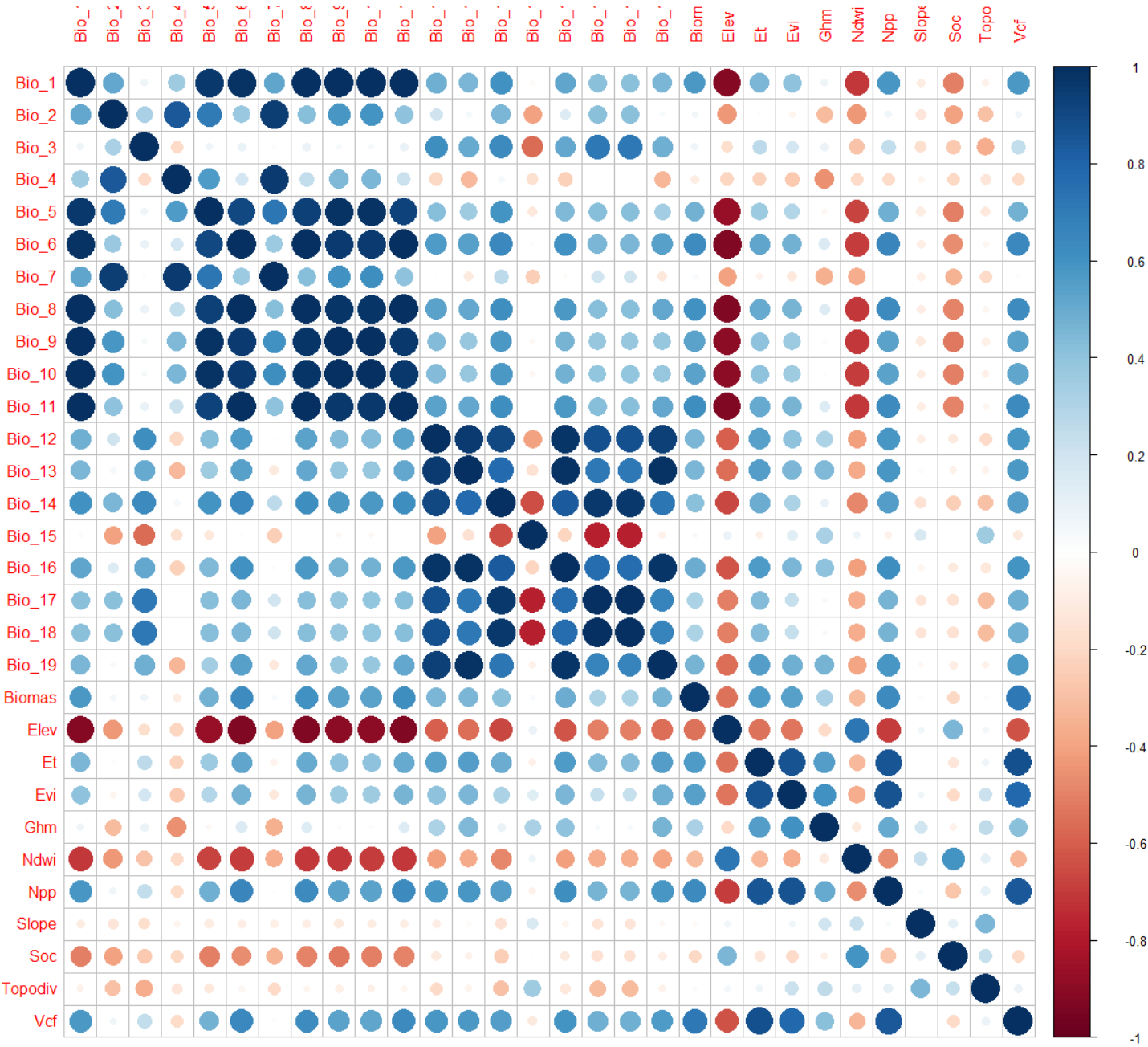
- Vila, A., López, R., Pastore, H., Faúndez, R., Serret, A. 2004. Distribución actual del Huemul en Argentina y Chile. 28 páginas.
- Vila, A., Saucedo, C., Aldridge, D., Ramilo, E., Corti, P. 2010. South Andean huemul *Hippocamelus bisulcus* (Molina 1782). *Neotropical Cervidology*. 89-100.
- San Martín P. 2014. Reserva de la Biósfera Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja: de la amenaza de la extinción al desarrollo sustentable. En: A Moreira-Muñoz & A Borsdorf (eds) *Reservas de la Biósfera de Chile: Laboratorios para la Sustentabilidad*. Academia de Ciencias Austriaca, Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, serie Geolibros 17: 146-160.
- Sepúlveda Vásquez, C. G. 2022. "Menos cóndor y más huemul": el ejercicio de pensar con Gabriela Mistral. *Revista Mexicana de Historia de la Educación*, 10(20), 63-84. <https://doi.org/10.29351/rmhe.v10i20.389>.
- Phillips S., Miroslav D., Schapire, R. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1).
- Phillips, S, Dudík, M., Schapire, R. 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Proceedings, Twenty-First International Conference on Machine Learning, ICML 2004*. 21. 10.1145/1015330.1015412.
- RStudio 2024.04.1+748 "Chocolate Cosmos" Release (3ada7c6ddc8fcdb86a727a4f0ae467b9d9a7296c, 2024-05-07) for Windows Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) RStudio/2024.04.1+748 Chrome/120.0.6099.291 Electron/28.2.6 Safari/537.36, Quarto 1.4.553

10. Anexos

Apéndice 1: Variables ambientales y análisis de correlación

Variable	Descripción
bio_1	Temperatura media anual
bio_2	Rango Diurno Medio
bio_3	Isoterma
bio_4	Estacionalidad de la Temperatura
bio_5	Temperatura máxima del mes más cálido
bio_6	Temperatura mínima del mes más frío
bio_7	Temperatura anual
bio_8	Temperatura media del trimestre más húmedo
bio_9	Temperatura media del trimestre más seco
bio_10	Temperatura media del trimestre más cálido
bio_11	Temperatura media del trimestre más frío
bio_12	Precipitación anual
bio_13	Precipitación del mes más húmedo
bio_14	Precipitación del mes más seco
bio_15	Estacionalidad de la Precipitación
bio_16	Precipitación del trimestre más húmedo
bio_17	Precipitación del trimestre más seco
bio_18	Precipitación del trimestre más cálido
bio_19	Precipitación del trimestre más frío
biomass	Biomasa
elev	Elevación
et	Evapotranspiración
evi	Índice de Vegetación Mejorado
ghm	Índice de Modificación Humana Global
ndwi	Índice de Diferencia Normalizada del Agua
npp	Producción Primaria Neta
slope	Pendiente
soc	Carbono Orgánico del Suelo
topodiv	Diversidad Topográfica
vcf	Fracción de Cobertura Vegetal

Figura 15: Análisis de correlación de variables ambientales para modelación espacial del hábitat potencial de *Hippocamelus bisulcus*



Apéndice 2: Curvas de respuesta del modelo Maxent para *Hippocamelus bisulcus*.

Estas curvas muestran cómo cada variable ambiental afecta a la predicción de Maxent. Las curvas muestran cómo varía la probabilidad de presencia prevista al modificar cada variable ambiental, manteniendo todas las demás variables ambientales en su valor medio de la muestra. Haz clic en una curva de respuesta para ver una versión ampliada. Ten en cuenta que las curvas pueden resultar difíciles de interpretar si hay variables fuertemente correlacionadas, ya que el modelo puede depender de las correlaciones de formas que no resultan evidentes en las curvas. En otras palabras, las curvas muestran el efecto marginal de cambiar exactamente una variable, mientras que el modelo puede aprovechar los conjuntos de variables que cambian conjuntamente. Las curvas muestran la respuesta media de las siete ejecuciones repetidas de Maxent (rojo) y la media $\pm$ una desviación estándar (azul, dos tonos para las variables categóricas).

