



Departamento de Evaluación Ambiental
Gerencia de Fiscalización Forestal y Evaluación Ambiental
Corporación Nacional Forestal

PROPUESTA DE CRITERIOS Y VARIABLES PARA LA EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT

Diciembre, 2025

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DEFINICIÓN DE ALTERACIÓN DE HÁBITAT	3
3. DETERMINACIÓN DE LOS CRITERIOS Y VARIABLES DE RELEVANCIA EN LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT	7
4. CONSIDERACIONES PREVIAS EN LA EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT... 9	
4.1. AMBIENTE ABIÓTICO.....	9
4.1.1. <i>Variables climáticas</i>	9
4.1.2. <i>Variables topográficas</i>	13
4.1.3. <i>Variables edáficas</i>	15
4.2. AMBIENTE BIÓTICO	18
4.2.1. <i>Fauna</i>	19
4.2.2. <i>Flora</i>	20
4.2.3. <i>Hongos</i>	21
4.3. CONCLUSIONES	22
5. VARIABLES Y CRITERIOS DE ALTERACIÓN DE HÁBITAT DE BOSQUES NATIVOS DE PRESERVACIÓN (BNP)	24
5.1. VARIABLES Y CRITERIOS QUE PERMITEN EVALUAR LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT	24
5.1.1. <i>Descripción de la autoecología de la especie y dinámica de sus bosques</i>	24
5.1.2. <i>Identificación de las causas de sus problemas de conservación</i>	26
5.1.3. <i>Fragmentación de hábitat</i>	26
5.1.4. <i>Raíces</i>	29
5.1.5. <i>Estado fitosanitario</i>	34
5.1.6. <i>Presencia de especies exóticas</i>	39
5.1.7. <i>Material particulado</i>	40
5.2. VARIABLES Y CRITERIOS QUE PERMITEN EVALUAR LA MAGNITUD DE LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT	44
5.2.1. <i>Cuantificar número de individuos reproductivos de la especie</i>	44
5.2.2. <i>Tamaño mínimo del parche remanente</i>	46
5.2.3. <i>Matriz ecotonal previa modificación antrópica del paisaje</i>	47
5.2.4. <i>Tipo, magnitud y uso de la(s) obra(s)</i>	47
5.2.5. <i>Efecto de la topografía en la alteración de hábitat</i>	49
5.2.6. <i>Formación vegetal</i>	50
5.2.7. <i>Estructura del bosque remanente</i>	51
5.2.8. <i>Eventos climáticos</i>	52
5.2.9. <i>Sinergias no mencionadas</i>	53
5.3. MEDIDAS	54
5.3.1. <i>Estación del año recomendada para ejecutar modificaciones del paisaje</i>	54

5.3.2. Consideración de distancias de seguridad de amortiguación de los efectos de alteración de hábitat sobre BNP.....	55
5.3.3. Medidas de contingencia ante fallas y/o eventualidades en actividades y obras del proyecto que puedan generar alteración de hábitat.....	55
5.4. ALTERACIÓN DE HÁBITAT DE CITRONELLA MUCRONATA	56
5.4.1. Sugerencias a considerar en las medidas para la especie.....	58
5.5. ALTERACIÓN DE HÁBITAT DE PORLIERIA CHILENSIS	60
5.5.1. Sugerencias a considerar en las medidas para la especie.....	62
6. ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA EVALUACIÓN DE LA ALTERACIÓN DE HÁBITAT ...	64
6.1. DETERMINACIÓN DE LA DEMOGRAFÍA POBLACIONAL Y SUS TENDENCIAS	64
6.1.1. Duración del monitoreo.....	65
6.1.2. Diseño de muestreo.....	65
6.1.3. Identificación espacial de los individuos	66
6.1.4. Mediciones de terreno	67
6.1.5. Análisis de datos	68
6.2. RESILIENCIA DE ECOSISTEMAS	70
6.3. DISTANCIAS DE ALTERACIÓN DE HÁBITAT	72
6.4. MUESTREO DE LA POTENCIAL ALTERACIÓN DE HÁBITAT EN FASES DE OPERACIÓN	74
6.4.1. Líneas de transmisión de alto voltaje y subestaciones.....	75
6.4.2. Parques fotovoltaicos	77
6.4.3. Parques eólicos.....	78
6.4.4. Centrales hidroeléctricas.....	80
6.4.5. Centrales geotérmicas	80
6.4.6. Hidrógeno verde	81
6.5. DETERMINACIÓN DE POSIBLE AFECTACIÓN HISTÓRICA DE LA CONTINUIDAD DE LA ESPECIE EN UNA CUENCA, EVALUACIÓN COMPARATIVA CON SU RECUPERACIÓN Y FRAGMENTACIÓN HISTÓRICA.	82
6.6. MEJORAR EL ESTADO DE LA INFORMACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS	82
7. CONSIDERACIONES FINALES.....	84

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Variables que generan aumento de la probabilidad de ocurrencia de alteración de hábitat.....	26
Cuadro 2. Valoración de la fragmentación del paisaje como vector de la alteración de hábitat por medio de métricas de paisaje.....	27
Cuadro 3. Determinación de la probabilidad de alteración debido a la fragmentación de hábitat generada, de acuerdo con la sumatoria de la valoración ponderada de las métricas de paisaje.....	28
Cuadro 4. Sugerencia precautoria de extensión de raíces en función del radio de la cobertura de copa del individuo de acuerdo con el grado de aridez del clima.....	31
Cuadro 5. Sugerencia precautoria de extensión de raíces en función del radio de la cobertura de copa del individuo de acuerdo con la magnitud de la pendiente.....	33
Cuadro 6. Grado de compactación (Murdock <i>et al.</i> , 1995) y su efecto en la reducción de la extensión lateral de raíces respecto al radio de la copa.	33
Cuadro 7. Criterios de evaluación del estado fitosanitario y sus distintos componentes para individuos de la especie con problemas de conservación a evaluar.....	35
Cuadro 8. Valoración del estado fitosanitario del individuo.....	38
Cuadro 9. Valores umbrales precautorios de sugerencia para las especies presentes en el bosque nativo construido a partir de valores de concentración de contaminantes en el aire con efectos negativos en la reproducción de diferentes especies ornamentales, agrícolas y rurales.	42

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de la extensión radicular lateral en función del radio de copa según aridez del sistema como sugerencia para la estimación de la extensión radicular en un contexto precautorio y de incertidumbre.....	32
---	----

Glosario

Abundancia de especies: número de individuos por especie de una comunidad o lugar determinado¹.

Abundancia relativa de especies: porcentaje de individuos de una especie en relación con el total de individuos de todas las especies que conforman una comunidad².

Alteración de Hábitat: cambio en el ambiente de uno o más individuos de una especie vegetal que puede llevar a su muerte o a la imposibilidad de reproducirse (Art. 1º, literal a) del DS N.º 93/2008 del Ministerio de Agricultura).

Ambiente o medio ambiente: sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural y que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones (Ley N.º 19.300, Art. 2º, letra ll).

Área del proyecto: área que considera la suma de las superficies ocupadas por cada una de sus partes, acciones, obras y actividades.

Área de ocupación: área que ocupa un taxón dentro de la extensión de su presencia, excluyendo casos aislados. Esto refleja el hecho de que un taxón no suele ocurrir en toda el área de extensión de su presencia, la cual puede contener hábitats desocupados o inadecuados. En algunos casos, el área de ocupación es el área más pequeña esencial en cualquier estado de ciclo de vida para la sobrevivencia de poblaciones existentes de un taxón³.

Área núcleo: representa el área interior de los fragmentos que no estarían afectados por el efecto borde⁴.

Área núcleo total: es la suma de todas las áreas núcleos de los fragmentos de una misma clase en hectáreas⁵.

Biodiversidad: véase Diversidad Biológica.

Bosque: sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos cinco mil metros cuadrados, con un ancho mínimo de cuarenta metros,

¹ Grove, C. 2010. Components of species diversity: species richness and relative abundance. Encyclopedia Britannica. Disponible online < <https://www.britannica.com/> >.

² Sutherland W. 2006. Ecological Census Techniques. Second Edition. Cambridge University Press. 432 p.

³ IUCN, 2016. IUCN Definitions-english.

⁴ McGarigal, K., Cushman, S., Neel, C. & Ene, E. 2002. FRAGS-TATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts, Amherst, computer software program.

⁵ Elkie, P., Rempel, R. & Carr, A. 1999. Patch Analyst User Manual: A Tool for Quantifying Landscape Structure. NWST Technical Manual TM-002, Ontario, 1999.



con cobertura de copa arbórea que supere el 10% de dicha superficie total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables (Art. 2º, numeral 2) de la Ley N.º 20.283).

Bosque nativo: bosque formado por especies autóctonas, provenientes de generación natural, regeneración natural o plantación bajo dosel con las mismas especies existentes en el área de distribución original, que pueden tener presencia accidental de especies exóticas distribuidas al azar (Art. 2º, numeral 3) de la Ley N.º 20.283).

Bosque nativo de preservación: aquel, cualquiera sea su superficie, que presente o constituya actualmente hábitat de especies vegetales protegidas legalmente o aquellas clasificadas en las categorías de en peligro de extinción, vulnerables, raras, insuficientemente conocidas o fuera de peligro; o que corresponda a ambientes únicos o representativos de la diversidad biológica natural del país, cuyo manejo solo puede hacerse con el objetivo del resguardo de dicha diversidad. Se considerarán, en todo caso, incluidos en esta definición, los bosques comprendidos en las categorías de manejo con fines de preservación que integran el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado o aquel régimen legal de preservación, de adscripción voluntaria, que se establezca (Art. 2º, numeral 4) de la Ley N.º 20.283).

Brizales: individuos vegetales cuya altura es entre 0,5 y 2 m y menos de 5 cm de DAP⁶.

Clase de uso (Clase de Paisaje): Conjunto de fragmentos del mismo tipo⁷ o conjunto de fragmentos que tienen el mismo valor o poseen el mismo tipo de uso de suelo, hábitat, etc.

Comunidad: conjunto de poblaciones de dos o más especies diferentes que viven en un área determinada en un tiempo determinado⁸.

CONAF: Corporación Nacional Forestal o Corporación.

Continuidad de la especie: capacidad de una población de una especie vegetal para crecer y reproducirse dentro de su hábitat, tanto en el tiempo como en el espacio.

Cuenca: área geográfica cuyas aguas superficiales y subterráneas drenan o vierten a una red hidrográfica común y finalmente hacia un curso mayor o principal que desemboca en el mar o lago. Cada cuenca puede ser subdividida en subcuenca y estas en subsubcuenca o microcuenca⁹.

Degradación del paisaje: reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad del ecosistema como resultado de una combinación de presiones, incluidas las prácticas de uso y gestión de la tierra¹⁰.

⁶ Quiroz, I. & Steenbuck, D. 2001. Tratamiento intermedios y Técnicas de Manejo. INFOR/Gobierno Regional/DED/Instituto de Educación Rural. 69 p.

⁷ Leitao, B., Miller, J., Ahern, J. & McGarigal, K. 2006. Measuring Landscapes. A Planner's Handbook. Washington: Island Press. 245 p.

⁸ Odum E. 1997. Ecología. Nueva Ed. Interamericana, México, D. F. Tercera Edición. 639 p.

⁹ CIREN. 2014. "Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional".

Densidad de borde: es una métrica del paisaje que mide la longitud total de los bordes entre diferentes tipos de cobertura o hábitats, dividida por el área total del paisaje, expresada usualmente en metros por hectárea (m/ha). Un valor alto significa mayor división, más parches pequeños y bordes, crucial para entender procesos ecológicos y la salud del hábitat¹¹.

Dimensión fractal ponderada por área: índice ecológico que mide la complejidad de la forma de objetos en un paisaje, como fragmentos de hábitat, ponderando su tamaño (área) para reflejar mejor la heterogeneidad espacial y la variabilidad a diferentes escalas, y no solo la relación borde-área. Es igual a 1 cuando todos los parches son circulares (para polígonos) o cuadrados (para rásters) y aumenta a medida que aumenta la irregularidad de la forma del parche¹².

Dinámica natural del bosque nativo: proceso de desarrollo de la vegetación y evolución del bosque nativo, sin influencia humana, que implica cambios en composición y estructura a lo largo del tiempo¹³¹⁴.

Dinámica poblacional: variación de la población en el tiempo en un espacio determinado¹⁵.

Dioica: especie vegetal que presenta flores masculinas en un individuo y las femeninas en otro¹⁶.

Distancia euclíadiana al vecino más próximo: es una medida de aislamiento o dispersión, calculada como la distancia en línea recta desde un parche de hábitat a su parche más cercano del mismo tipo. Se aproxima a 0 a medida que disminuye la distancia al vecino más cercano¹⁷.

Diversidad Biológica: variabilidad de los organismos vivos que forman parte de todos los ecosistemas terrestres y acuáticos. Incluye la diversidad dentro de una misma especie, entre especies y entre ecosistemas (Art. 2º, literal a) de la Ley N.º 19.300; IUCN, 2016). Entiéndase también como Biodiversidad.

¹⁰ UNCCD, 1993. Land degradation. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). <<https://www.unccd.int/data-knowledge/unccd-terminology?search=Land+degradation#>>

¹¹ McGarigal, K. & Marks, B. 1995. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 122 p.

¹² Gomez, A. 2019. Estudio multitemporal de fragmentación y conectividad ecológica en la microcuenca de la Quebrada Lorenzo del municipio de Puerto Asís, Putumayo. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente. Programa de Ingeniería Agroforestal. Proyecto de investigación para optar el título de Ingeniera Agroforestal. 70 p.

¹³ Oliver C. & Larson, B. 1990. Forest Stand Dynamics. New York, USA. McGraw-Hill. 520p.

¹⁴ Lara A., Amoroso, M., Bannister, J., Donoso, C., González, M., Smith-Ramírez, C., Arellano, G. & Gutiérrez, A. 2014. Sucesión y dinámica de Bosques Templados en Chile. Ecología Forestal. Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile, Primera Edición, capítulo: 11, Ediciones UACH, Editores: Claudio Donoso, Mauro E. González, Antonio Lara, pp.323-410.

¹⁵ IUCN, 2016. IUCN Definitions-english.

¹⁶ Hechenleitner V., Gardner, P., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martinez, C. 2005. Plantas amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188p.

¹⁷ McGarigal, K., Cushman, S., Neel, C. & Ene, E. 2002. FRAGS-TATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts, Amherst, computer software program.

Diversidad de especies: número de especies que están presentes en determinado ecosistema. La diversidad de especies considera dos componentes: la riqueza de especies y la abundancia relativa de especies¹⁸.

Ecotono: zona de transición entre dos ecosistemas distintos¹⁹.

Ecosistema: complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente, que interactúan como una unidad funcional (Art. 2º, del DS N.º 1963/1994 del Ministerio de Relaciones Exteriores).

Efecto borde: son cambios ecológicos en los límites de diferentes hábitats, provocando cambios en el microclima. Estos cambios no son estáticos, sino que cambian en el tiempo y espacio, desarrollándose a lo largo de años y décadas. Siendo uno de los mayores moduladores de cambios en paisajes fragmentados²⁰.

Escala espacial: extensión o tamaño de un área de estudio²².

Escala temporal: rango de tiempo en el que ocurren los patrones y procesos analizados (Gutiérrez, 2001).

Especies en Categoría de Conservación (ECC): estado o grado de amenaza en que pueden encontrarse especies vegetales de acuerdo con el riesgo de extinción de sus poblaciones naturales. Estas especies son clasificadas en las categorías: Extinta (EX), Extinta en Estado Silvestre (EW), En Peligro Crítico (CR), En Peligro (EN), Vulnerable (VU), Casi Amenazada (NT), Preocupación Menor (LC) o Datos insuficientes (DD) conforme al Reglamento para Clasificar Especies silvestres según Estado de Conservación (DS N.º 29/2012 del Ministerio de Medio Ambiente).

Especie nativa o autóctona: especie originaria del país, que ha sido reconocida oficialmente y se encuentra incorporada como tal en el decreto supremo expedido por intermedio del Ministerio de Agricultura. El decreto vigente es el DS N.º 68/2009 del Ministerio de Agricultura.

Estructura poblacional: proporción de Organización (estados de desarrollo, sexo, etc.) de los individuos que forman una población en un área determinada²³.

¹⁸ Hill, M. 1973. Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology*, 54(2):427-432

¹⁹ Kolasa, J. & Zalewski, M. 1995. Notes on ecotone attributes and functions. *Hydrobiologia*, 303:1-7

²⁰ Morgan, R. & Jucker, T. 2025. A unifying framework for understanding how edge effects reshape the structure, composition and function of forests. *New Phytologist*, 248(2):529-541

²¹ Laurance, W., Nascimento, H., Laurance, S., Andrade, A., Ewers, R., Harms, K., Luizao, R. & Ribeiro, J. 2007. Habitat Fragmentation, Variable Edge Effects, and the Landscape-Divergence Hypothesis. *PLoS ONE* 2(10): e1017

²² Gutiérrez, J. 2001. Escalas espaciales, escalas temporales. *Estudios geográficos*, 62(242): 89-104.

²³ Castro, L., García, G., García, K., Hernández, R. & Morales, F. 2015. Estructura Poblacional y Diversidad de la Vegetación Arbórea de un Bosque de Quercus En San Fernando, Chiapas. *Universidad de ciencias y Artes de Chiapas*, 2015.



Fragmentación: proceso que implica cambios en el paisaje, donde una gran extensión de hábitat se transforma en un número de fragmentos de superficie menor, aislados unos de otros por una matriz de hábitats diferente del original²⁴.

Fragmento: área o parche de tierra no lineal relativamente homogénea que difiere de su medio ambiente. Puede tener tamaños, formas y tipos de borde muy variados. En cuanto a su origen, puede ser natural o antrópico²⁵²⁶.

Hábitat: es el espacio físico o localización geográfica, donde el conjunto y combinación de recursos bióticos y abióticos, en un tiempo y espacio, facilitan y fomentan el establecimiento de los individuos de una especie dada (población) y que les permite sobrevivir y reproducirse²⁷²⁸²⁹³⁰.

Imprescindible: dicho de una persona o una cosa: de la que no se puede prescindir. Necesario, obligatorio³¹.

Indicador de cumplimiento: medio, instrumento, mecanismo o valor de verificación por medio del cual es posible corroborar el avance de un objetivo estratégico, requisito o meta establecidos en un sistema de gestión³². Para los efectos de esta guía, entiéndase como un dato, conjunto de datos o hechos que permiten medir el grado de cumplimiento de los requisitos asociados a las medidas para asegurar la continuidad de las especies.

Índice de paisaje: algoritmo que cuantifica una determinada característica espacial a nivel de fragmento, clase o paisaje³³.

Índice de conectividad integral: evalúa la capacidad de una red de fragmentos forestales para funcionar como una unidad conectada. Se basa en un modelo binario: dos parches de bosque están "conectados" si la distancia entre ellos es menor a la capacidad de dispersión de una especie (ej. el vuelo de un ave o el desplazamiento de un mamífero). Varía de 0 a 1 y aumenta con la mejora de la conectividad. Los valores bajos indican fragmentos que están relativamente aislados de otros

²⁴ Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 34: 487-515.

²⁵ Forman, R. 1995. *Land Mosaics. The Ecology of Landscape and Regions*. Cambridge University Press. New York, USA. 632 pp.

²⁶ Leitao, B., Miller, J., Ahern, J. & Mcgarigal, K. 2006. *Measuring Landscapes. A Planner's Handbook*. Washington: Island Press. 245 p.

²⁷ Krebs, C. 1985. *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. 3rd ed. Harper and Row, New York.

²⁸ Hall, L., Krausman, P. & Morrison, M. 1997. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 25(1), 173-182 pp.

²⁹ Lindenmayer, D. & Fischer, J. 2006. *Habitat Fragmentation and Landscape Change. An ecological and Conservation Synthesis*. Island Press. Washington Covelo London. 329 p.

³⁰ Morrison, M., Marcot, B. & Mannan, R. 2006. *Wildlife-Habitat Relationships. Concepts and Applications*. Thid Edition. Whaington Covelo London. 493 p.

³¹ RAE. 2019. *Diccionario de la Lengua Española (DLE)*. Edición del Tricentenario. Sitio Web del DLE de la Real Academia Española <<http://dle.rae.es>>.

³² OECD. 2016. *Enforcement and Compliance Indicators*. Sitio web de OECD <<https://www.oecd.org/>>

³³ McGarigal, K., Cushman, S., Neel, C. & Ene, E. 2002. *FRAGS-TATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. University of Massachusetts, Amherst, computer software program.

fragmentos, mientras que valores altos indican fragmentos que están relativamente conectados con otros fragmentos³⁴.

Interés nacional: En el contexto de la aplicación del artículo 19 de la Ley N.º 20.283, dice relación con materias que aportan al interés público de la nación en relación con materias definidas por Ley, políticas públicas e instrumentos de planificación territorial que propenden al beneficio de la comunidad general. Por tanto, no existe interés nacional si las obras o actividades principalmente benefician el interés privado o particular de una o más personas, naturales o jurídicas, o de una o más entidades y no están dirigidas a la satisfacción de necesidades públicas.

Intervención: corta, eliminación, destrucción o descepado de la vegetación con herramientas manuales, maquinaria, herbicidas o quema controlada.

Modificación del paisaje: corresponde a cualquier cambio en el ambiente sea natural, pero sobre todo antrópico transformando entornos naturales en paisajes antropizados para satisfacer necesidades, generando impactos negativos como pérdida de biodiversidad y degradación ambiental³⁵. En este concepto se incluye la definición de intervención.

Monoica: especie vegetal que presenta ambos sexos sobre el mismo individuo³⁶.

Obra Pública: se entenderá como: “Cualquier inmueble, propiedad del Estado, reparado o conservado por éste, en forma directa o por encargo a un tercero, cuya finalidad es propender al bien público” (DS N.º 75/2004 del Ministerio de Obras Públicas, que derogó el DS N.º 15 del 17/1992 y sus modificaciones posteriores y aprueba el Reglamento para contratos de Obras Públicas).

Paisaje: territorio de características heterogéneas, que comprende un mosaico de espacios naturales y antropizados que definen patrones espacio-tiempo como resultado de las complejas interacciones entre factores físicos, biológicos, sociales y económicos, y que suponen una relación entre la configuración espacial y los procesos ecológicos³⁷³⁸³⁹.

Plan de Manejo de Preservación (PMP): instrumento que planifica la gestión del patrimonio ecológico, buscando resguardar la diversidad biológica, asegurando la mantención de las condiciones que hacen posible la evolución y el desarrollo de las especies y ecosistemas contenidos

³⁴ Pascual-Hortal, L. & Saura, S. 2006. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21:959–967

³⁵ Krajewski, P. & Lebiedzinska, M. 2024. Assessing the driving forces of landscape change in the perspective of Polish residents. *Ecological Indicators*, 169: 112888

³⁶ Hechenleitner V., Gardner, P., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martinez, C. 2005. Plantas amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188p.

³⁷ Forman R. & Godron, M. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley. New York, USA.

³⁸ Forman R. 1995. *Land Mosaics. The Ecology of Landscape and Regions*. Cambridge University Press. New York, USA. 632 pp.

³⁹ O'Neill, R., Krummel, J., Gardner, R., Sugihara, G., Jackson, B., De Angelis, D., Milne, B., Turner, M., Zygmunt, B., Christensen, S., Dale, V. & Graham, R. 1988. Indices of Landscape Pattern. *Landscape Ecol.* 1(3): 153-162.



en el área objeto de su acción, resguardando la calidad de las aguas y evitando el deterioro de los suelos (Art. 1º, literal i) del DS N.º 93/2008).

Población: grupo de individuos de la misma especie que ocupa un lugar determinado en un tiempo determinado⁴⁰.

Regeneración: Corresponde a la etapa juvenil de desarrollo del bosque, donde las plantas no pasan los 2 m de altura⁴¹.

Requerimientos ecológicos: condiciones y componentes físicos, químicos y biológicos del ambiente que necesita una especie vegetal para su crecimiento, desarrollo y reproducción. La clasificación más sencilla de las exigencias ecológicas de las especies vegetales distingue comúnmente los siguientes factores: clima (luz, precipitaciones, disponibilidad de agua, temperatura [mínima, máxima, media], periodo libre de heladas), suelo (textura, estructura, pH, drenaje), topográfico (altitud, exposición), biótico (competencia entre especies, actividad de la microflora, biota del suelo, fenómenos parasitarios), entre otros⁴².

Resolución de Calificación Ambiental (RCA): acto administrativo emitido por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), mediante el cual se califica ambientalmente una actividad o proyecto (Art. 24 de la Ley N.º 19.300) una vez finalizado el proceso de evaluación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA).

Resolución Fundada (RF): acto administrativo emitido por la Corporación Nacional Forestal, en el cual se autoriza o rechaza la intervención o alteración del hábitat excepcional de los individuos de especies vegetales en categoría de conservación de conformidad con el artículo 37 de la Ley N.º 19.300 (Art. 19 de la Ley N.º 20.283).

Riqueza de especies: número total de especies vegetales en un área determinada⁴³.

Rodal: agrupación de árboles que, ocupando una superficie de terrenos determinada, es suficientemente uniforme en especies, edad, calidad o estado, lo cual permite distinguirlo del arbolado contiguo (Art. 1º, literal j) del DS N.º 193/1998 del Ministerio de Agricultura) y que, en términos silviculturales, se diferencian por criterios asociados a uno o más objetivos de manejo (Corvalán y Hernández, 2006)⁴⁴.

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental.

⁴⁰ Odum E. 1997. Ecología. Nueva Ed. Interamericana, México, D. F. Tercera Edición. 639 p.

⁴¹ Donoso C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, Estructura y Dinámica. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 484 p.

⁴² Sterringa, J. 1972. La Regeneración Forestal, Una de las Necesidades para el Manejo. Texto para Curso Silvicultura Tropical I. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza de Costa Rica.

⁴³ Moreno, C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y tesis SEA, vol. Zaragoza.

⁴⁴ Corvalán P. & Hernández, J. 2006. Estructura de Rodal. Cátedra de dasometría 2006. Universidad de Chile.



SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Sinergia: cooperación o acción conjunta de dos o más elementos (e.g. Cambios en el ambiente) cuyo efecto combinado es mayor que la suma de sus efectos individuales, resultando en un resultado de mayor magnitud.

SNASPE: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

Solicitante: persona natural o jurídica que presenta a la Corporación Nacional Forestal una solicitud de excepcionalidad del Art. 19 de la Ley N.º 20.283. También puede entenderse como Titular.

Tamaño de malla efectivo: es una métrica del paisaje que representa el área promedio de hábitat accesible para un individuo colocado aleatoriamente en el paisaje. Este indicador caracteriza el grado de disección del paisaje a partir de la distribución de tamaños de las teselas del hábitat remanente. Un valor alto indica una buena conectividad (menos fragmentación), mientras que un valor bajo sugiere alta fragmentación⁴⁵⁴⁶.

Tipo forestal: agrupación arbórea caracterizada por las especies predominantes en los estratos superiores del bosque (Art. 2º, numeral 26 de la Ley N.º 20.283). Se considerarán, como tales, los tipos forestales señalados en el artículo 19 del DS N.º 259/1980 del Ministerio de Agricultura (Art. 3º transitorio de la Ley N.º 20.283).

Titular: véase Solicitante.

⁴⁵ Kirk, H., Soanes, K., Amati, M., Bekessy, S., Harrison, L., Parris, K., Ramalho, C., van de Ree, R. & Threlfall, C. 2023. Ecological connectivity as a planning tool for the conservation of wildlife in cities. *MethodsX*, 10: 101989

⁴⁶ Jaeguer, J. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15:115-130

1. Introducción

La evaluación de los ecosistemas naturales en Chile puede verse comprometida por las limitaciones, ambigüedades y la complejidad de la normativa ambiental vigente, así como metodologías deficientes y una crítica falta de información científica sobre la dinámica ecológica y autoecología de las especies. Aun cuando la incertidumbre siempre estará presente en los procesos ecológicos y normativas ambientales⁴⁷⁴⁸⁴⁹, es necesario tomar decisiones. Frente a esto, resulta necesario establecer criterios y lineamientos basados en la información científica y legal disponible. Los que deben poseer la flexibilidad necesaria para adaptarse a nuevas investigaciones y a la diversidad geográfica del país, garantizando así mayor certeza y transparencia institucional.

La **alteración de hábitat**, definida en el artículo 1º, literal a) del DS N.º 93/2008 del Ministerio de Agricultura como “*cambio en el ambiente de uno o más individuos de una especie vegetal que puede llevar a su muerte o a la imposibilidad de reproducirse*” es **ambigua** para propósitos de evaluación y es objeto de análisis en este documento. Esta ambigüedad técnica deriva en que los informes de expertos tienen un enfoque reduccionista (centrados casi exclusivamente en microclima) y carente de fundamentos robustos. La alteración de hábitat es un proceso multicausal complejo, que requiere una visión holística que integre las interrelaciones ecosistémicas y distinga claramente entre perturbaciones naturales y antrópicas.

Las problemáticas principales se resumen son:

- **Carencia de información ecológica:** Insuficiente conocimiento sobre el funcionamiento, dinámica, relaciones ecológicas, fisiología y autoecología de las especies y sus ecosistemas.
- **Dispersión de datos:** Fragmentación de la información proveniente de investigaciones públicas, privadas y académicas.
- **Ambigüedad normativa:** Falta de precisión en las definiciones legislativas vigentes.
- **Deficiencias en informes técnicos:** Escasez de justificaciones robustas y análisis exhaustivos por parte de expertos.
- **Desalineación legal-técnica:** Necesidad de adecuar el marco legal a factores técnicos y estrategias nacionales.
- **Vacíos de investigación:** Limitados estudios disponibles en Chile sobre el efecto borde.

⁴⁷ Regan, H., Colyvan, M. & Burgman, L. 2002. A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological Applications*, 12(2):618–628

⁴⁸ Gudynas, E. 2018. Múltiples paradojas: ciencia, incertidumbre y riesgo en las políticas y gestión ambiental de los extractivismos. *Polisemia* 14(25), 5-37

⁴⁹ Yanai, R., Mann, T., Hong, S., Pu, G. & Zukswert, J. 2021. The current state of uncertainty reporting in ecosystem studies: a systematic evaluation of peer-reviewed literature. *Ecosphere*, 12(6):e03535



Departamento de Evaluación Ambiental
Gerencia de Fiscalización Forestal y Evaluación Ambiental
Corporación Nacional Forestal

Estos desafíos evidencian la necesidad de establecer un **marco metodológico de referencia que facilite la evaluación de la alteración del hábitat**. Dicha estructura otorgará mayor claridad al proceso y brindará a los titulares de proyectos la certeza necesaria para realizar una evaluación estandarizada.

El análisis inicial se centró en las especies *Citronella mucronata* y *Porlieria chilensis* por su relación con proyectos energéticos. Para ello, se realizaron visitas a terreno con el fin de identificar y descartar variables clave que ayuden a comprender la alteración del hábitat. Lo que fue contrastado con información bibliográfica, permitiendo definir indicadores de importancia tanto a nivel general (transversales) como específicos para el naranjillo y el guayacán.

No obstante, establecer estos criterios constituye un paso inicial hacia una mayor certidumbre evaluativa. Para su consolidación, es imperativo un proceso sostenido que articule la investigación científica con el fortalecimiento de las políticas públicas.

2. Definición de alteración de hábitat

La alteración de hábitat, según el literal a) del artículo 1º del Decreto 93 de 2008 del Ministerio de Agricultura (que aprueba el reglamento general de la Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal), se define como el "*Cambio en el ambiente de uno o más individuos de una especie vegetal, que puede llevar a su muerte o a que se vea imposibilitado de reproducirse*". Este concepto está vinculado al artículo 19 de la Ley 20.283, el cual establece la **prohibición** de: "*la corta, eliminación, destrucción o descepado de individuos de las especies vegetales nativas clasificadas, de conformidad con el artículo 37 de la ley N°19.300 y su reglamento, en las categorías en peligro crítico, en peligro y vulnerables que formen parte de un bosque nativo, como asimismo la alteración de su hábitat*". En el contexto de la aplicación por CONAF y lo definido por fiscalía en el Memorándum N°3842/2025, la alteración de hábitat mencionada en la Ley 20.283 se entiende como aquella que ocurre específicamente en un **bosque nativo de preservación**.

Ante esta definición, es necesario comprender que el concepto "*Cambio en el ambiente*" debe integrar variables multidisciplinarias que permitan prever la mortalidad o el cese reproductivo; omitir estas variables constituye un incumplimiento de la definición legal. No obstante, el término "*ambiente*" puede ser ambiguo en una escala espacial. Mientras la RAE lo define de forma general como "*que rodea algo o alguien como elemento de su entorno*" o "*Conjunto de condiciones o circunstancias físicas, sociales, económicas, etc., de un lugar, una colectividad o una época*" la Ley N.º 19.300 (Art. 2º, letra ll) ofrece una visión más sistémica, describiéndolo como un sistema global de elementos naturales, artificiales e interacciones en permanente modificación. No obstante, sigue presentando ambigüedades para su evaluación, ante lo cual se identifica una estrecha relación con el hábitat. Donde, la RAE lo define como "*lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal*", asimismo el libro "*Manual de técnicas para el estudio de fauna*" lo define como "*un espacio específico que reúne condiciones bióticas y abióticas indispensables para la presencia y distribución de una especie*"⁵⁰, determinando la presencia o ausencia de una especie⁵¹. Coincidente con lo mencionado en "*Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis*"⁵² y lo presente en la tercera edición del libro "*Ecology*"⁵³. A este concepto se le suma la temporalidad que comúnmente es ignorada al definir el concepto de hábitat, junto con mencionar que estas condiciones apropiadas propician la sobrevivencia y reproducción de las especies y contribuyen a la continuidad de sus poblaciones⁵⁴. Esto es coincidente con la definición presente en este documento y en la "*Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N°20.283 sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal*" donde se define como "*es el espacio físico o localización geográfica, donde el conjunto y combinación de recursos bióticos y abióticos, en un tiempo y espacio, facilitan y fomentan el establecimiento de los*

⁵⁰ Delfín-Alonso, C., Gallina-Tessaro, S. & López, C. 2014. El hábitat: definición, dimensiones y escalas de evaluación para la fauna silvestre. En: Manual de Técnicas para el Estudio de la Fauna (pp.28). Segunda edición, capítulo 13. INECC-SEMARNAT.

⁵¹ Gallina-Tessaro, S. 2011. Características y evaluación del hábitat. En: Manual de técnicas para el estudio de la fauna. INECOL/UAQ. Querétaro, México. pp: 281-316.

⁵² Lindenmayer, D. & Fischer, J. 2006. Habitat Fragmentation and Landscape Change. An ecological and Conservation Synthesis. Island Press. Washington Covelo London. 329 p.

⁵³ Kreebs, C. 1985. Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance. 3rd ed. Harper and Row, New York. 753 p.

⁵⁴ Hall, L., Krausman, P., & Morrison, M. 1997. The habitat concept and a plea for standard terminology. Wildlife Society Bulletin, 25(1), 173-182pp

individuos de una especie dada (población) y que les permite sobrevivir y reproducirse”. En este contexto, el **concepto de ambiente debe interpretarse en estrecha relación con el de hábitat, ya que este último proporciona la delimitación espacial necesaria que la ley no especifica de manera explícita.**

Contrario a la postura de ciertos informes técnicos que restringen el hábitat al rango de dispersión de semillas, se argumenta que en la actualidad dicha aproximación carece de un sustento robusto. En Chile, la información sobre agentes dispersores y sus distancias de transporte es escasa y presenta una alta variabilidad. Si bien este criterio podría aplicarse a especies con dispersión exclusivamente por barocoria⁵⁵ —por su mayor facilidad de evaluación—, no existe evidencia suficiente para generalizar este supuesto. Casos como *Gomortega keule* demuestran esta incertidumbre: aunque tradicionalmente se asocia a la barocoria⁵⁶⁵⁷, estudios recientes sugieren que el ganado podría actuar como dispersor incidental⁵⁸. Un escenario similar ocurre con el género *Beilschmiedia*, donde la ausencia de fauna dispersora identificada no implica su inexistencia. Estudios respecto al anacronismo evolutivo sugieren que roedores, zorros e incluso humanos han reemplazado a la megafauna extinta en estas funciones⁵⁹⁶⁰. Al respecto, Galindo (2016)⁶¹ menciona que existe la posibilidad de que las semillas de estas especies del género sean almacenadas por los depredadores, lo que podría provocar su dispersión. Ejemplos como *Jubaea chilensis* (dispersada hoy por el degú⁶²) o *Araucaria araucana* (por aves⁶³ y roedores⁶⁴) confirman que la dispersión actual depende de vectores sustitutos, que merecen ser estudiados. Por tanto, reducir el hábitat a un

⁵⁵ Método de dispersión de semillas de las plantas donde la gravedad es el principal agente

⁵⁶ Muñoz, D. 2020. El Queule en el bosque costero maulino: Un árbol en extinción en un ecosistema en extinción. Departamento de Ciencias Agrarias (Universidad Católica del Maule), Curicó, Chile. La Chiricoca, 28:14-28

⁵⁷ Villegas, P., Le Quesne, C. & Lusk, C. 2003. Estructura y dinámica de una población de *Gomortega keule* (Mol.) Baillon en un rodal antiguo de bosque valdiviano, Cordillera de Nahuelbuta, Chile. Gayana botánica, 60(2):107-113

⁵⁸ Muñoz-Concha, D., Muñoz, K. & Loayza, A. 2020. Anachronic Fruit Traits and Natural History Suggest Extinct Megafauna Herbívores as the Dispersers of an Endangered Tree. Plants, 9(11):1492

⁵⁹ Guimarães, P., Galetti, M. & Jordano, P. 2008. Seed Dispersal Anachronisms: Rethinking the Fruits Extinct Megafauna Ate. PLoS ONE, 3(3): e1745

⁶⁰ Muñoz-Concha, D., Mundaca, E., Alarcón, D., Machuca, J., Crisol-Martínez, E. & Loayza, A. 2022. Could foxes be surrogate seed dispersers of a megafaunal fruit vine in southern South America?. Ecosphere, 13:e4186

⁶¹ Galindo, N. 2016. Efecto de la densidad de semillas y la cobertura de hojarasca sobre la depredación de semillas después de la dispersión en un bosque de *Beilschmiedia miersii* (Gay) Kosterm, Región Metropolitana. Facultad de Ciencias Forestales y de Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Memoria para optar al Título profesional de Ingeniero Forestal. 42 p.

⁶² Núñez-Hidalgo, I., Fleury, M. & Bustamante, R. 2023. Niche models as a tool to inform restoration and conservation strategies: the case of *Jubaea chilensis* (palm, Arecaceae) and its seed disperser *Octodon degus* (rodent, Octodontidae). Frontiers in Forests and Global Change Forest Management, 6:1143208

⁶³ Tella, J., Lambertucci, S., Speziale, K. & Hiraldo, F. 2016. Large-scale impacts of multiple co-occurring invaders on monkey puzzle forest regeneration, native seed predators and their ecological interactions. Global Ecology and Conservation, 6:1-15

⁶⁴ Shepherd, J. & Ditgen, R. 2013. Rodent handling of *Araucaria araucana* seeds. Austral Ecology, 38(1):23-32

radio arbitrario basado en supuestos incompletos compromete la viabilidad de las especies⁶⁵⁶⁶⁶⁷, junto a omitir variables críticas como el clima, la topografía y los procesos estocásticos⁶⁸⁶⁹.

Mientras la **dimensión espacial queda delimitada por el concepto de hábitat**, persiste una ambigüedad temporal que debe resolverse. Dado que la variable medible cronológicamente es el *"cambio"* —definido por la RAE como la modificación de apariencia, condición o comportamiento— y ante la ausencia de un umbral normativo específico, dicho cambio debe proyectarse sobre la totalidad de la vida útil del proyecto. En consecuencia, se entenderá como alteración del hábitat cualquier modificación que derive en la mortalidad o en la inhibición reproductiva de uno o más individuos **producto de las actividades del proyecto (construcción, operación y cierre)**.

Cabe destacar que la definición normativa alude expresamente al *"cambio de ambiente de uno o más individuos"*; por tanto, la afectación de un solo ejemplar en términos de supervivencia o éxito reproductivo es condición suficiente para configurar la alteración. Según la *"Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal"*, esta perturbación puede originarse por obras, intervenciones o cualquier perturbación del ecosistema. **Así, la alteración del hábitat no se restringe exclusivamente a la intervención directa del bosque nativo de preservación, sino que se vincula a cambios en la matriz de la formación —ya sea por creación o conversión—, lo que se define técnicamente como modificación del paisaje.**

Se vislumbran graves problemas en la construcción y finalidad de la definición legal propuesta. En relación con esto, Andrewartha y Birch (1984) señalan: *"Buscar el mejor concepto no es poca cosa, porque los experimentos que a un científico pueden ocurrírsele, y por ende los hechos que él puede descubrir, así como las explicaciones que él ofrece para ellos, dependen de cómo él concibe la Naturaleza"*⁷⁰. Este principio es plenamente aplicable al ámbito legislativo. La definición de un concepto debe ser inequívoca para garantizar su correcta aplicación en función de los objetivos de interés nacional. Una definición ambigua genera un problema de interpretación legal, abriendo un **margen de discrecionalidad**. Dicho margen implica la valoración subjetiva de los resultados prácticos de las diferentes lecturas del texto para seleccionar la acepción más *"oportuna"*, lo que socava la certeza jurídica y la coherencia en la aplicación de la normativa⁷¹⁷².

⁶⁵ Zellweger, T., & Zenger, T. 2021. Entrepreneurs as Scientists: A Pragmatist Alternative to the Resource-Based View of Strategy. *Academy of Management Review*, 46(2), 379-399

⁶⁶ Sinatra, G. & Lombardi, D. 2020. Evaluating Point of View in Science: The Role of Source Credibility and Bias. *Educational Psychologist*, 55(3), 120-135

⁶⁷ Kuhn, T. S. (1962). *La estructura de las revoluciones científicas*. University of Chicago Press. (Existen múltiples ediciones posteriores en español, comúnmente publicadas por el Fondo de Cultura Económica). 351 p.

⁶⁸ Gleason, H. 1917. The structure and development of the plant association. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 44(10), 463–481.

⁶⁹ Hutchinson, G. 1981. *An introduction to population ecology*. Yale University Press. 260 p.

⁷⁰ Andrewartha, H. & Birch, L. 1984. *The Ecological Web: More on the distribution and abundance of animals*. University of Chicago Press, Chicago. 506 p.

⁷¹ Sepúlveda, J. 2012. La Ley también es un problema: la necesidad de institucionalizar la retroalimentación en el sistema legislativo. Reglas claras, economía institucional, la legislación óptima y la evaluación de las leyes por medio de un control de eficiencia post



A partir de lo expuesto, se tiene que diversos informes de expertos omiten factores determinantes de la definición legal de "alteración de hábitat" o interpretan sus elementos de manera parcial. Esta situación subraya la imperativa necesidad de otorgar certezas técnicas y jurídicas a dicho concepto, así como de estandarizar los criterios para su evaluación.

Resulta fundamental distinguir entre los conceptos de **efecto borde** y **alteración de hábitat**. El primero se define por las variaciones microclimáticas que ocurren en la transición entre distintas matrices; es un fenómeno intrínseco a todo ecotono —ya sea entre distintas formaciones boscosas o entre bosque y áreas despejadas— cuya magnitud es variable. En contraste, la alteración de hábitat no es inherente a todos los bordes. Su manifestación depende de múltiples factores ambientales, entre los que destaca la naturaleza del límite: mientras los bordes naturales mantienen un equilibrio sistémico, los bordes antropogénicos generan modificaciones de mayor escala en el ecotono. En consecuencia, el efecto borde es una constante ecológica, mientras que la alteración de hábitat es un proceso condicionado.

Finalmente, para determinar los procedimientos y antecedentes requeridos en la tramitación de la excepcionalidad contemplada en el Artículo 19 de la Ley N.º 20.283, así como para la obtención de las resoluciones fundadas correspondientes, resulta imperativo remitirse a la *"Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal"* de CONAF, publicada en el año 2020.

legislativo; aplicabilidad al caso Chileno. Memoria de prueba para optar al grado de licenciado en ciencias jurídicas y sociales. Facultad de Derecho, Universidad de Chile. 183 p.

⁷² Guastini, R. 1997. Problemas de interpretación. Revista de Teoría y Filosofía del Derecho, 7:121-131

3. Determinación de los criterios y variables de relevancia en la alteración de hábitat

La construcción del presente documento se basó en una exhaustiva revisión y análisis de informes de expertos, estudios de impacto ambiental (EIA) y los correspondientes procesos de evaluación ambiental de diversos proyectos energéticos. El enfoque se centró en aquellos proyectos que identificaron intervención o alteración de hábitat sobre las especies *Citronella mucronata* y/o *Porlieria chilensis*. Esta revisión abarcó proyectos con Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable, cuyas resoluciones fundadas fueron publicadas entre octubre de 2009 y agosto de 2025, **permitiendo identificar problemas recurrentes en la evaluación de la alteración de hábitat.**

Paralelamente, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de reportes técnicos, fondos de investigación, libros, fichas de especies, tesis, artículos científicos e información georreferenciada de ambas especies (GBIF⁷³, información del catastro vegetacional de CONAF, parcelas de inventario forestal de CONAF y registro de ocurrencias de especies asociados a estudios de impacto ambiental). Esta recopilación abordó aspectos clave de su autoecología: dinámica sucesional, asociaciones vegetales, relaciones interespecíficas, preferencias edafológicas, topográficas y climáticas, amenazas principales, germinación de semillas y estado de regeneración. El objetivo de este análisis fue determinar los factores de cambio susceptibles de generar alteración de hábitat y conocer el estado de la información disponible sobre estas especies nativas en Chile, e identificar medidas de continuidad para la especie pertinente a implementar en este contexto.

Frente a las inconsistencias identificadas en la evaluación de la alteración del hábitat y su conexión con el efecto borde (*edge effect*), se procedió a analizar literatura especializada —reportes técnicos, libros, tesis y artículos científicos— que aborda este fenómeno, los factores que modulan su magnitud (*MEI*) y sus consecuencias sobre la vegetación remanente. Se constató una marcada escasez de información sobre esta temática en el contexto nacional.

Con esta información se identificaron diferentes factores de interés en la alteración de hábitat como lo son la fragmentación, la modificación y perdida de las propiedades edáficas, la presencia de material particulado, el ingreso de especies exóticas, cambios en el microclima, daño radicular, magnitudes y tipos de perturbaciones antrópicas, topografía, estado fitosanitario, composición de especies, mortalidad de individuos, estructura y entrada de luz, entre otros. Estos parámetros se evaluaron integrando metodologías de terreno y la revisión bibliográfica pertinente.

Adicionalmente, se implementaron muestreos de campo en bordes de origen antrópico producidos por proyectos energéticos, siguiendo las metodologías propuestas por Harper *et al.* (2005)⁷⁴, Günter *et al.* (2007)⁷⁵, Harper y McDonald (2011)⁷⁶, Alignier y Deconchat (2011)⁷⁷ y Harper *et al.* (2015)⁷⁸.

⁷³ Global Biodiversity Information Facility

⁷⁴ Harper, K., Macdonald, E., Burton, P., Chen, J., Brosowske, K., Saunders, S., Euskirchen, E., Roberts, D., Jaiteh, M. & Esseen, P. 2005. Edge Influence on Forest Structure and Composition in Fragmented Landscapes. *Conservation Biology*, Volume 19(3): 768–782

⁷⁵ Günter, S., Weber, M. & Erreis, R. 2006. Influence of distance to forest edges on natural regeneration of abandoned pastures: a case study in the tropical mountain rain forest of Southern Ecuador. *Eur J Forest Res*, 126:67-75

Los datos obtenidos fueron procesados y analizados utilizando pruebas de aleatorización⁷⁹ y pruebas U de Mann Whitney en el software R (versión 4.5.1⁸⁰), para su posterior contraste con los resultados reportados en la literatura científica.

El análisis permitió identificar variables clave para la evaluación de la alteración del hábitat, tanto a nivel general (compartidas por las especies) como específico (particulares de cada una). Al integrar estos hallazgos con la literatura disponible y los problemas identificados en los informes de expertos, se construyeron criterios y herramientas metodológicas para una evaluación más rigurosa.

En los casos donde persiste la incertidumbre debido a la escasez de información sobre especies nativas en Chile, se proponen sugerencias bajo el principio precautorio. Es fundamental reconocer esta carencia de datos para prevenir problemas adicionales asociados a las modificaciones del paisaje por proyectos, asegurar la exhaustividad de la información presentada y garantizar la efectiva protección y evaluación del recurso natural de interés.

⁷⁶ Harper, K. & Macdonald, S. 2011. Quantifying distance of edge influence: a comparison of methods and a new randomization method. *Ecosphere*, 2:1-17

⁷⁷ Alignier, A. & Deconchat, M. 2011. Variability of forest edge effect on vegetation implies reconsideration of its assumed hypothetical pattern. *Applied Vegetation Science*, 14:67-74.

⁷⁸ Harper, K. A., Macdonald, S. E., Mayerhofer, M. S., Biswas, S. R., Esseen, P. -A., Hylander, K., Stewart, K. J., Mallik, A. U., Drapeau, Jonsson, B.-G., Lesieur, D., Kouki, J. and Bergeron, Y. 2015. Edge influence on vegetation at natural and anthropogenic edges of boreal forests in Canada and Fennoscandia. *Journal of Ecology*. 103: 550-562

⁷⁹ Dodonov, P., Harper, K. & Silva-Matos, D. 2013. The role of edge contrast and forest structure in edge influence: vegetation and microclimate at edges in the Brazilian cerrado. *Plant Ecology*, 214:1345-1359

⁸⁰ R Core Team. 2025. R: A language and environment for statistical computing. R version 4.5.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

4. Consideraciones previas en la evaluación de la alteración de hábitat

La interpretación de los "cambios en el ambiente" en la definición legal de alteración de hábitat exige un análisis riguroso de las variaciones en los componentes bióticos y abióticos. Esto es indispensable para identificar alteraciones que deriven en la mortalidad o en la inhibición reproductiva de los individuos; omitir cualquiera de estos efectos constituye una contravención a la normativa vigente.

Actualmente, se observa una omisión recurrente de variables críticas (son abordadas a lo largo de este documento) tanto en informes de expertos como en procesos de evaluación ambiental. Por lo general, el análisis se limita a cambios ambientales mínimos y se restringe casi exclusivamente a la mortalidad directa, sin distinguir el estado fenológico de los ejemplares afectados ni abordar la incapacidad reproductiva. Esta visión parcial ignora la evidencia que sugiere una multiplicidad de factores con potencial de impacto.

Por consiguiente, resulta imperativo integrar la información de las Líneas de Base —siempre que sea representativa y pertinente— sobre los componentes que determinan la supervivencia y el éxito reproductivo. A continuación, se analizan variables abióticas y bióticas clave cuya modificación puede configurar una alteración de hábitat, utilizando como modelos a *Citronella mucronata* y *Porlieria chilensis*. Desestimar la interrelación de estas variables implica omitir el funcionamiento biológico del ecosistema; por ello, se recomienda realizar un análisis integral de estos componentes, aun cuando no constituya una exigencia normativa explícita.

4.1. Ambiente abiótico

El entorno abiótico es determinante para el ciclo vital y el desarrollo de las plantas, pues suministra los recursos esenciales para su subsistencia. Estas condiciones actúan como los principales factores limitantes de la distribución de una especie; por lo tanto, sus variaciones pueden alterar los ciclos biológicos de los individuos. El impacto de dichas modificaciones dependerá tanto de la magnitud de la perturbación en el sistema como de los umbrales de tolerancia de cada especie al estrés ambiental generado⁸¹⁸²⁸³.

4.1.1. Variables climáticas

Los factores climáticos y meteorológicos influyen notablemente en el desarrollo vegetal, regulando la estructura de las formaciones y la viabilidad biológica (supervivencia y reproducción) de los individuos⁸⁴⁸⁵⁸⁶⁸⁷. Es importante precisar que, aunque la intervención de la vegetación no altera el

⁸¹ Zhang, Q., Wang, J. & Wang, Q. 2021. Effects of abiotic factors on plant diversity and species distribution of alpine meadow plants. *Ecological Informatics*, 61:101210.

⁸² Ahmad, N., Irfan, A., Raza, H., Salma, H., Tahir, M., Akhter, S., Sajid, Z., Liaquat, G., Nadeem, M., Ali, M., Hassan, G. & Ashar, M. 2023. Impact of changing abiotic environment on photosynthetic adaptation in plants. *New Frontiers in Plant-Environment Interactions. Environmental Science and Engineering*. Springer.385-423 pp.

⁸³ Nawaz, M., Sun, J., Shabbir, S., Ali, W., Ren, G., Nie, X., Bo, Y., Javed, Q., Du, D. & Sonne, C. 2023. A review of plants strategies to resist biotic and abiotic environmental stressors. *Science of the total environment*, 900:165832.

⁸⁴ Padullés, J., Vilá-Cabrera, A. & Retana, J. 2024. Tree species abundance changes at the edges of their climatic distribution: An interplay between climate change, plant traits and forest management. *Journal of Ecology*, 112(12):2785-2797.

clima a escala regional, sí genera perturbaciones microclimáticas a escala local con efectos inmediatos en el área de influencia y los sectores adyacentes. En el contexto de la alteración de hábitat, se identifican las siguientes variables de relevancia:

- **Velocidad del viento:** El retiro de cobertura vegetal expone a los individuos que anteriormente habitaban el interior del bosque a condiciones de borde, eliminando su protección física frente al viento. Este factor está inversamente relacionado con la humedad relativa y favorece el aumento de la tasa de evapotranspiración; en consecuencia, un incremento en la velocidad del viento acelera la desecación de los tejidos vegetales. Este fenómeno es crítico para la regeneración y puede comprometer la viabilidad de las semillas⁸⁸⁸⁹. La vulnerabilidad de los ejemplares adultos dependerá de la tolerancia específica de la especie.

Por ejemplo, se puede esperar una mayor tolerancia de *Porlieria chilensis* a un cambio en su exposición y mayor velocidad del viento, debido a la estructura y cobertura de las formaciones en las que se presenta, junto con que al presentarse en zonas áridas y semiáridas, tiene un cierto grado de tolerancia a la desecación, sin embargo sus plántulas podrían verse afectadas, acentuándose en los casos que haya ocurrencia de mortalidad de individuos nodriza. Esto puede ser mayor en *Citronella mucronata*, donde un cambio en la exposición a la velocidad del viento, aumentará la desecación de la misma, ya que esta especie está habituada a zonas de alta cobertura vegetal, por lo que al quedar expuesta o cercana a un borde este factor causará un deterioro en sus individuos, que se acrecentará en los individuos de estadios menos desarrollados.

La relevancia de esta variable se acentúa en zonas costeras, patagónicas y cordilleranas (Precordillera y Cordillera de los Andes)⁹⁰, donde las altas velocidades del viento incrementan la probabilidad de configurar una alteración de hábitat. En intervenciones lineales, el impacto dependerá de la orientación de la obra: una disposición paralela a la dirección predominante del viento maximizará el efecto desecante en comparación con una perpendicular. Finalmente, el viento actúa como vector de polución y material particulado, cuyo depósito sobre el follaje reduce el vigor, la capacidad fotosintética y el éxito reproductivo⁹¹⁹²⁹³⁹⁴.

⁸⁵ Xu, W., Rhemtulla, J., Luo, D. & Wang, T. 2024. Common drivers shaping niche distribution and climate change responses of hundred tree species. *Journal of Environmental Management*, 370:123074.

⁸⁶ Smith, T. & Smith, R. 2007. *Ecología*. Pearson Educación, Sexta edición. Madrid. 682 p.

⁸⁷ Mazza, G. & Sarris, D. 2021. Identifying the full spectrum of climatic signals controlling a tree species' growth and adaptation to climate change. *Ecological Indicators*, 130:108109.

⁸⁸ Bolte, A., Czajkowski, T., Cocozza, C., Tognetti, R., de Miguel, M., Psidová, E., Ditmarová, L., Dinca, L., Delzon, S., Cochard, H., Raebild, A., de Luis, M., Cvjetkovic, B., Heiri, C. & Müller, J. 2016. Desiccation and mortality dynamics in seedlings of different European beech (*Fagus sylvatica* L.) populations under extreme drought conditions. *Frontiers in Plant Science*, 7:751.

⁸⁹ Hadley, J. & Smith, W. 1983. Influence of wind exposure on needle desiccation and mortality for timberline conifers in Wyoming, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 15(1):127-135.

⁹⁰ Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11.

⁹¹ Gupta, D., Rai, U., Tripathi, R. & Inouche, M. 2002. Impacts of fly-ash on soil and plant responses, *Journal of Plant Research* 115: 401-409.

- **Precipitación acumulada:** Si bien esta variable no experimenta cambios directos por la intervención, la pérdida de cobertura vegetal y el cambio en el uso de suelo alteran drásticamente el ciclo hidrológico local. Estos factores incrementan la escorrentía superficial y la erosión hídrica, lo que reduce la recarga de acuíferos y acelera la degradación edáfica, especialmente en suelos de texturas finas o con bajo contenido de materia orgánica⁹⁵⁹⁶. Este fenómeno es crítico en las formaciones de espinal habitadas por *Porlieria chilensis*, donde la escasa materia orgánica del suelo limita la retención de recursos, pudiendo comprometer seriamente los procesos reproductivos y la viabilidad de la especie.
- **Radiación solar:** Al igual que el viento, el incremento de la radiación solar tras la apertura del dosel puede inducir estrés hídrico y desecación foliar, afectando críticamente la supervivencia de las plántulas⁹⁷⁹⁸⁹⁹. La magnitud de este impacto está condicionada por la intensidad de la intervención, la estructura de la formación, la pendiente y la orientación del sitio. No obstante, el efecto de la radiación es ambivalente: mientras algunas especies se benefician del aumento lumínico, otras sufren fotoinhibición o desecación según su distancia al borde generado.

Por ejemplo, en zonas próximas al borde, *Citronella mucronata* podría incrementar su tasa de crecimiento; sin embargo, la falta de protección estructural podría comprometer su crecimiento por fotoinhibición¹⁰⁰. Asimismo, una radiación excesiva favorece la colonización de especies de rápido crecimiento, como las del género *Nothofagus*, o de invasoras exóticas como *Acacia dealbata*, generando una sinergia competitiva que desplaza a la especie de interés. En contraste, en sectores alejados del borde, un aumento moderado de luz puede favorecer a especies tolerantes o semitolerantes. Respecto a *Porlieria chilensis*, aunque la radiación por sí sola podría resultar indiferente, su interacción sinérgica

⁹² Arthur, M., Zwick, T., Tolle, D. & Van Voris, P. 1984. Effects of fly ash on microbial CO₂ evolution from an agricultural soil, Water, Air, and Soil Pollution 22(2): 209-211.

⁹³ Seaonez, M. 1971. Introducción a un estudio sobre la contaminación atmosférica y su relación con la vegetación, CIHEAM, Options Méditerranéennes Oct,: 57-62.

⁹⁴ Sharifi, M., Gibson, A., & Rundel, P. 1997. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs, Journal of applied Ecology 837-846.

⁹⁵ Muñoz-Iniestra, D., López, G., Hernández, M., Soler, A. & López, G. 2009. Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. Terra Latinoamericana, 27:237:246.

⁹⁶ Zhang, X., Zhang, S., Zhang, F., Shi, J. & Chen, J. 2025. Rainfall amount shapes the soil erosion and vegetation protection effectiveness in soil conservation. Journal of Hydrology, 663:134219.

⁹⁷ Barber, J. & Andersson, B. 1992. Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis. Trends in Biochemical Sciences, 17(2):61-66

⁹⁸ Stapleton, E. & Walbot, V. 1994. Flavonoids Can Protect Maize DNA from the Induction of Ultraviolet Radiation Damage. Plant Physiology, 105(3):881-889.

⁹⁹ Moresino, R. & Barón, P. 2025. Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas: Impactos negativos en fotosíntesis y biomasa. Idesia, 27(3):59-76

¹⁰⁰ Posada, F. 2007. Fotoinhibición. Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 1(1):114-123

con otras variables ambientales puede incidir negativamente en su viabilidad. De esta manera, esta variable puede ser beneficiosa o perjudicial según diferentes variables¹⁰¹¹⁰².

- **Evapotranspiración:** Las alteraciones en las variables microclimáticas inciden directamente en las tasas de evapotranspiración y en el balance hídrico de las plantas. Este fenómeno puede derivar en un deterioro fisiológico progresivo de los ejemplares y, dependiendo de la magnitud de la modificación del paisaje, comprometer la supervivencia de cualquier especie en las zonas de borde, donde el estrés hídrico se vuelve crítico¹⁰³¹⁰⁴.
- **Temperatura:** Esta variable es determinante en los procesos de evapotranspiración y evaporación del sistema, así como en la germinación y el crecimiento vegetal. Si bien un incremento térmico moderado puede favorecer el desarrollo de ciertas especies, un aumento excesivo resulta contraproducente, limitando la fructificación y reduciendo la tasa fotosintética. En la evaluación de la alteración de hábitat, es crucial analizar las modificaciones en los valores máximos, mínimos, la estacionalidad y, especialmente, la amplitud térmica.¹⁰⁵¹⁰⁶ La remoción de vegetación incrementa esta última, generando una inestabilidad térmica que compromete la viabilidad del hábitat, derivando en alteración de hábitat¹⁰⁷¹⁰⁸.

Por ejemplo, la germinación de *Porlieria chilensis* presenta una alta variabilidad asociada a su latencia fisiológica¹⁰⁹, lo que condiciona la respuesta de cada población ante cambios térmicos. Se ha determinado que su rango óptimo de germinación oscila entre los 20 y 25 °C; valores fuera de este umbral (hacia los 15 o 30 °C) comprometen severamente el éxito germinativo¹¹⁰. El escenario para *Citronella mucronata* es aún más crítico debido a su naturaleza recalcitrante. Sus semillas, altamente sensibles a la deshidratación y, en ocasiones, al frío, pierden viabilidad rápidamente ante fluctuaciones microclimáticas que

¹⁰¹ Kaspar, J., Krusek, M. & Král, K. 2024. The effects of solar radiation on daily and seasonal stem increment of canopy trees in European temperate old-growth forest. *New Phytologist*, 243(2):662-673.

¹⁰² Caldwell, M., Björn, L., Bornman, J., Flint, S., Kulandaivelu, G., Teramura, A. & Tevini, M. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 46:40-52

¹⁰³ Dai, X., Yu, Z., Matheny, A., Zhou, W. & Xia, J. 2022. Increasing evapotranspiration decouples the positive correlation between cover and warming in the Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 13:974745.

¹⁰⁴ Benaradj, A., Boucherit, H., Bouderbala, A. & Hasnaoui, O. 2021. Biophysical effects of evapotranspiration on steppe areas: A case study in Naama Region (Algeria). *Climate Change in Asia and Africa – Examining the Biophysical and Social Consequences, and Society's Responses*. IntechOpen.

¹⁰⁵ Hatfield, J. & Prueger, J. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10:4-10.

¹⁰⁶ Tran, B., Tseng, W. & Chen, C. 2025. Climate change impacts on crop yields across temperature rise thresholds and climate zones. *Scientific reports*, 15:23424.

¹⁰⁷ Doughty, C., Keany, J., Wiebe, B., Rey-Sánchez, C., Carter, K., Middleby, K., Cheesman, A., Goulden, M., da Rocha, H., Miller, S., Mahli, Y., Fauset, S., Gloor, E., Slot, M., Oliveras, I., Crous, K., Goldsmith, G. & Fisher, J. 2023. Tropical forests are approaching critical temperature thresholds. *Nature*, 621(7977):105-111

¹⁰⁸ Hasan, M., Baset, A., Ahmed, J., Karim, A., Islam, A. & Mohi-Ud-Din, M. 2024. Heat stress tolerance in wheat seedling: Clustering genotypes and identifying key traits using multivariate analysis. *Heliyon*, 10(19):e38623

¹⁰⁹ Loayza, A., Ríos, R., Carvajal, D. & Gática, A. 2015. Estado de conservación de *Porlieria chilensis*: Evaluación a través de modelos poblacionales matriciales, ecología y patrones de distribución. Fondo de investigación de Bosque Nativo. 28 p.

¹¹⁰ Cabello, A., Valdés, P., Escobar, D. & Letelier, P. 2014. Efecto de la temperatura y de la aplicación de tratamientos pregerminativos sobre la germinación de semillas de *Porlieria chilensis* I. M. Johnst., guayacán. *Revista Chagual* 11:61-71.

reduzcan la humedad ambiental o del suelo, o que aumenten la desecación por temperaturas extremas¹¹¹. Estos riesgos se ven exacerbados bajo el actual contexto de cambio climático.

- **Días con heladas:** La frecuencia de heladas es un factor crítico que incide directamente en la fenología reproductiva (floración y fructificación), la tasa fotosintética y la integridad de los tejidos vegetales¹¹²¹¹³. Mientras que al interior del bosque este efecto es mitigado por el dosel, en los bordes de origen antrópico la vegetación queda expuesta a condiciones térmicas extremas. En el caso de *Citronella mucronata* y *Porlieria chilensis*, la ausencia de protección por parte de un dosel superior o de plantas nodrizas eleva drásticamente la mortalidad de las plántulas y el daño en estructuras reproductivas.

En ejemplares adultos, la mortalidad por congelación es menos probable debido a sus adaptaciones anatómicas en el xilema, que les permiten mitigar riesgos de cavitación y embolia, otorgándoles además tolerancia a la sequía¹¹⁴¹¹⁵. No obstante, en *Porlieria chilensis*, su alto grado de especialización anatómica —reflejo de una estrecha adaptación a su ecosistema— sugiere que cambios ambientales severos podrían superar sus umbrales de resistencia. Al respecto, proyecciones como las de Loayza *et al.* (2015) ya advierten sobre la vulnerabilidad extrema y el riesgo de mortalidad para esta especie.

Las variables presentadas sirven como ejemplos ilustrativos para entender cómo su modificación puede configurar una alteración de hábitat. Es fundamental comprender que el análisis de una sola variable de forma aislada, sin considerar sus interrelaciones sistémicas, puede inducir a interpretaciones sesgadas. Por ende, se subraya la necesidad de un enfoque holístico que integre la sinergia de los factores, considerando además la severidad acentuada por las proyecciones del cambio climático.

4.1.2. Variables topográficas

De forma análoga a los factores climáticos, las variables topográficas son determinantes en la distribución, crecimiento, estructura y diversidad vegetal¹¹⁶¹¹⁷. Si bien la topografía no experimenta cambios ante modificaciones del paisaje, esta actúa como un modulador crítico que acentúa o mitiga la severidad de los procesos de degradación y los cambios bióticos y microclimáticos. Por ejemplo, el impacto de la remoción de cobertura vegetal difiere significativamente según la pendiente o la exposición. En consecuencia, es imperativo integrar estos factores en la evaluación de la alteración de hábitat, destacándose las siguientes variables:

¹¹¹ Magnitskiy, S. & Plaza, G. Fisiología de semillas recalcitrantes de árboles tropicales. *Agronomía colombiana*, 25(1):96-103.

¹¹² Lyons, J. 1973. Chilling Injury in Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 24(1):445-466.

¹¹³ Rieger, M. 1989. Freeze Protection for Horticultural Crops. *Horticultural Reviews*, 11:45-109.

¹¹⁴ Rallo, M. González, J., Ulloa, I. & Orell, M. 2007. Características macro y microscópicas del guayacán. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 9(1):71-78.

¹¹⁵ Rallo, M., Montecinos, D. & Mundaca, T. 2008. Perforaciones escalariformes en vasos de árboles nativos de Chile. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 10(2):163-172.

¹¹⁶ Zhou, X., Wen, Z. & Wu, S. 2025. How topographic factors regulate vegetation vigor in reservoir drawdown zones with different levels of hydrological disturbances?. *Ecological Indicators*, 178:114006.

¹¹⁷ Gxasheka, M., Sabelo, C. & Dlamini, P. 2023. The role of topographic and soil factors on woody plant encroachment in mountainous rangelands: A mini literature review. *Heliyon*, 9(10):e20615.

- **Pendiente:** Esta variable es crucial, ya que condiciona la disponibilidad hídrica, la calidad edáfica y, por ende, la estructura y diversidad de las formaciones vegetales¹¹⁸¹¹⁹. Ante la remoción de vegetación o cambios en el uso del suelo, un mayor grado de inclinación acentúa la erosión hídrica y la escorrentía superficial, lo que reduce la infiltración de agua y conlleva a la degradación del ecosistema¹²⁰¹²¹.

Adicionalmente, la pérdida de anclaje radicular tras la corta compromete la estabilidad estructural del suelo, incrementando el riesgo de remociones en masa y la mortalidad de individuos remanentes¹²². Estos procesos también generan cambios en la riqueza de especies y pérdidas de carbono del suelo, lo que intensifica los efectos del cambio climático. Por consiguiente, una intervención en zonas planas o de pendientes ligeras tendrá un impacto menos severo en la alteración de hábitat, con la salvedad de las especies pioneras adaptadas a estos sustratos. Esta variable se relaciona estrechamente con la orientación y la longitud de la pendiente, modulando la magnitud de sus efectos.

- **Orientación:** Esta variable presenta una alta correlación con la pendiente y debe analizarse de forma conjunta, ya que actúa como uno de los principales modeladores del microclima local al regular la radiación, la temperatura y la humedad, en consecuencia a la composición y estructura de especies¹²³. En el hemisferio sur, las laderas de exposición norte quedan sometidas a una mayor insolación y estrés térmico, mientras que las de exposición este pueden presentar efectos de «sombra de lluvia»¹²⁴, resultando en condiciones más xéricas que se intensifican tras la remoción de vegetación.

La importancia de esta variable se acentúa con el grado de inclinación del terreno. Por ejemplo, tanto *Porlieria chilensis* como *Citronella mucronata* muestran preferencia por orientaciones sur y oeste (análisis de ocurrencias de las especies). En estas exposiciones, la pérdida de cobertura vegetal puede aumentar la vulnerabilidad ante la velocidad del viento, cuya dirección predominante en Chile suele ser opuesta a estas laderas. No obstante, en orientaciones oeste cercanas al litoral, algunas especies podrían verse beneficiadas por la influencia de la vaguada costera, factor que debe evaluarse de manera específica (pues dependerá la fase en que se encuentre: fría o cálida)¹²⁵.

¹¹⁸ Xue, R., Yang, Q., Miao, F., Wang, X. & Shen, Y. 2018. Slope aspect influences plant biomass, soil properties and microbial composition in alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. Journal of soil science and plant nutrition, 18(1):1-12.

¹¹⁹ The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. Scientific reports, 10:16465

¹²⁰ Brown, C., & Sheu, M. 1975. Effect of deforestation on slopes. Journal Geotechnical Engineering Division (ASCE), 101(2):142-165.

¹²¹ Osman, N., Dorairaj, D., Halim, A., Abu, N., Abdul, M. & Mohd, R. 2021. Dynamics of plant ecology and soil conservation: Implications for cut-slope protection. Acta Oecologica, 111:103744.

¹²² Shi, P., Bai, L., Zhao, Z., Dong, J., Li, Z., Min, Z., Cui, L. & Li, P. 2023. Vegetation position impacts soil carbon losses on the slope of the Loess Plateau of China. Catena, 222:106875.

¹²³ Bhardwaj, D., Tahiry, H., Sharma, P., Pala, N., Kumar, D., Kumar, A. & Bharti. 2021. Influence of aspect and elevational gradient on vegetation Pattern, tree characteristics and ecosystem carbon density in Northwestern Himalayas. Land, 10(11):1109.

¹²⁴ Garreaud, R., Falvey, M. & Montecinos, A. 2016. The geography of the orographic precipitation. Journal of Hydrometeorology, 17(4):1185-1202.

¹²⁵ Garreaud, R. & Rutllant, J. 2003. Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Numerical Simulation of a Typical Case. Monthly Weather Review, 131:891-908

- **Altitud:** Chile posee un marcado gradiente altitudinal que determina una composición florística diversa. Esta variable es crítica para evaluar la alteración de hábitat, dado que los ecosistemas de alta montaña presentan una mayor fragilidad ante perturbaciones. La combinación de cambio climático e intervenciones antrópicas en estas altitudes puede desencadenar impactos no solo a nivel de especie, sino en la estructura de toda la comunidad¹²⁶¹²⁷. Al respecto, la evidencia indica que en las zonas de borde a gran altitud, la tasa de mortalidad de los individuos supera la velocidad de colonización, provocando un declive poblacional acelerado¹²⁸.

En ecosistemas mediterráneos, por ejemplo, la disponibilidad hídrica a 1.000 m.s.n.m. puede duplicar las tasas de transpiración respecto al nivel del mar. Este estrés hídrico induce el cierre estomático y la reducción de la tasa fotosintética, favoreciendo la dominancia de especies con rasgos xeromórficos¹²⁹. En este contexto, mientras las especies adaptadas a condiciones xéricas podrían persistir tras una intervención, *Citronella mucronata* —debido a sus requerimientos hídricos y estructurales— enfrentaría severas limitaciones para su persistencia.

4.1.3. Variables edáficas

La interacción entre el sustrato y la vegetación es dinámica y permanente, siendo el suelo un factor determinante en la nutrición, el crecimiento y el estado fitosanitario de las plantas¹³⁰¹³¹. Existe una amplia gama de variables edáficas interrelacionadas que deben ser examinadas rigurosamente al evaluar la alteración de hábitat. Debido a la estrecha correlación entre estas propiedades físico-químicas, destacan las siguientes variables críticas:

- **Textura del suelo:** Si bien la textura edáfica es una propiedad intrínseca que difícilmente cambia tras una intervención, define la susceptibilidad del sustrato a la compactación, ya sea por el uso de maquinaria pesada o por sobrepastoreo. Estos efectos se acentúan con la remoción de vegetación. Es crucial analizar estas condiciones, dado que *Citronella mucronata* se localiza preferentemente en suelos fracos, arcillo-fracos y arenofrancos en los primeros centímetros de suelo¹³², los cuales son susceptibles a la densificación. *Porlieria chilensis* también se desarrolla en clases texturales similares,

¹²⁶ Wang, Y., Lü, Y., Lü, D., Yin, L. & Wang, X. Climate change and its ecological risks are spatially heterogeneous in high-altitude regions: The case of Qinghai-Tibet plateau. *Catena*, 243:108140.

¹²⁷ Zhai, B., Hu, Z., Sun, S., Tang, Z. & Wang, G. Characteristics of photosynthetic rates in different vegetation types at high-altitude in mountainous regions. *Science of the total environment*, 907:168071.

¹²⁸ Lamprecht, A., Semenchuk, P., Steinbauer, K., Winkler, M. & Pauli, H. Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps. *New Phytologist*, 220(2):447-459.

¹²⁹ Gale, J. 2004. Plants and Altitude - Revisited. *Annals of Botany*, 94(2):199.

¹³⁰ Heinze, J., Gensch, S., Weber, E. & Joshi, J. 2017. Soil temperature modifies effects of soil biota on plant growth. *Journal of Plant Ecology*, 10(5):808-821.

¹³¹ Samaddar, S., Karp, D., Schmidt, R., Devarajan, N., McGarvey, J., Pires, A. & Scow, K. 2021. Role of soil in the regulation of human and plant pathogens: soil' contributions to people. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834):20200179.

¹³² Hengl, T. 2018. Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m. Zenodo, Version v0.2.

aunque ligeramente más gruesas. La evaluación de este riesgo debe realizarse en conjunto con el análisis de la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo¹³³.

- **Densidad aparente:** Esta variable es fundamental para determinar la porosidad del suelo, la cual define la capacidad de almacenamiento y retención de humedad. Asimismo, permite cuantificar el grado de compactación edáfica, factor determinante para el éxito de la germinación, la penetración radicular, la biodisponibilidad de nutrientes y el desarrollo de las plántulas¹³⁴¹³⁵¹³⁶. El impacto de la densidad aparente está estrechamente ligado a la clase textural y al contenido de humedad del sustrato¹³⁷.

Por ejemplo, *Citronella mucronata* habita predominantemente en suelos porosos con altos niveles de materia orgánica y de buen drenaje; por lo tanto, un incremento en la densidad aparente degradaría severamente la calidad de su hábitat. En contraste, aunque *Porlieria chilensis* se localiza ocasionalmente en suelos compactados, esta condición actúa como una barrera crítica para su reclutamiento, tal como demuestran Loayza *et al.* (2015).

- **Biota del suelo:** La actividad de los microorganismos edáficos es fundamental para la salud vegetal y la funcionalidad del ecosistema. Estos organismos regulan el ciclado de nutrientes (biodisponibilidad), mejoran la estructura del sustrato, modulan el pH del suelo y potencian la tolerancia de las plantas al estrés ambiental¹³⁸¹³⁹. Una mayor diversidad microbiana y un incremento en el contenido de carbono orgánico se correlacionan positivamente con esta actividad biológica¹⁴⁰.

Contrariamente, cualquier intervención antrópica genera una disminución de estas variables, reduciendo la actividad microbiótica. Estos cambios, detectables en el corto plazo (anualmente), derivan en un empobrecimiento edáfico y afectan la sanidad vegetal¹⁴¹. Es altamente probable que *Citronella mucronata* sea la especie más afectada, dado que habita ecosistemas de alta diversidad y riqueza orgánica. La susceptibilidad de la biota a la

¹³³ Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y., Tang, A. & Chaplain, V. 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, 105(1):96-103.

¹³⁴ Menary, R. & Krüger, N. 1966. Influence of soil bulk density on nutrition and growth in the tomato. Queensland department of primary industries, division of plant industry bulletin, 23:359-371.

¹³⁵ Goodman, A. & Ennos, A. 1999. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and Maize. *Annals of Botany*, 83(3):293-302.

¹³⁶ Kormanek, M., Banach, J. & Sowa, P. 2014. Effect of soil bulk density on forest tree seedlings. *International Agrophysics*, 29:67-74.

¹³⁷ Yu, C., Mawodza, T., Atkinson, B., Atkinson, J., Sturrock, C., Whalley, R., Hawkesford, M., Cooper, H., Zhang, X., Zhou, H. & Mooney, S. 2024. The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, 29:100838.

¹³⁸ Priyadarshini, P., Singh, K., Nagpure, G., Mansoori, A., Pratap, R., Ahmad, I., Kumar, A. & Singh, J. 2022. Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214:113821.

¹³⁹ Wang, X., Chi, Y. & Song, S. 2024. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-years systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15:1347745.

¹⁴⁰ Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R., Mellado-Vázquez, P., Malik, A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B., Trumbore, S. & Gleixner, G. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6:6707.

¹⁴¹ Fu, X., Yang, F., Wang, J., Di, Y., Dai, X., Zhang, X. & Wang, H. 2015. Understory vegetation leads to changes in soil acidity and in microbial communities 27 years after reforestation. *Science of the total environment*, 502:280-286

intervención compromete la persistencia de las especies que dependen de estos suelos funcionales, aunque la magnitud del impacto dependerá de la severidad y duración de la perturbación.

- **Contenido de humedad del suelo:** Es vital para el transporte de nutrientes, la actividad microbiana y la expansión del sistema radicular. Este recurso es esencial para el ciclo de vida de las plantas, ya que corresponde al agua disponible para ser absorbida por las raíces¹⁴²¹⁴³¹⁴⁴.

Las intervenciones antrópicas pueden disminuir la humedad del suelo. Si bien *Porlieria chilensis* y *Citronella mucronata* poseen adaptaciones a la sequía, es crucial determinar el umbral hídrico letal para sus individuos. La vulnerabilidad es mayor en estadios tempranos: la germinación y la regeneración son altamente sensibles a cambios en el potencial hídrico del suelo. En *C. mucronata*, su semilla recalcitrante puede sufrir una reducción de la viabilidad o un retardo en la germinación ante la desecación. En *P. chilensis*, su escasa regeneración natural bajo el dosel —donde encuentra condiciones hídricas más estables— sugiere una alta susceptibilidad a la pérdida de humedad edáfica en áreas expuestas¹⁴⁵.

- **Disponibilidad de nutrientes:** Los macro y micronutrientes edáficos son esenciales para el crecimiento vegetal, ya que sustentan procesos metabólicos fundamentales como la fotosíntesis y la respiración celular. No obstante, la mayoría de estos elementos presentan una baja solubilidad y una movilidad limitada, lo que suele inducir un estrés nutricional que las plantas mitigan mediante el aumento de su biomasa radicular¹⁴⁶. En consecuencia, cualquier perturbación en el sistema radicular puede resultar letal. Asimismo, la remoción de la vegetación circundante activa procesos de erosión y lixiviación que derivan en la pérdida de nutrientes, degradando el ecosistema y reduciendo drásticamente la fertilidad del sitio, especialmente en terrenos con alta susceptibilidad erosiva¹⁴⁷¹⁴⁸.
- **Cambios en el pH:** La intervención o reducción de la cobertura vegetal genera una acidificación del suelo, con una disminución gradual del pH que puede manifestarse a largo

¹⁴² Dong, W., Wang, G., Sun, J., Guo, L., Chang, R., Wang, W., Wang, Y. & Sun, X. 2024. Plant water source effects on plant-soil feedback for primary succession of terrestrial ecosystems in a glacier region in China. *Science of the total environment*, 927:172269.

¹⁴³ Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Wang, C. & Garg, A. 2019. Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 571:494-502.

¹⁴⁴ Xue, R., Shen, Y. & Marschner, P. 2017. Soil water content during and after plant growth influence nutrient availability and microbial biomass. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(3):702-715.

¹⁴⁵ Evans, C. & Etherington, J. 1990. The effect of soil water potential on seed germination of some British plants. *New Phytologist*, 115:539-548.

¹⁴⁶ Aamir, M., Kumar, A., Nazir, S., Ahmad, M., Jan, S., Rahman, S., Baek, K. & Tasleem, A. 2024. Soil and mineral nutrients in plant health: A prospective study of Iron and phosphorus in the growth and development of plants. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(6):5194-5222.

¹⁴⁷ Xiong, L., Yuan, C., Wu, Q., Fornara, D., Hedenec, P., Chen, S., Peng, Y., Zhao, Z., Wu, F. & Yue, K. Understory vegetation removal significantly affected soil biogeochemical properties in forest ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 193:105132.

¹⁴⁸ Song, Y., Yao, Y., Kong, W., Guo, L., Bao, K., Qiu, L., Shao, M. & Wei, X. 2026. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 396:109992.

plazo (una reducción de una unidad de pH en aproximadamente 30 años)¹⁴⁹¹⁵⁰. Este proceso tiene consecuencias directas en la composición de especies y su regeneración. *Porlieria chilensis*, por ejemplo, prospera en suelos neutros a moderadamente ácidos, siendo rara su presencia en condiciones francamente ácidas, donde una disminución del pH comprometería la germinación y la absorción de nutrientes.

En contraste, *Citronella mucronata* habita suelos neutros a ácidos (pH 5,5 a 6,0 en el horizonte superficial¹⁵¹). Aunque podría tolerar una mayor acidificación, existe la posibilidad de que se superen sus umbrales de tolerancia, afectando la viabilidad de sus semillas, un aspecto para el cual no existe evidencia concluyente. Dado que estos efectos son graduales y no son evaluables en el corto plazo, es crucial un análisis holístico que integre la disponibilidad de nutrientes y el contenido de humedad. Solo mediante la evaluación conjunta de estas variables se podrá determinar la severidad o insignificancia de los cambios nutricionales y su impacto real en la supervivencia y reproducción de los individuos. Considerando que esa variable puede generar que los nutrientes esenciales en el suelo no estén disponibles para las plantas¹⁵².

Es fundamental precisar que las variaciones en los factores ambientales y las condiciones de sitio actúan de manera simultánea sobre los individuos, y no de forma aislada como se evalúa actualmente en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Si bien una variable por sí sola podría no inducir mortalidad o inhibición reproductiva, la reducción del vigor biológico, sumada a la sinergia de cambios en el entorno, puede derivar en la pérdida de individuos o en la inviabilidad de su reproducción. Por el contrario, dependiendo de la condición base y la magnitud de la perturbación, estas modificaciones también podrían resultar beneficiosas para la especie, lo que refuerza la necesidad de un análisis integral y no estanco.

4.2. Ambiente biótico

Las interacciones bióticas —que incluyen la dispersión, la polinización, el parasitismo, la competencia y las relaciones de facilitación con otros taxones vegetales o fúngicos— constituyen el núcleo funcional de la comunidad y son determinantes para la persistencia de las plantas. No obstante, tal como señalan académicos y expertos, existe una complejidad intrínseca en su análisis dentro del marco de los proyectos de inversión. A pesar de estos desafíos metodológicos, el estudio de estas interacciones es indispensable para comprender de manera integral la alteración de hábitat y la estabilidad del ecosistema.

¹⁴⁹ Fu, X., Yang, F., Wang, J., Di, Y., Dai, X., Zhang, X. & Wang, H. 2015. Understory vegetation leads to changes in soil acidity and in microbial communities 27 years after reforestation. *Science of the total environment*, 502:280-286

¹⁵⁰ Hong, S., Piao, S., Chen, A., Liu, Y., Liu, L., Peng, S., Sardans, J., Sun, Y., Peñuelas, J. & Zeng, H. 2018. Afforestation neutralizes soil pH. *Nature Communications*, 9:520.

¹⁵¹ Hengl, T. 2018. Soil pH in H2O at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (Version v02) [pH del suelo en H2O a 6 profundidades estándar (0, 10, 30, 60, 100 y 200 cm) a una resolución de 250 m] [Versión v02] [Conjunto de datos]. Zenodo.

¹⁵² Du, L., Zhang, Z., Chen, Y., Wang, Y., Zhou, C., Yang, H. & Zhang, W. 2024. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 319:109643.

4.2.1. Fauna

Las interacciones mutualistas con la fauna y entomofauna, sumadas a los procesos de parasitismo y depredación, constituyen pilares fundamentales para la biología reproductiva de las plantas. La mayoría de los taxones vegetales dependen de vectores animales para la polinización y la dispersión de semillas, haciendo que estas relaciones sean indispensables para su persistencia. No obstante, la viabilidad de estas poblaciones también se ve condicionada por presiones bióticas como la fitofagia y las plagas, junto con una herbivoría que suele intensificarse por la actividad ganadera y la presencia de lagomorfos. En consecuencia, la intervención de la vegetación y el emplazamiento de infraestructura exigen una evaluación del comportamiento de la fauna asociada, dada la estrecha coevolución entre estos grupos taxonómicos¹⁵³¹⁵⁴.

En el marco de la evaluación ambiental, el análisis del impacto de una intervención sobre la fauna asociada a una especie vegetal presenta una complejidad significativa, debido tanto a las metodologías evaluativas vigentes como a la fragmentación de los datos disponibles. No obstante, este análisis es imperativo para comprender las implicancias reales de la alteración de hábitat. La pérdida de un polinizador o dispersor, así como la interrupción de su interacción con la especie objetivo, genera efectos que solo se manifiestan en el largo plazo. Esta latencia temporal puede derivar en una alteración del hábitat cuyas consecuencias, al no ser inmediatas, corren el riesgo de ser atribuidas erróneamente a factores externos. Es fundamental reconocer que el conocimiento sobre las interacciones biológicas en Chile es limitado y presenta sesgos considerables, lo que dificulta establecer con certeza la red de relaciones y la magnitud de la dependencia entre los taxones involucrados.

La caracterización de las interacciones bióticas para *Porlieria chilensis* revela vacíos críticos. Actualmente, la identificación de sus polinizadores (lepidópteros, himenópteros e incluso picaflores) carece de respaldo empírico robusto. En dispersión, coexisten tesis divergentes: el rol del zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*) como dispersor incidental¹⁵⁵ frente a la hipótesis de ornitocoria por aves no identificadas¹⁵⁶. Esta falta de certeza técnica obliga a un análisis precautorio en la evaluación de impactos.

En contraste, la información sobre *Citronella mucronata* es más precisa gracias a Corvalán *et al.* (2023)¹⁵⁷, quienes identifican polinizadores pertenecientes a los órdenes Coleoptera (*Hylobanaceae binotata*, *Astylus trifasciatus*, *Diontolobus sp.* y *Cerambycidae sp.*), Diptera (*Dilophus sp.*, *Syrphidae sp.* y *Empididae sp.*) e Hymenoptera (*Myrmelachista chilensis*, *Brachymyrmex laevis* y *Trachysphyrus irinus*). Por tanto, la exclusión de estos taxones o la degradación de su hábitat comprometería directamente el éxito reproductivo de la especie. En cuanto a su dispersión, persiste

¹⁵³ Ehrlich, P. & Raven, P. 1964. Butterflies and Plants: A Study in Coevolution. *Evolution*, 18(4), 586-608.

¹⁵⁴ Thompson, J. 1994. The coevolutionary process. University of Chicago Press. 352 p.

¹⁵⁵ Castro, S., Silva, S., Meserve, P., Gutierrez, J., Contreras, L. & Jaksic, F. 1994. Frugivoría y dispersión de semillas de pimiento (*Schinus molle*) por el zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*) en el Parque Nacional Fray Jorge (IV Región, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 67: 169- 176.

¹⁵⁶ León, P., Sandoval, A., Bolados, G., Rosas, M., Stark, D. & Gold, K. 2014. Manual de recolección y procesamiento de semillas de especies forestales. *Boletín INIA* – N° 280.

¹⁵⁷ Corvalán, P., González, V. & Estades, C. 2023. Secretos del Naranjillo: Crecimiento, desarrollo y reproducción en bosques cordilleranos dominados por roble. Primera edición. Andros Impresores. 145 pp.

la incertidumbre; aunque se describe el rol de las aves, se requieren investigaciones adicionales para confirmar vectores específicos, como la posible relación con la torcaza (*Patagioenas araucana*), considerando que otras especies de *Citronella* presentan vínculos estrechos con la familia Columbidae.

Persiste un vacío de información crítico respecto a los polinizadores y dispersores de estas especies, situación que se extiende a la gran mayoría de la flora nativa. La modificación del paisaje puede alterar estas relaciones ecológicas y derivar en la alteración de hábitat, afectando con mayor severidad a taxones con problemas de conservación, bajas densidades poblacionales o alta especialización de nicho.

En contraste, las interacciones de herbivoría y depredación cuentan con mayor respaldo bibliográfico y se asocian, generalmente, a la presencia de fauna exótica invasora como ganado, lagomorfos y roedores (*Rattus spp.*). Estos agentes provocan daños en semillas, frutos y ejemplares en diversos estadios de desarrollo, induciendo competencia y cambios estructurales en el entorno. Este factor es determinante, ya que los individuos remanentes pueden enfrentar una presión selectiva intensificada debido a la reducción de recursos nutricionales para la fauna exótica y a las modificaciones del paisaje que estas mismas especies promueven¹⁵⁸¹⁵⁹.

Resulta prioritario caracterizar las amenazas asociadas a fauna exótica que pongan en riesgo la persistencia de uno o más individuos de la especie objetivo. Esta identificación debe complementarse con un diagnóstico fitosanitario detallado, permitiendo determinar qué ejemplares presentan una mayor vulnerabilidad ante el daño provocado por agentes invasores. Este análisis es clave para prevenir la alteración de hábitat y garantizar la viabilidad de la regeneración natural.

4.2.2. Flora

La interacción entre las especies vegetales y el resto de la biota —basada en mutualismos, competencia, parasitismo y comensalismo— es el motor que define la estructura y composición del ecosistema. Estas relaciones son determinantes para la supervivencia y reproducción de los individuos, influyendo directamente en la estabilidad del hábitat y en su vulnerabilidad ante la colonización de especies exóticas¹⁶⁰.

La persistencia de *Porlieria chilensis* y *Citronella mucronata* está condicionada por su entorno biótico. El guayacán requiere de efectos de facilitación bajo el dosel de especies nodrizas para su regeneración en ambientes xéricos¹⁶¹¹⁶², mientras que *C. mucronata* presenta una codependencia

¹⁵⁸ Cruz, E., Becerra, C., Lara, A., Nimpsh, J. & Woelf, S. 2016. Impacto de la ganadería y la tala sobre los bosques nativos de conservación y el servicio ecosistémico de calidad de agua a escala de cuencas. Proyecto del Fondo Investigación Bosque Nativo 020/2016. 97 p.

¹⁵⁹ Morales, M. 2006. Análisis de la degradación de la cobertura vegetacional nativa en la cuenca superior del río Palena. Chiloé continental. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía. Universidad de Chile. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. 276 p.

¹⁶⁰ Trevenen, E., Veneklaas, E., Teste, F., Dobrowolski, M., Mucina, L. & Renton, M. 2024. Plant interactions can lead to emergent relationships between plant community diversity, productivity and vulnerability to invasion. *Scientific reports*, 14:13932.

¹⁶¹ Luebert, F. & Pliscott, P. 2018. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial universitaria. 384 p.

¹⁶² Gutiérrez, J., Meserve, P., Contreras, L. Vásquez, H. & Jaksic, F. 1993. Spatial distribution of soil nutrients and ephemeral plants underneath and outside the canopy of *Porlieria chilensis* shrubs (Zygophyllaceae) in arid coastal Chile. *Oecologia*, 95:347-352

con diversas especies del bosque esclerófilo y templado¹⁶³¹⁶⁴. La degradación de la matriz vegetal circundante altera estas relaciones simbióticas y facilita la entrada de especies invasoras (*Genista*, *Rubus*, *Acacia spp.*, *Pinus spp.*, etc.), las cuales compiten agresivamente por recursos críticos, que junto a especies exóticas invasoras herbáceas, pueden llegar a impedir la germinación de especies arbóreas o generar mortalidad de estas¹⁶⁵¹⁶⁶¹⁶⁷¹⁶⁸.

Mientras que especies pioneras como *Nothofagus dombeyi* poseen estrategias adaptativas que les permiten prosperar en ambientes perturbados¹⁶⁹, *P. chilensis* y *C. mucronata* carecen de dicha plasticidad frente a la competencia exótica. Es imperativo considerar que la estabilidad del hábitat frente a invasiones biológicas es menor en ecosistemas de baja productividad (Trevenen *et al.*, 2024). Por tanto, la identificación de la alteración de hábitat debe considerar el desplazamiento competitivo a largo plazo, donde el cambio en las condiciones de sitio puede favorecer la dominancia de taxones generalistas en desmedro de las especies de interés.

4.2.3. Hongos

El rol de los hongos simbióticos en la funcionalidad y salud de los ecosistemas es crítico¹⁷⁰, dado que la vasta mayoría de las especies vegetales dependen de asociaciones endofíticas y micorrícicas para subsistir bajo presiones ambientales¹⁷¹¹⁷². Estos simbiontes mutualistas optimizan la adquisición de nutrientes, el crecimiento y la resiliencia frente al estrés hídrico, metales pesados, herbivoría y fitopatógenos¹⁷³¹⁷⁴¹⁷⁵¹⁷⁶¹⁷⁷. No obstante, la alteración del paisaje puede desplazar a estas

¹⁶³ Corvalán, P., Galleguillos, M. & Hernández, J. 2014. Presencia, abundancia y asociatividad de *Citrinella mucronata* en bosques secundarios de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile. Bosque, 35(3):269-278.

¹⁶⁴ Corvalán, P., Galleguillos, M. & Hernández, J. 2014. Presencia, abundancia y asociatividad de *Citrinella mucronata* en bosques secundarios de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile. Bosque, 35(3):269-278.

¹⁶⁵ Stinson, K., Campbell, S., Powell, J., Wolfe, B., Callaway, R., Thelsen, G., Hallett, S., Prati, D. & Klironomos, J. 2006. Invasive Plant Suppresses the Growth of Native Tree Seedlings by Disrupting Belowground Mutualisms. PLOS Biology 12(2): e1001817

¹⁶⁶ Ammondt, S. & Litton, C. 2012. Competition between native Hawaiian plants and the invasive grass *Megathyrsus maximus*: implications of functional diversity for ecological restoration. Restoration Ecology, 20: 638–646.

¹⁶⁷ Galaz García, C., & Tello-Castillo, J. 2025. A theoretical model of plant species competition: The case of invasive plant species in the Mediterranean Basin. Ecological Informatics, 92, 103529

¹⁶⁸ Becerra, P., Cavieres, L. & Bustamante, R. 2020. Effect of the invasive exotic herb *Centaurea solstitialis* on plant communities of a semiarid ecosystem. Plant Ecology & Diversity, 13(3-4):267–275

¹⁶⁹ Donoso, P., Gerding, V., Uteau, D., Soto, D., Thiers, O. & Donoso, C. 2007. Efecto de fertilización y cobertura de malezas en el crecimiento inicial y la mortalidad de una plantación de *Nothofagus dombeyi* en la Cordillera de los Andes. Bosque, 28(3):249-255.

¹⁷⁰ Read, D. 1999. Mycorrhiza – the state of the art. In: A Varma, B Hock, ed. *Mycorrhiza*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 3–34.

¹⁷¹ Bonfante, P. & Genre, A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. Nature Communications, 48:1-11.

¹⁷² Petrini, O. 1986. Taxonomy of endophytic fungi of aerial plant tissues. In: NJJ Fokkema, J Van Den Heuvel, eds. *Microbiology of the phyllosphere*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 175–187.

¹⁷³ Bacon CW & Hill NS. 1996. Symptomless grass endophytes: products of coevolutionary symbioses and their role in the ecological adaptations of grasses. In: SC Redkin, LM Carris, eds. *Endophytic fungi in grasses and woody plants*. St. Paul, MN, USA: APS Press, 155–178.

¹⁷⁴ Varma, A., Verma, S., Sudha, A., Sahay, N., Butehorn, B. & Franken, P. 1999. *Piriformospora indica*, a cultivable plant-growth-promoting root endophyte. Applied and Environmental Microbiology 65: 2741–2744.

¹⁷⁵ Latch, G. 1993. Physiological interactions of endophytic fungi and their hosts. Biotic stress tolerance imparted to grasses by endophytes. Agriculture, Ecosystems and Environment 44: 143–156.

comunidades fúngicas beneficiosas o favorecer la proliferación de hongos parásitos, los cuales reducen las tasas de fecundidad e incrementan la mortalidad¹⁷⁸.

Aunque los antecedentes para *Citronella mucronata* y *Porlieria chilensis* son limitados, su dependencia micorrícica es una realidad biológica. Orlando (2021)¹⁷⁹ demostró que la composición de hongos ectomicorrícicos varía significativamente según el grado de perturbación del sitio. En ecosistemas áridos, se ha observado que las asociaciones fúngicas subterráneas son determinantes para la eficiencia en la captación de recursos, lo es relevante al considerar la presencia de *Porlieria chilensis* en estos ecosistemas¹⁸⁰. Aun así, son pocas las especies que tienen estudios en este campo, como ocurre con especies del género *Nothofagus spp.*¹⁸¹¹⁸²¹⁸³ (mayormente en Argentina). Respecto a la patología, ejemplares debilitados de *C. mucronata* presentan susceptibilidad a hongos del género *Capnodium sp.*¹⁸⁴ (fumagina), lo que deriva en una reducción de la tasa fotosintética y abscisión de estructuras reproductivas.

Aún cuando este grupo taxonómico es relevante en el contexto de alteración de hábitat, debido a la escasa investigación, es difícil evaluar esto en el contexto de la evaluación de la continuidad de una especie en la cuenca. Sin embargo, se puede establecer una relación con el estado fitosanitario de los individuos de las ECC, pues individuos con un peor estado fitosanitario serán más susceptibles a estos cambios y al ataque de patógenos. Por otra parte, la identificación de estas especies que pueden mermar la salud de los individuos de interés en las Líneas de Base de Hongos del EIA es algo que se debe destacar y considerar ante una potencial alteración de hábitat, cuando corresponda.

4.3. Conclusiones

La evaluación integral de estas variables presenta una alta complejidad, exacerbada por la falta de investigación científica sobre ciertas relaciones ecológicas y las limitaciones en la tramitación de permisos sectoriales. Por ello, es imperativo identificar factores clave de fácil medición —como el estado fitosanitario, los agentes de degradación y las variables topográficas— que permitan analizar

¹⁷⁶ Redman, S., Freeman, S., Clifton, D., Morrel, J., Brown, G. & Rodriguez, R. 1999. Biochemical analysis of plant protection afforded by a nonpathogenic endophytic mutant of *Colletotrichum magna*. *Plant Physiology* 119: 795–804.

¹⁷⁷ Dance, A. 2017. Inner Workings: Special relationship between fungi and plants may have spurred changes to ancient climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(46):12089-12091.

¹⁷⁸ Redman, R., Dunigan, D. & Rodríguez, R. 2001. Fungal symbiosis from mutualism to parasitism: who controls the outcome, host or invader?. *New Phytologist*, 151(3):705-716.

¹⁷⁹ Orlando, J. 2021. Efecto de la alteración del hábitat sobre los hongos ectomicorrícicos de *Nothofagus macrocarpa* y su posible rol en la regeneración de la especie. XII Concurso del Fondo de Investigación del Bosque Nativo.

¹⁸⁰ Delpiano, C., Ríos, R., Barraza-Zepeda, C., Pozo, M., Aguilera, L. & Loayza, A. 2025. Arbuscular mycorrhizal colonization defines root ecological strategies in a extreme arid environment. *Frontiers Plant Science*, 15:1488383.

¹⁸¹ Fernández, N. 2012. Micorrizas y levaduras asociadas a *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. Et Mil. (Raulí) en poblaciones naturales y en plantas cultivadas en vivero. Trabajo de Tesis para optar al título de Doctora en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Comahue, Centro Regional Universitario Bariloche. 221 p.

¹⁸² Godoy, R. & Palfner, G. 1997. Ectomicorrizas en *Nothofagus alpina* (P. et E.) Oerst. y *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst. Del sur de Chile. *Boletín Micológico*, 12, 55-61.

¹⁸³ Moguilevsky, D. 2024. Micorrizas y comunidades vegetales en bosques de *Nothofagus pumilio* afectados por la erupción del complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle. Trabajo de Tesis para optar al Título de Doctora en Biología, Universidad Nacional del Comahue, Centro Regional Universitario Bariloche. 228 p.

¹⁸⁴ Echeverría, C. & Rodríguez, R. 2014. Caracterización de *Eulychnia glutinosa*, *Citronella mucronata*, *Prumnopitys andina* y *Orites myrtoidea* según los criterios UICN. Informe Final Fondo de Investigación del Bosque Nativo. 75 p.

el ecosistema de manera agregada y otorguen mayor certeza técnica a la determinación de la alteración de hábitat.

Una correcta evaluación exige el desarrollo de modelos para calcular la distancia de alteración de hábitat incorporando una proporción significativa de estas variables, priorizando aquellas de carácter sistémico (e.g., pisos vegetacionales o regímenes de sombra) para evitar redundancias por correlación. Este enfoque reduciría los errores de estimación y establecería estándares representativos para la gestión de especies y la propuesta de medidas de continuidad. No obstante, requiere un gran esfuerzo de muestreo (espacial y temporal), que sea representativo y de sentido biológico. Sin perjuicio de lo anterior, cuando sea pertinente los profesionales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) conservan la facultad de revisar componentes adicionales de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en caso de ser necesario y proporcionen información con potencial impacto en la especie de interés.

5. Variables y criterios de alteración de hábitat de Bosques Nativos de Preservación (BNP)

El objetivo fundamental de esta propuesta es establecer un marco de acción técnico para la evaluación de la alteración de hábitat en bosques nativos de preservación, optimizando los procesos de revisión de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y la elaboración de antecedentes por parte de los titulares de proyectos.

Los criterios se categorizan en variables que permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de la alteración de hábitat y en variables que permiten evaluar magnitud la magnitud de este fenómeno; si bien se presentan de forma diferenciada, ambas dimensiones se encuentran intrínsecamente correlacionadas. La metodología aborda primero variables generales aplicables a diversas especies, para luego profundizar en factores específicos y recomendaciones técnicas para *Citronella mucronata* y *Porlieria chilensis*. Dado que estas variables suelen actuar de manera simultánea sobre la vegetación remanente, el análisis individual debe integrarse obligatoriamente en una evaluación de respuesta conjunta.

Finalmente, la **fragilidad ecosistémica** se reconoce como un factor determinante, ya que ecosistemas con **baja resiliencia y limitada capacidad de recuperación son significativamente más vulnerables ante perturbaciones antrópicas**¹⁸⁵. Es decir, la probabilidad de ocurrencia y magnitud de la alteración de hábitat aumenta considerablemente en estos ecosistemas y debe ser evaluada e identificada.

5.1. Variables y criterios que permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de la alteración de hábitat

Estas variables y criterios permiten evaluar la probabilidad de alteración de hábitat, proporcionando fundamentos técnicos sobre la respuesta de las especies y el ecosistema ante las modificaciones del paisaje en los Bosques Nativos de Preservación (BNP) remanentes. Cabe destacar que el modelo prioriza variables cuya obtención no exige mediciones adicionales a las estandarizadas en los procesos actuales, facilitando su implementación. No obstante, para una determinación precisa, es imperativo analizar cada criterio de forma integral, dado que las perturbaciones actúan de manera sinérgica sobre la estabilidad del sistema.

5.1.1. Descripción de la autoecología de la especie y dinámica de sus bosques

La autoecología y la dinámica forestal son pilares fundamentales para proyectar la respuesta de la vegetación ante la alteración de hábitat¹⁸⁶¹⁸⁷¹⁸⁸. Comprender cómo una modificación del paisaje

¹⁸⁵ Nilsson, C. & Grelsson, G. 1995. The Fragility of Ecosystems: A Review. *Journal of Applied Ecology*, 32(4):677-692

¹⁸⁶ Morris, D. 2024. Adaptive responses to habitat change: Theory and tests with field experiments. *Ecology*, 105(7):e4333

¹⁸⁷ Astigarraga, J., Calatayud, J., Ruiz-Benito, P., Madrigal-González, J., Tijerín-Triviño, J., Zavala, M., Andivia, E. & Herrero, A. 2025. Forest structural diversity modulates tree growth synchrony in response to climate change. *Forest Ecology and Management*, 579:122505

¹⁸⁸ Wu, D., Vannest, M. & Moran, E. 2025. Evolution of climate responses could alter forest dynamics under climate change even over short time-spans. *Ecological Modelling*, 510:111348.

antrópica mimetiza o se desvía de los regímenes de perturbación natural (magnitud y frecuencia) permite evaluar la viabilidad de las especies en categoría de conservación. Este análisis integra etapas sucesionales, tasas de crecimiento, mortalidad y reclutamiento.

En este contexto, es imperativo caracterizar a nivel de especie:

- **Rasgos funcionales:** Tolerancia a la sombra (tolerante, semitolerante o intolerante), posición sucesional (temprana o tardía) y tasas de crecimiento.
- **Requerimientos de sitio:** Preferencias edafoclimáticas y topográficas.
- **Biología reproductiva:** Morfología del fruto, fisiología de la semilla (ortodoxa o recalcitrante), síndromes de dispersión, tipos de latencia de semillas y requerimientos de germinación.
- **Estructura poblacional:** Patrones de distribución espacial derivados del censo en los Bosques Nativos de Preservación (BNP).

A nivel de comunidad y dinámica ecosistémica, se debe determinar:

- **Interacciones y estructura:** Asociaciones vegetales, especies dominantes del bosque y factores limitantes que regulan la competencia (luz, agua, nutrientes).
- **Procesos sucesionales:** Dinámica sucesional y de perturbaciones naturales, junto al piso bioclimático (comunidades zonales o intrazonales¹⁸⁹), empleando cartografía actualizada.
- **Ecosistema:** Fragilidad (eg: humedales, zonas de alta montaña, relictos, algunos sistemas de fondos de quebrada, etc.)

Esta base técnica, sustentada en autores como Lara *et al.* (2014)¹⁹⁰, McCook (1994)¹⁹¹, Clements (1916)¹⁹², Connell y Slatyer (1977)¹⁹³ y Rodríguez y Sterling (2020)¹⁹⁴, es esencial para diagnosticar la vulnerabilidad de las especies frente a modificaciones de paisaje y a la alteración de hábitat. Junto con la revisión de variables de importancia, al considerar cómo podría cambiar el bosque ante perturbaciones antrópicas.

Los criterios para determinar la ocurrencia de alteración de hábitat en este ítem se basan en rasgos autoecológicos clave: fisiología de la semilla (latencia y tipo), velocidad de crecimiento,

¹⁸⁹ Luebert, F. & Pliscoff, P. 2018. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial universitaria. 384 p.

¹⁹⁰ Lara, A., Amoroso, M., Bannister, J. & González, M. 2014. Sucesión y Dinámica de bosques templados en Chile. Capítulo 11. En Libro: Ecología Forestal. Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile. Primera edición. 323-410 pp.

¹⁹¹ McCook, L. 1994. Understanding ecological community succession: causal models and theories, a review. *Vegetatio*, 110(2):115-147

¹⁹² Clements, F. 1916. Plant succession. An analysis of the development of vegetation. Carnegie Institution of Washington. No. 242. 512 p.

¹⁹³ Connell, J. & Slatyer, R. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist*, 111(982):1119-1144

¹⁹⁴ Rodríguez, C. & Sterling, A. 2020. Sucesión ecológica y restauración en paisajes fragmentados de la Amazonía colombiana. Tomo 1. Composición, estructura y función en la sucesión secundaria. Instituto amazónico de Investigaciones Científicas. SINCHI. 240 p.

requerimientos lumínicos y posición sucesional. Estas variables, que permiten clasificar la sensibilidad de la especie, se presentan en el Cuadro 1 como indicadores de un aumento potencial del riesgo.

Cuadro 1. Variables que generan aumento de la probabilidad de ocurrencia de alteración de hábitat.

Variable	Tipos que aumentan la probabilidad de ocurrencia de alteración de hábitat
Latencia de la semilla	Exógena
Tipo de semilla	Recalcitrante
Tasa de crecimiento	Lenta
Tolerancia a la sombra	Tolerante
Sucesión	Especie tardía
Ecosistema	Frágil

No obstante, el resto de los antecedentes mencionados resultan fundamentales para determinar la ocurrencia del impacto, debiendo ser analizados de forma sistémica. Un factor crítico es la relación entre la dinámica de perturbaciones naturales del bosque y la tipología de la intervención propuesta, considerando tanto su magnitud como su grado de divergencia respecto a los disturbios históricos del ecosistema.

5.1.2. Identificación de las causas de sus problemas de conservación

En primer lugar, es necesario identificar cual es el estado de conservación de la especie, lo que es realizado en la “*Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal*”, en función de lo cual se deben identificar los principales problemas de conservación de la especie. Este análisis requiere identificar los factores históricos y contemporáneos que han condicionado su vulnerabilidad, evaluando si las acciones previstas por el proyecto coinciden con las amenazas documentadas para el taxón. Para ello, se debe contrastar la ficha de clasificación oficial con una revisión bibliográfica actualizada y un análisis de la dinámica de uso de suelo en la cuenca de estudio en un horizonte de 10 a 20 años.

En el escenario de que las faenas del proyecto sean reconocidas como causas de deterioro para la especie, se debe establecer una alta probabilidad de alteración de hábitat. Esto se fundamenta en la relación causal comprobada entre dichas actividades y el declive poblacional o aumento de la mortalidad histórica de la especie en cuestión.

5.1.3. Fragmentación de hábitat

Es importante identificar el nivel de fragmentación generada en el hábitat de bosque nativo de preservación, en un contexto con y sin proyecto. Para lo que se proponen diferentes métricas de importancia, que buscan reemplazar y dar respuesta a los problemas en la evaluación que presentan las métricas presentes en la “*Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283 sobre recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal*”. Los indicadores actuales de dicha guía presentan limitaciones críticas que invisibilizan la pérdida de parches completos; por ejemplo, la eliminación integral de un fragmento se traduce paradójicamente en la categoría “No

hay aumento del número de fragmentos" (valoración 8), omitiendo que la desaparición total de un parche puede ser ambientalmente más significativa que la subdivisión de otros. Esta distorsión puede también afectar el cálculo del área promedio, al excluir del denominador el parche eliminado en la situación post-proyecto.

Bajo el esquema actual, si una especie no se encuentra en Peligro Crítico (CR), la remoción de un parche completo podría cumplir siempre con los requisitos de autorización excepcional del artículo 19 de la Ley 20.283 debido a la artificialidad de las medias simples. Por esta razón se plantean **métricas más robustas considerando que los procesos ecológicos en los bosques (movimiento de fauna, flujo genético, dinámica de incendios, dispersión, etc.) rara vez responden al "parche promedio"**, sino que responden a la conectividad general de la red de hábitat y al área total disponible. Estas métricas capturan la configuración espacial del hábitat con mayor rigor que los promedios aritméticos. De acuerdo a esto, se plantean diferentes métricas presentes en el Cuadro 2, que guardan directa relación con las variables mencionadas en la *"Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283 sobre recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal"*¹⁹⁵¹⁹⁶¹⁹⁷¹⁹⁸¹⁹⁹.

La evaluación de la alteración de hábitat por fragmentación se realizará mediante la valoración ponderada de un conjunto de métricas (Cuadro 2). Estos indicadores, consideran variables clave como el tamaño de malla efectivo, la conectividad integral, la dimensión fractal ponderada por área, la densidad del borde y la distancia euclíadiana al vecino más próximo. Se mantienen además, como parámetros esenciales, la superficie total del bosque y el área de núcleo total, permitiendo un análisis multidimensional del impacto.

Cuadro 2. Valoración de la fragmentación del paisaje como vector de la alteración de hábitat por medio de métricas de paisaje.

Nº	Parámetro	Categorías	Valoración
1	Conectividad	Reducción del tamaño de malla efectivo e Índice de Conectividad Integral >5%	1
		Reducción del tamaño de malla efectivo e Índice de Conectividad Integral >1% y <5%	2
		Reducción del tamaño de malla efectivo e Índice de Conectividad Integral <1%	3
		No hay reducción del tamaño de malla efectivo, ni en el Índice de Conectividad Integral	4
2	Superficie total clase bosque	Reducción de la superficie total de clase bosque >5%	1
		Reducción de la superficie total clase bosque >1% - <5%	2
		Reducción de la superficie total clase bosque <1%	3

¹⁹⁵ McGarigal, K., Cushman, S., & Ene, E. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps.

¹⁹⁶ Turner, M.. & Gardner, R. 2015. Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process, Second Edition. Springer. 482 p.

¹⁹⁷ Tischendorf, L. & Fahrig, L. 2000. How should we measure landscape connectivity? Methods for studying landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15: 633-641

¹⁹⁸ Jaeger, J. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology* 15: 115-130.

¹⁹⁹ Almeida, B., Cabral, P., Fonseca, C., Gil, A. & Scemama, P. 2024. Top 10+1 indicators for assessing forest ecosystem conditions: A five-decade fragmentation analysis. *Science of The Total Environment*, 957:177527.

Nº	Parámetro	Categorías	Valoración
3	Complejidad de Forma y Exposición de Borde	No hay reducción de la superficie total clase bosque	4
		Aumento de la Dimensión Fractal Ponderada por Área y densidad de borde >5%	1
		Aumento de la Dimensión Fractal Ponderada por Área y densidad de borde >1% y <5%	2
		Aumento de la Dimensión Fractal Ponderada por Área y densidad de borde <1%	3
		No hay aumento de la Dimensión Fractal Ponderada por Área, ni de la densidad de borde.	4
4	Área núcleo total	Reducción del área núcleo >5%	1
		Reducción del área núcleo >1% - <5%	2
		Reducción del área núcleo <1%	3
		No hay reducción del área núcleo	4
5	Distancia euclíadiana al vecino más cercano	Aumento de la Distancia euclíadiana al vecino más cercano >5%	1
		Aumento de la Distancia euclíadiana al vecino más cercano >1% y <5%	2
		Aumento de la Distancia euclíadiana al vecino más cercano <1%	3
		No hay aumento de Distancia euclíadiana al vecino más cercano	4

Los valores de las métricas y la base de datos utilizada para los escenarios con y sin proyecto deben adjuntarse íntegramente, especificando el software y/o extensiones empleadas para el cálculo de los índices de paisaje (e.g., Fragstats, GuidosToolbox, Conefor, SIG, lconnect, etc.).

La probabilidad de ocurrencia de alteración de hábitat por fragmentación se determinará mediante una ponderación de 0.5, siguiendo el factor de escala espacial establecido en la Guía de excepcionalidad del Artículo 19 de la Ley N.º 20.283. Según el Cuadro 3, la sumatoria resultante definirá el nivel de riesgo: puntuaciones entre 2.5 y 7.5 indican una alta probabilidad de alteración, mientras que valores entre 7.5 y 10 señalan una probabilidad baja

Cuadro 3. Determinación de la probabilidad de alteración debido a la fragmentación de hábitat generada, de acuerdo con la sumatoria de la valoración ponderada de las métricas de paisaje.

Valoración	Probabilidad de alteración de hábitat
2.5 – 7.5	Alta
7.5 – 10	Baja

Excepcionalmente, si cualquier parámetro alcanza una valoración de 1, se determinará una alta probabilidad de alteración de hábitat, con especial énfasis en indicadores críticos como la “superficie total clase bosque”, “índice de conectividad integral” y “tamaño de malla efectivo”. Por el contrario, si todos los parámetros obtienen su valoración máxima, es posible descartar la alteración por fragmentación; no obstante, la persistencia del hábitat dependerá de las demás variables ambientales analizadas. **Es imperativo caracterizar la permeabilidad de la matriz (permeable, semipermeable o impermeable) e identificar el número de parches y la superficie exacta de los fragmentos eliminados.**

La fragmentación actúa como un vector de degradación que exacerba las invasiones biológicas y la inestabilidad microclimática en los bordes²⁰⁰²⁰¹. Este fenómeno desencadena una pérdida de riqueza específica²⁰² y un efecto en cadena que reduce los servicios ecosistémicos, la resiliencia y la capacidad adaptativa de los bosques²⁰³, incrementando la susceptibilidad ante fitopatógenos y provocando un aumento en la vulnerabilidad a las perturbaciones²⁰⁴. La sinergia entre fragmentación y degradación compromete la funcionalidad del sistema, eleva las tasas de mortalidad y reduce el éxito reproductivo (germinación y reclutamiento), **afectando severamente a taxones especialistas o con problemas de conservación**²⁰⁵²⁰⁶²⁰⁷. No obstante, existen especies que se pueden ver beneficiadas por la fragmentación, que en general corresponden a **especies generalistas o especies intolerantes**²⁰⁸. Finalmente, sería ideal considerar la fragmentación previa y los estados de degradación basal, ya que cualquier intervención acelerará la pérdida de resiliencia del ecosistema.

5.1.4. Raíces

La mayor concentración de biomasa radicular se localiza en los horizontes superficiales del suelo (entre 30 y 90 cm²⁰⁹), zona de máxima actividad microbiológica y acumulación de nutrientes²¹⁰. En consecuencia, cualquier remoción o compactación de estas capas puede comprometer las raíces de anclaje y absorción, resultando potencialmente letal ante modificaciones del paisaje.

Resulta imperativo evaluar la extensión radicular de las especies de interés mediante **respaldo bibliográfico representativo** —que integre variabilidad topográfica, climática, edáfica y cobertura, o donde las condiciones de paisaje sean similares a las de modificación— o a través de **prospecciones locales no destructivas**, como el uso de georradares (GPR) considerando la profundidad del suelo a afectar. Ante la ausencia de estos datos específicos, se deben realizar una

²⁰⁰ Nunes, M., Vaz, M., Campana, J., Laurance, W., de Andrade, A., Vicentini, A., Laurance, S., Raumonen, P., Jackson, T., Zuquim, G., Wu, J., Peñuelas, J., Chave, J. & Maeda, E. 2023. Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forest. *Nature communications*, 14:8129.

²⁰¹ Sun, M., Li, W., Zhu, L., Guo, Z., Zhao, Z., Meng, N., Han, M., Wang, N. & Zhang, X. 2025. Degradation in edge forests caused by forest fragmentation. *Carbon Research*, 4:38

²⁰² Collinge, S. 1996. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning*, 36(1):59-77

²⁰³ Pritham, D. 2023. Conservation strategies and consequences of forest fragmentation on plant biodiversity. *Global Journal of Plant and Soil Science*, 7(3):1-2

²⁰⁴ Kumar, A., Gopal, R., Sabman, S., Kumar, R., Prasad, M., Mahto, D. & Kumari, V. 2025. Impact of forest degradation on the livelihood of forest-dependent communities. En: *Forest Degradation and Management. Forestry Sciences*. Volume 8, Springer, 255-265 pp.

²⁰⁵ Wu, L., Quan, R. & Wang, B. 2024. Forest fragmentation effects on plant-animal interaction do not always show consistent patterns- Evidence from a seed removal experiment of 31 woody species. *Biological Conservation*, 299:110803

²⁰⁶ Heiniken, T. & Weber, E. 2013. Consequences of habitat fragmentation for plant species: Do we know enough?. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 15(4):205-216

²⁰⁷ Tang, C., He, L., Gao, Z. & Zhao, X. 2011. Habitat fragmentation, degradation and population status of endangered *Michelia coriacea* in Southeastern Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, 34:343-350

²⁰⁸ Yan, Y., Jarvie, S., Liu, Q. & Zhang, Q. 2022. Effects of fragmentation on grassland plant diversity depend on the habitat specialization of species. *Biological Conservation*, 275:109773

²⁰⁹ Day, S. & Wiseman, E. 2009. At the root of it. *Arborist news*. 20-22 pp.

²¹⁰ Alfaro, E., Alvarado, A. & Chavarri, A. 2001. Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales de bosque tropical seco en Guanacaste. Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 25(1):7-19

evaluación con sentido precautorio de las raíces, por medio del **diámetro de la copa de los individuos, pues este constituye el principal predictor del crecimiento radicular lateral**²¹¹. Si bien el sistema radicular promedia de 2 a 3 veces el radio de cobertura de copa²¹² o incluso hasta 5 veces, esta proporción es altamente variable: en ecosistemas áridos, las plantas extienden sus raíces entre 5 y 7 veces el radio del dosel para maximizar la captación hídrica²¹³²¹⁴.

Bajo el principio precautorio, y considerando que el **déficit hídrico (sin considerar la especie y su sistema radicular) es el principal modelador del crecimiento radicular**²¹⁵²¹⁶, se sugiere que la estimación de la extensión lateral (en función del radio de copa de los individuos) deba basarse en el grado de aridez del sitio. Ya que en climas áridos, las plantas tienden a tener un mayor crecimiento en ancho y profundidad de raíces²¹⁷. Por lo tanto a medida que los climas se vuelven menos áridos, es esperable una disminución del tamaño del sistema radicular en relación al tamaño de la copa, existiendo una relación con la estacionalidad y el cambio climático²¹⁸. Asimismo, es necesario considerar la humedad del clima y evaluar su temperatura, ya que temperaturas muy frías inhiben o reducen el crecimiento radicular lateral²¹⁹²²⁰.

En evidencia de lo expresado en los párrafos anteriores, se sugiere integrar la clasificación climática de Köppen-Geiger (Sarricolea *et al.*, 2017)²²¹, la precipitación acumulada y los pisos vegetacionales correspondientes en la evaluación. Ya que **esta información permitirá sugerir la extensión radicular lateral de especies de manera precautoria, en función de variables altamente correlacionadas, con el objetivo de evaluar la alteración de hábitat por potencial daño radicular en un contexto de incertidumbre**. En el Cuadro 4 y Figura 1 se plantean ejemplos a considerar para la extensión radicular de especies, donde cada caso debe ser analizado de manera particular considerando estas sugerencias.

²¹¹ Tumber-Dávila, S., Schenk, H., Du, E. & Jackson, R. 2022. Plant sizes and shapes above and belowground and their interactions with climate. *New Phytologist*, 235:1032-1056.

²¹² Gilman, E. 1989. Predicting root spread from trunk diameter and branch spread. *Arboricultural Journal*, 13:25-32.

²¹³ O'Connor, A. & Hammond, E. 2023. Watering Mature Shade Trees. Colorado State University, GardenNotes #657. Extension Master Gardener Program.

²¹⁴ Day, S. & Wiseman, E. 2009. At the root of it. *Arborist news*. 20-22 pp.

²¹⁵ Guswa, A. 2008. The influence of climate on root depth: A carbon cost-benefit analysis. *Water Resources Research*, 44(2):W02427

²¹⁶ Cabezas, R. & Claassen, N. 2017. Sistemas radicales de cultivos: extensión, distribución y crecimiento. *Agro sur*, 45(2):31-45

²¹⁷ Schenk, H. & Jackson, R. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90(3):480-494

²¹⁸ Tumber-Dávila, S., Schenk, H., Du, E. & Jackson, R. 2022. Plant sizes and shapes above and belowground and their interactions with climate. *New Phytologist*, 235:1032-1056.

²¹⁹ Alvarez-Uria, P. & Körner, C. 2007. Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. *Functional Ecology*, 21(2):211-218

²²⁰ Blume-Werry, G., Milbau, A., Teuber, L., Johansson, M. & Dorrepaal, L. 2019. Dwelling in the deep – strongly increased root growth and rooting depth enhance plant interactions with thawing permafrost soil. *New Phytologist*, 223(3):1328-1339

²²¹ Sarricolea, P., Herrera-Osandon, M. & Meseguer-Ruiz, O. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13:2, 66-73

En caso de disponer de valores referenciales (no representativos), como los aportados por Moreno (2007)²²² para *Porlieria chilensis* —quien describe un sistema radicular dimórfico con radios de 7 a 8 metros en ejemplares de 2 metros de altura en el Parque Nacional Fray Jorge—, estos datos pueden emplearse. Estos valores, aunque locales, permiten aproximar la extensión radicular lateral mediante el principio precautorio en zonas climáticas y topográficas análogas.

La zona de estudio se ubica en un área semiárida, donde la relación entre la extensión radicular y el radio de copa oscila entre 4 y 5 veces. Al extrapolar los datos de Moreno (2007), se estima un diámetro de copa máximo coherente con la ecofisiología de la especie y la aridez del sistema. La clasificación climática de Köppen y la formación vegetacional validan esta proporción. No obstante, se requiere un análisis de sitio específico; si la especie se encontrara en los bosques relictos más húmedos del parque, la extensión radicular esperada sería menor. La influencia de la vaguada costera en la formación, por ejemplo, sugiere una extensión conservadora de 4 veces el radio de la copa, cifra que variaría significativamente si la formación se ubicara en la depresión intermedia en la misma latitud, donde la aridez es mayor.

Adicionalmente, se debe ponderar el **rol de la cobertura del dosel en la arquitectura radicular**. Un aumento en la densidad de cobertura intensifica la competencia interespecífica e intraespecífica por recursos edáficos, obligando a los individuos a incrementar su extensión radicular lateral para optimizar la captura de nutrientes y agua²²³²²⁴. En consecuencia, los bosques con mayor cobertura suelen presentar sistemas radiculares más extendidos, factor que debe integrarse rigurosamente en la evaluación de esta variable.

Cuadro 4. Sugerencia precautoria de extensión de raíces en función del radio de la cobertura de copa del individuo de acuerdo con el grado de aridez del clima.

Clima según clasificación Koppen (Sarricolea <i>et al.</i> , 2017)	Extensión de raíces en relación al radio de la cobertura de copa
Clima templado	2-3
Clima mediterráneo	2-4
Clima semiárido	4-5
Clima de tundra	3-4
Clima desértico	5
Clima glacial	2

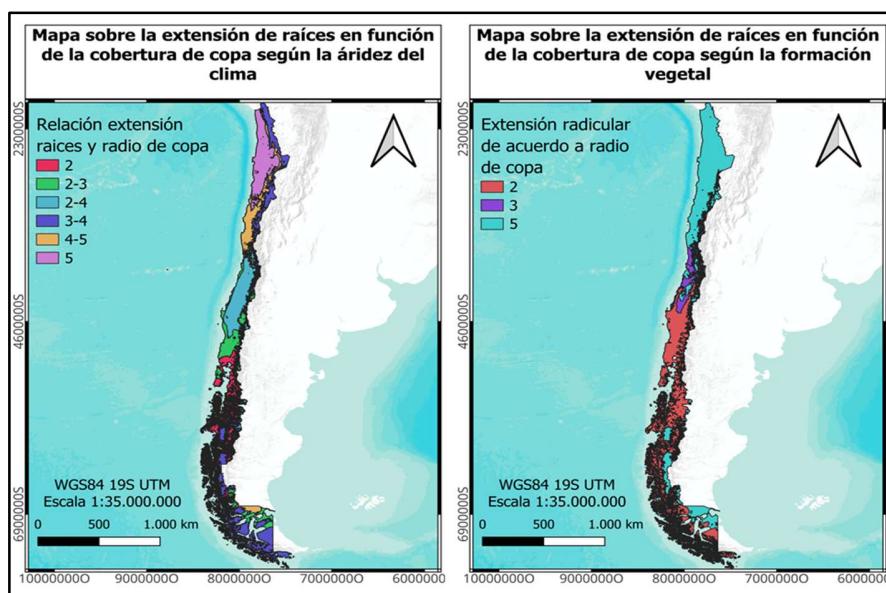
²²² Moreno, M. 2007. Comportamiento fenológico de arbustos dominantes del matorral espinoso en el Parque Nacional Fray Jorge: Importancia de los pulsos de precipitación y la herbivoria. Tesis de Magíster en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias. Universidad de La Serena. 63 p.

²²³ Schenk, J. & Jackson, R. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90(3):480-494

²²⁴ Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K. & Hirano, Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management*, 262(11):2008-2023

En escenarios de vacío de información, se propone un enfoque precautorio para la estimación de la extensión radicular. Este análisis debe ser complementario, integrando la aridez del ecosistema, datos referenciales disponibles y la zonificación fitogeográfica del área de estudio. La combinación de estas variables facilitará un diagnóstico fundado y conservador de la potencial afectación radicular.

Figura 1. Mapa de la extensión radicular lateral en función del radio de copa según aridez del sistema como sugerencia para la estimación de la extensión radicular en un contexto precautorio y de incertidumbre.



Se debe considerar que **la topografía condiciona la arquitectura del sistema radicular**; a mayor pendiente, los árboles desarrollan raíces de mayor diámetro²²⁵ y aumentan su crecimiento en dirección ascendente para optimizar el soporte mecánico y la estabilidad²²⁶. No obstante, en la zona descendente suele presentarse una mayor densidad de raíces finas, especializadas en la captura de agua y nutrientes²²⁷. Ante este escenario, es necesario ajustar la extensión radicular estimada en función del radio de la copa y del grado de inclinación del terreno. Para ello, se proponen los valores de ajuste detallados en el Cuadro 5, los cuales deben integrarse al análisis de aridez del sistema bajo un enfoque precautorio.

²²⁵ Chen, Y.m Qi, Y., Wei, Y., Ning, W. & He, B. 2024. Root traits and soil detachment in response to variable slope gradients in a representative purple-soil sloping grassland. *Catena*, 239:107936.

²²⁶ Shrestha, M., Horiuchi, M., Yamadera, Y. & Miyazaki, T. 2000. The supporting roots of trees and woody plants: form function and physiology. Chapter: A study on the adaptability mechanism of tree roots on steep slopes. Springer-Science, 51-57.

²²⁷ Taufiqurrachman, M., Syafitri, U., Rahman, M., Siregar, I. & Karlinasari, L. 2023. Clarifying the main root distribution of trees in varied slope environments using non-destructive root detection. *Forests*, 14(12):2434.

Cuadro 5. Sugerencia precautoria de extensión de raíces en función del radio de la cobertura de copa del individuo de acuerdo con la magnitud de la pendiente.

Pendiente (%)	Aumento de extensión de raíces de acuerdo al radio de copa
0-5	0
5-15	0.5
15-30	1
>30	2

Las propiedades edáficas son determinantes en la arquitectura del sistema radicular. Factores como la aireación, la humedad y la biodisponibilidad de nutrientes condicionan una expansión lateral óptima²²⁸, procesos que se ven limitados principalmente por la compactación del suelo²²⁹, cuya influencia puede alcanzar hasta un metro de profundidad²³⁰. Para una evaluación precisa, se recomienda la realización de calicatas y ensayos de resistencia a la penetración que permitan cuantificar la magnitud y profundidad de la compactación. En sustratos densificados, se esperaría una reducción de la extensión radicular en relación con el radio de la copa, conforme a los valores de ajuste propuestos en el Cuadro 6. **En ausencia de estos estudios específicos, este factor no podrá ser ponderado para reducir el área de influencia estimada.**

Cuadro 6. Grado de compactación (Murdock *et al.*, 1995)²³¹ y su efecto en la reducción de la extensión lateral de raíces respecto al radio de la copa.

Grado de compactación	Porcentaje de observaciones con penetrómetro iguales o mayores a 300 PSI (%)	Disminución de extensión lateral de raíces de acuerdo al radio de copa
Ninguna	<30	0
Leve	30-50	0
Moderada	50-75	-0.5
Severa	75-100	-1

Si bien la elongación radicular presenta una estrecha correlación con el radio de la copa, es imperativo integrar factores críticos como la aridez, la pendiente y las propiedades edáficas para

²²⁸ Crow, P. 2005. The Influence of Soils and Species on Tree Root Depth. Forestry Commissions. Corstorphine Road, Edinburgh. 8 p.

²²⁹ Tracy, S., Black, C., Roberts, J., Sturrock, C., Mairhofer, S., Craigon, J. & Mooney, S. 2012. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. *Annals of Botany*, 110(2):511-519

²³⁰ Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25, 335–345

²³¹ Murdock, L., Gray, T., Higgins, F. & Weels, K. 1995. Soil compaction in Kentucky. Cooperative Extension Service. University of Kentucky, College of Agriculture. 4p.

delimitar una distancia de seguridad biológica. Estas variables condicionan la validez de la información bibliográfica, **la cual debe ser estrictamente representativa y replicable en el área de estudio**. Aunque los sistemas radiculares de las especies nativas poseen una complejidad estructural difícil de caracterizar mediante criterios generales, estas **directrices constituyen una herramienta técnica fundamental ante la escasez de datos específicos sobre el crecimiento subterráneo de la flora chilena**.

La validez de las referencias bibliográficas para determinar la extensión radicular está supeditada a su **representatividad técnica**. En el caso de *P. chilensis*, los registros de radios de 7 a 8 metros carecen de un análisis sobre la influencia del tipo de suelo, topografía o la aridez, lo que impide su uso como estándar general para todos los proyectos. En consecuencia, el marco metodológico propuesto prevalecerá **hasta que la investigación científica proporcione datos representativos que permitan una evaluación precisa y diferenciada según el contexto geográfico de cada intervención**.

Se proponen estos criterios como valores referenciales bajo el **principio precautorio**, con el fin de facilitar la evaluación de la extensión radicular lateral como **vector de la alteración de hábitat**. Este marco técnico es especialmente relevante en escenarios de incertidumbre derivados de la falta de investigación científica, o ante la decisión institucional o imposibilidad técnica de ejecutar prospecciones radiculares no destructivas en el área de estudio.

5.1.5. Estado fitosanitario

El estado fitosanitario de los ejemplares es un factor determinante en la evaluación de la **alteración de hábitat**, debido a que la fragmentación del paisaje y el efecto de borde inducen una reducción progresiva del vigor y crecimiento vegetal²³². Estas perturbaciones incrementan el **estrés fisiológico, la defoliación y la susceptibilidad ante fitopatógenos**, factores que pueden comprometer la supervivencia de los individuos²³³²³⁴, especialmente de aquellos con una condición basal deficiente.

Con el fin de dotar de objetividad a este análisis, se ha desarrollado un **criterio de evaluación fitosanitaria** (Cuadro 7) basado en indicadores cuantificables de terreno. Esta metodología integra los lineamientos de Carrasco *et al.* (2019)²³⁵, Ramírez y Goycoolea (2006)²³⁶, Sampaio *et al.* (2010)²³⁷, Dobbs *et al.* (2020)²³⁸, Linhares *et al.* (2021)²³⁹, Hernández *et al.* (2022) y Salas (2012)²⁴⁰,

²³² Yang, G., Crowther, T., Lauber, T., Zohner, C. & Smith, G. 2025. A globally consistent negative effect of edge on aboveground forest biomass. *Nature, Ecology & Evolution*, 9:2036-2045

²³³ Sinclair, W. & Hudler, G. 1988. Tree Declines: Four Concepts of Causality. *Arboriculture & Urban Forestry*, 14 (2) 29-35

²³⁴ Franklin, J., Shugart, H. & Harmon, M. 1987. Tree Death as an Ecological Process. The causes, consequences, and variability of tree mortality. *BioScience*, 37(8):550-556

²³⁵ Carrasco, A., Guzmán, J., Ruiz, J. & Rodríguez, S. 2019. Manual de Diagnóstico Fitosanitario. Junta de Andalucía., Comisión de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.131 p.

²³⁶ Ramírez, O. & Goycoolea, C. 2006. La protección fitosanitaria forestal, sus formas de control y el aumento de la presencia de los problemas fitosanitarios forestales en Chile. *INFOR, Ciencia e Investigación Forestal*, 14(2):397-409

²³⁷ Sampaio, A., Duarte, F., Cafofo, E., Domingos, B. & Blums, C. 2010. Avaliacao de árvores de risco na arborizacao de vias públicas de Nova Olímpia, Paraná. *Revista Da Sociedade Brasileira De Arborizacao Urbana*, 5(2):82-104

²³⁸ Dobbs, C., Córdova, C., Olave, M., Olave, M. & Miranda, M. 2020. Informe Final. *Arbolado Urbano como elemento estructurante del paisaje natural urbano*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudios y Fomento Habitacional-DITEC. 114p.

permitiendo un diagnóstico robusto de la salud de los individuos de la especie de interés en el área de estudio.

Estos criterios permiten evaluar diversos tipos de estrés vegetal que derivan en la reducción del potencial fotosintético y del vigor de las plantas. Si bien optimizan la determinación del estado fitosanitario, no sustituyen el uso de herramientas de medición directa del potencial fotosintético, el potencial hídrico o las tasas de crecimiento.

La propuesta aborda la subjetividad inherente a la actual evaluación fitosanitaria, que carece de parámetros estandarizados. Su relevancia en el contexto de alteración de hábitat radica en que los ejemplares debilitados son más susceptibles a la mortalidad. Esta vulnerabilidad se exacerba con la modificación del paisaje inducida por el proyecto, lo que puede resultar en la muerte de los individuos más comprometidos y afectar el vigor del remanente, incrementando su susceptibilidad al ataque de fitopatógenos, herbivoría y estrés ambiental.

Cuadro 7. Criterios de evaluación del estado fitosanitario y sus distintos componentes para individuos de la especie con problemas de conservación a evaluar.

Componente	Variable	Categorías	Valoración
Fuste, copa, corteza y raíces	Forma	Fuste cilíndrico o casi cilíndrico, recto con al menos tres caras libres de nudos	0
		Forma acílindrica, solo con curva suave	0,5
		Sección transversal con concavidades, arqueaduras y torceduras fuertes	1
	Mortalidad de ramas	Sin ramas muertas	0
		Entre 1 a 3 ramas muertas	2
		Más de 3 ramas muertas	4
	Condición de copa	Simétrica	0
		No Simétrica	0
		Cargada	2
		Quebrada	4
	Presencia de raíces superficiales o a la vista	Ausencia	0
		Presencia	3
	Corteza	Corteza firme en fuste	0
		Corteza suelta en el fuste	4
	Daño o corta	No presenta daños ni corta de ramas o	0

²³⁹ Linhares, C., Goncalves, R., Martins, L. & Knapic, S. 2021. Structural Stability of Urban Trees Using Visual and Instrumental Techniques: A Review. *Forest*, 12:1752.

²⁴⁰ Salas, C. 2012. Manual de instrucciones de terreno para remediación de parcelas permanentes. Informe interno No. 01, Proyecto FIBN No. 068/2010. Proyecto de Investigación No. 068/2010 del Fondo de Investigación del Bosque Nativo (FIBN), “Remedición y sistematización de información cuantitativa de parcelas permanentes en bosques de segundo crecimiento de roble, raulí y coigüe”. 20 p.

Componente	Variable	Categorías	Valoración
		vástagos	
		Presenta daños y/o corta de ramas o vástagos	2
		Follaje en copa*	Pérdida de hojas en la copa menor a un 5%
			0
			Pérdida de hojas entre un 5% -20% en la copa
			2
			Pérdida de hojas entre un 20% -40% en la copa
			3
			Pérdida de hojas mayor al 40% en la copa
		Individuos parásitos	No presenta individuos parásitos
			0
		Hojas*	Presencia de especies parásitas sobre el individuo
			2
			Al menos un 80% del follaje presenta hojas turgentes y erectas
		Turgencia	0
			Entre un 50% y un 80% de la copa tiene hojas turgentes y erectas
			2
		Coloración	Un 50% o más de la copa presenta hojas con baja rigidez, de aspecto quebradizo y/o flácidas.
			4
			No presenta coloración de sus hojas o este es menor al 5%
			0
		Presencia hongos, plagas o enfermedades	Entre un 5% y 20% de las hojas presentes en la copa presentan cambios en su coloración
			1
			Entre un 20 y 50% de la copa presenta cambios en la coloración.
		Presencia hongos, plagas o enfermedades	Entre un 20 y 50% de la copa presenta cambios en la coloración.
			2
			Más de un 50% de la copa presenta un cambio en su coloración.
		Presencia hongos, plagas o enfermedades	3
			Ausencia de hongos, insectos o enfermedades que afecten a las plantas
			0
		Presencia de hongos, enfermedades o insectos defoliadores en menos del 5% de la copa	Presencia de hongos, enfermedades o insectos defoliadores en menos del 5% de la copa
			2
		Presencia de hongos, enfermedades o insectos defoliadores en más del 5% de la copa	Presencia de hongos, enfermedades o insectos defoliadores en más del 5% de la copa
			3

Componente	Variable	Categorías	Valoración
		enfermedades o insectos defoliadores entre un 5% a un 25% de la copa	
		Presencia de hongos, enfermedades o insectos defoliadores en más de un 25% de la copa.	5
	Polvo y/o contaminantes en hojas	Ausencia de polvo y/o contaminantes en hoja	0
		Presencia de fina capa de polvo y/o contaminantes que permite ver con claridad la venación secundaria de las hojas	1
	Ramoneo	Presencia de polvo y/o contaminantes que da una tonalidad opaca de la hoja, no se distingue venación secundaria	4
		Ausencia de ramoneo	0
		Ramoneo mayor a 0% y menor al 5% de la copa	2
		Ramoneo entre un 5% y un 25% de la copa	3
		Ramoneo mayor al 25% de la copa	4
Flores y frutos**	Daño en flor y/o fruto	No se presenta daño en flores y/o frutos	0
		Presenta daño en flores y/o frutos menores al 5%	2
		Presenta daño en frutos mayor al 5%	4
	Flores secas sin fecundar	Presenta flores senescentes menor al 5% del total	0
		Presenta senescencia de flores entre un 5 y 25%	2
		La senescencia de flores es mayor al 25%	3

*En el caso particular de las especies caducas o caducas facultativas se debe considerar su evaluación en el período en el que presenten hojas. En caso de que no sea posible sólo se debe valorar el resto de los componentes.

**En caso de que se presente este estado fenológico se podrá evaluar esta condición.

Es así como la sumatoria de todos los componentes determinará el estado fitosanitario de los individuos de la especie de interés como se puede desprender del Cuadro 8.

Cuadro 8. Valoración del estado fitosanitario del individuo.

Estado fitosanitario	Sumatoria de valoración
Muy Bueno	0 a 1
Bueno	>1 a 2
Regular	>2 a 3
Malo	>3 a 7
Muy Malo	>7

Se requiere de la evaluación de todos los componentes para determinar que un individuo tiene un estado fitosanitario muy bueno (con la excepción del componente Flores y frutos cuando no corresponda). No así, para el resto de las clasificaciones.

La presencia de cualquiera de las siguientes condiciones por sí solas en el individuo, determinarán un estado fitosanitario muy malo, independiente del resto de variables:

- Presencia de galerías, perforaciones o muestras de aserrín reciente
- Presencia de chancros
- Mortalidad regresiva
- Sonido hueco del fuste
- Pudrición visible en la base

Esta metodología permite evaluar las variables que inciden en la sanidad vegetal sin requerir instrumentación adicional. En caso de efectuarse mediciones recurrentes, es imperativo realizar un análisis temporal para determinar la evolución del estado fitosanitario de cada ejemplar.

La presencia de individuos categorizados en estado "*malo*" o "*muy malo*" incrementa significativamente la probabilidad de alteración de hábitat, efecto que se puede manifestar en menor medida en ejemplares en estado "*regular*". Esta vulnerabilidad responde al deterioro del vigor y el crecimiento, procesos exacerbados por la fragmentación, la colonización de especies exóticas y el aumento de la presión por herbivoría. Dichos factores, de forma aislada o sinérgica, pueden inducir la mortalidad de cualquier individuo, siendo el riesgo sustancialmente mayor para aquellos con una condición fitosanitaria deficiente, lo cual es consistente con la pérdida de vigor documentada en las zonas de borde

Asimismo, es necesario discernir si la pérdida de un ejemplar responde a su condición fisiológica basal, la cual podría imposibilitar su recuperación independientemente de las acciones del proyecto. Esta **mortalidad natural** podrá preverse cuando los individuos presenten síntomas de **mortalidad regresiva** y cumplan con los siguientes umbrales críticos definidos en el Cuadro 7:

- La variable "*follaje en copa*" alcanza por sí sola su valoración máxima.
- El componente "*hojas*" obtiene una sumatoria de sus variables mayor o igual a 14.

- El componente “*hojas*” presenta una sumatoria mayor o igual a 12, sumado a la valoración máxima en la variable “*presencia de hongos, plagas o enfermedades*”.
- El componente “*Fuste, copa, corteza y raíces*” registra una sumatoria de variables mayor o igual a 17, siempre que la variable “*follaje en copa*” no haya alcanzado su valoración máxima.

Fuera de estos supuestos, no es posible aseverar que el individuo sucumbirá por causas naturales. En tales casos, cualquier declive en el vigor derivado de la modificación del paisaje deberá considerarse como el factor determinante de la mortalidad.

Esta información permitirá dilucidar las causas subyacentes del estado fitosanitario de un ejemplar y su potencial respuesta a la modificación del paisaje, facilitando la proyección de la alteración de hábitat sobre el resto de la población. No obstante, incluso individuos con un estado fitosanitario “*muy bueno*” pueden verse afectados por cambios sistémicos. Por consiguiente, es fundamental realizar un análisis holístico e integrado de todas las variables propuestas para una evaluación rigurosa de la alteración de hábitat.

5.1.6. Presencia de especies exóticas

En general las especies exóticas están bien adaptadas a ambientes modificados antrópicamente y presentan una alta plasticidad fenotípica, lo cual favorece su entrada a ecosistemas modificados antrópicamente²⁴¹¹⁴. En consecuencia, cualquier modificación del paisaje para la implementación de proyectos, propician la entrada de estas especies en el tiempo (flora y fauna). Es conocido que la invasión de especies exóticas implica pérdidas en la biodiversidad²⁴², por desplazamiento, competencia y/o depredación. Guardando relación con la extinción de diferentes especies en el mundo, modificando las redes de interacción en la comunidad y alterando las condiciones del ecosistema invadido²⁴³.

En el contexto de alteración de hábitat pueden generar tanto la muerte como la imposibilidad de reproducción, a través de competencia de recursos, de espacio de polinizadores y dispersores²⁴⁴²⁴⁵. Con lo cual, los aumentos de individuos de especies exóticas, pueden llegar a comprometer la reproducción y sobrevivencia²⁴⁶ de las especies, lo que se puede ver acentuado en las especies con problemas de conservación. De igual manera, gran cantidad de plantas exóticas presentan alelopatías como ocurre con algunas especies del género *Brassica* sp., *Avena* sp., *Erodium* sp.,

²⁴¹ Stavert, J., Pattemore, D., Gaskell, A., Beggs, J. & Bartomeus, I. 2017. Exotic species enhance response diversity to land-use change but modify functional composition. Proceedings of the Royal Society, 284:20170788.

²⁴² Milardi, M., Gavioli, A., Soininen, J. & Castaldelli, G. 2019. Exotic species invasions undermine regional functional diversity of freshwater fish. Scientific Reports, 9:17921.

²⁴³ Castro-Diez, P., Valladares, F. & Alonso, A. 2004. La creciente amenaza de las invasiones biológicas. Ecosistemas, vol. XIII, núm. 3, septiembre-diciembre, 2004, p. 0 Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España.

²⁴⁴ Traveset, A. 2015. Impacto de las especies exóticas sobre las comunidades mediado por interacciones mutualistas. Ecosistemas, 24(1): 67-75

²⁴⁵ Carvallo, G. 2009. Especies exóticas e invasiones biológicas. Ciencia... Ahora, 23:15-21.

²⁴⁶ Cordero, S., Gálvez, S. & Fontúrbel, F. 2023. Ecological Impacts of Exotic Species on Native Seed Dispersal Systems: A Systematic Review. Plants, 12(2):261

Pilosella sp., *Convolvulus arvensis*, *Medicago sativa*, *Sonchus asper*, entre muchas otras²⁴⁷²⁴⁸. Sin mencionar las especies de otros estratos como *Rubus sp.* *Acacia dealbata*, *Ulex sp.*, entre las más frecuentes²⁴⁹. Es decir, hay una presión por la competencia de los recursos, lo cual es muy desfavorable para las especies con problemas de conservación (que generalmente presentan un lento crecimiento), sin mencionar el posible efecto alelopático de las especies exóticas sobre las nativas.

De forma concomitante, la alteración antrópica de los ecosistemas induce una reducción significativa de la diversidad genética de las especies nativas, proceso que se ve exacerbado por la colonización de especies exóticas invasoras²⁵⁰.

Es imperativo señalar que los factores de alteración de hábitat no solo impactan a los ejemplares adultos, sino que afectan críticamente a la regeneración, tanto de origen sexual (plántulas) como asexual. Estas últimas en mayor magnitud dada su limitada plasticidad y menor adaptabilidad ante perturbaciones ambientales²⁵¹, estos estadios tempranos presentan una vulnerabilidad superior frente a las modificaciones del paisaje.

Por otro lado, si bien la presencia de biota exótica puede ser preexistente a la modificación del paisaje, la evidencia científica y el análisis de proyectos confirman que las actividades antropogénicas inducen un incremento sustancial en la riqueza, abundancia y cobertura de estas especies. Por tanto, la existencia previa de taxones exóticos no exonera este factor de su relevancia en la evaluación de impacto; por el contrario, su expansión exponencial tras la perturbación constituye un vector determinante de la degradación del hábitat y la pérdida de aptitud del ecosistema.

Generalmente, las especies exóticas localizadas en las zonas de borde corresponden a taxones registrados en inventarios y líneas base. El foco de la evaluación debe estar en su **capacidad de invasión y sus potenciales efectos alelopáticos**. Es imperativo identificar estos atributos funcionales, ya que aumentan el riesgo de alteración de hábitat al impactar directamente la regeneración natural y la supervivencia de los individuos remanentes.

5.1.7. Material particulado

Los bordes remanentes tienden a actuar como **filtro de los contaminantes generados por las actividades humanas en los hábitats adyacentes**²⁵², lo que puede inducir fluctuaciones en el pH edáfico y alterar las propiedades fisicoquímicas del sustrato, afectando la biodisponibilidad de

²⁴⁷ Fuentes, N., Sánchez, P., Pauchard, A., Urrutia, J., Cavieres, L. & Marticorena, A. 2014. Plantas invasoras del centro-sur de Chile: una guía de campo. Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB), Concepción, Chile.

²⁴⁸ Soumoulo, M. 2021. Estudios preliminares sobre el efecto alelopático de cultivares de Avena y Centeno sobre el establecimiento inicial de malezas anuales. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía. 52 p.

²⁴⁹ Barrera, C. 2015. Efecto alelopático de malezas leñosas invasoras sobre la germinación de hierbas pratenses. Seminario de graduación presentado como parte de los requisitos para optar al Grado de Licenciada en Ciencias Biológicas. Facultad de ciencias, Universidad Austral. 70 p.

²⁵⁰ Leding, T. 1992. Human impacts on genetic diversity in forest ecosystems. OIKOS, 63:87-108.

²⁵¹ Erwin, J. Asexual propagation of bedding plants. Minnesota Commercial Flower Growers Association Bulletin. Serving the floriculture industry in the upper Midwest, 44(1):1-12.

²⁵² Weathers, K., Cadenasso, M. & Pickett, S. 2001. Forest edges as nutrient and pollutant concentrators: potential synergisms between fragmentation, forest canopies, and the atmosphere. Conserv Biol 15:1506–1514

nutrientes²⁵³. Asimismo, la inhibición de la actividad bacteriana heterotrófica compromete las tasas de mineralización y el ciclado de nutrientes²⁵⁴. Paralelamente, la deposición de material particulado sobre el follaje interfiere con la radiación fotosintéticamente activa (PAR), reduciendo la fijación de carbono, el potencial fotosintético y la tasa respiratoria²⁵⁵²⁵⁶. Este estrés crónico puede provocar el declive o la extirpación de poblaciones sensibles, con efectos críticos en la regeneración natural.

Si bien es posible cuantificar el Índice de Tolerancia a la Contaminación Atmosférica (APTI) mediante parámetros bioquímicos foliares —como el pH del extracto, el ácido ascórbico, el contenido relativo de agua y la clorofila total (Bharti et al., 2018)²⁵⁷—, su implementación resulta compleja debido a los requerimientos de laboratorio. No obstante, aunque el APTI define umbrales de resistencia, no considera la pérdida de vigor, la necrosis tisular, ni la disminución en la calidad de la producción reproductiva, factores que incrementan la vulnerabilidad de los individuos ante fitopatógenos²⁵⁸²⁵⁹.

La emisión de material particulado derivada de las faenas y operaciones de un proyecto induce efectos documentados en la **reducción del potencial fotosintético y el éxito reproductivo de la flora**. Estas perturbaciones afectan la fenología floral (aceleración o retraso), la integridad de las anteras, la viabilidad del polen, la interacción polen-pistilo y la productividad de flores y frutos²⁶⁰²⁶¹²⁶². Ante la ausencia de estudios locales en Chile sobre umbrales de toxicidad por material particulado en especies nativas, **resulta imperativo establecer criterios preventivos y sugeridos basados en la evidencia internacional disponible**.

Por consiguiente, **según la magnitud del proyecto y si amerita**, se sugiere realizar una modelación de la dispersión de contaminantes primarios (emitidos directamente por la fuente, sea tráfico, industria, etc. como son el material particulado, CO, NO_x, SO₂, COV_s plomo, con énfasis en los contaminantes presentes en el Cuadro 9). Para ello, se propone el Cuadro 9, el cual presenta valores

²⁵³ Gupta, D, Rai, U, Tripathi, R. & Inouche, M. 2002. Impacts of fly-ash on soil and plant responses, *Journal of Plant Research* 115: 401-409.

²⁵⁴ Arthur, M, Zwick, T, Tolle, D. & Van Voris, P. 1984. Effects of fly ash on microbial CO₂ evolution from an agricultural soil, *Water, Air, and Soil Pollution* 22(2): 209-211.

²⁵⁵ Sealonez, M. 1971. Introducción a un estudio sobre la contaminación atmosférica y su relación con la vegetación, CIHEAM, Options Méditerranées Oct,: 57-62.

²⁵⁶ Sharifi, M, Gibson, A, & Rundel, P. 1997. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs, *Journal of applied Ecology* 837-846.

²⁵⁷ Bharti, S., Trivedi, A. & Kumar, N. 2018. Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. *Urban Climate*, 24:820-829.

²⁵⁸ Moscoso-Vanegas, D., Monroy-Morocho, L., Narváez-Vera, M., Espinoza-Molina, C. & Astudillo-Alemán, A. 2019. Efecto fitotóxico del material particulado PM10 recolectado en el área urbana de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Iteckne*, 16(1):12-20.

²⁵⁹ Anad, P., Mina, U., Khare, M., Kumar, P. & Kota, S. 2022. Air pollution and plant health response-current status and future directions. *Atmospheric Pollution Research*, 13(8):101508.

²⁶⁰ Khan, N., Chatterjee, S., Basak, G., Sarkar, P., Kumar, V., Adit, A. & Barman, C. 2025. Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences. *Plant Stress*, 18:101119

²⁶¹ Dueck, T. 1991. Air pollution and reproductive processes in natural plant species. En: Rozema, J., Verkleij, J.A.C. (eds) *Ecological responses to environmental stresses. Tasks for vegetation science*, Vol 22. Springer. 200-209 pp.

²⁶² Alamilla-Martinez, D., Tenorio-Sánchez, S. & Gomez-Ramírez, M. 2025. Review: Implications of Air Pollution on Trees Located in Urban Areas. *Earth*, 6(2):38

referenciales construidos a partir de los hallazgos de Ruffin *et al.* (1982)²⁶³, Jaconis *et al.* (2017)²⁶⁴ y Khan *et al.* (2025), integrando promedios de concentraciones que impactan negativamente los componentes reproductivos de las especies vegetales.

Cuadro 9. Valores umbrales precautorios de sugerencia para las especies presentes en el bosque nativo construido a partir de valores de concentración de contaminantes en el aire con efectos negativos en la reproducción de diferentes especies ornamentales, agrícolas y rurales.

Contaminantes primarios	Umbrales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
NO ₂	>21.294
CO	>55
SO ₂	>134.762
MP	>166

Estos análisis se pueden llevar a cabo, mediante la modelación de la calidad del aire, para lo cual se pueden emplear **modelos puff, euleriano o gaussianos** (en caso de que corresponda homogeneidad meteorológica y que no existan factores que puedan modificar esta homogeneidad). Para su uso, se recomiendan los modelos eulerianos correspondientes a WRF-Chem²⁶⁵, CAMx²⁶⁶ y CMAQ²⁶⁷, modelos tipo puff CALPUFF²⁶⁸ y modelo gaussiano AERMOD²⁶⁹.

El modelo seleccionado debe acompañarse de la documentación completa que describa los fundamentos conceptuales, ecuaciones matemáticas y los tipos de datos de entrada y de salida junto con sus respectivos formatos. Debe estar escrito en un lenguaje de programación común y de código abierto, presentando la documentación sobre la evaluación de modelo en forma de informes técnicos, publicaciones científicas o equivalente a nivel nacional y contar con desarrollo y soporte técnico actualizado de parte de la comunidad usuaria o desarrolladores.

²⁶³ Ruffin, J., Williams, D., Banerjee, U. & Pinnix, K. 1982. The effects of some environmental gaseous pollutants on pollen-wall proteins of certain airborne pollen grains: a preliminary study. Grana, 22:3-171-175

²⁶⁴ Jaconis, S., Culley, T. & Meier, A. 2017. Does particulate matter along roadsides interfere with plant reproduction? A comparison of effects of different road types on *Cichorium intybus* pollen deposition and germination. Environmental pollution, 222:261-266

²⁶⁵ Grell, G., Peckham, S., Schmitz, R., McKeen, S., Frost, G., Skamarock, W. & Eder, B. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment, 39(37):6957-6975

²⁶⁶ ENVIRON. 2020. International Corporation. User's Guide comprehensive air quality model with extensionS Version 7.10. Ramboll US Corporation. 315 .

²⁶⁷ Environmental Protection Agency (EPA). 2025. CMAQ User's Guide. CMAQv5.5 User's Guide. En linea :<https://github.com/USEPA/CMAQ/blob/main/DOCS/Users_Guide/README.md>

²⁶⁸ Scire, J., Strimaitis, D. & Yamartino, R. 1990. Model formulation and user's guide for the CALPUFF dispersion model. California Air Resources Board 1131 S Street Sacramento, California. Report No. A025-2. 154 p.

²⁶⁹ Cimorelli, A., Perry, S., Venkatram, A., Weil, J., Paine, R., Wilson, R., Lee, R., Peters, W., Brode, R. & Paumir, J. 2004. AERMOD: Description of model formulation.U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emissions Monitoring and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina. 91p.

Asimismo, es imperativo proporcionar la totalidad de los datos de entrada —fuentes de emisión, dominios, variables meteorológicas y topográficas y configuraciones del modelo—, asegurando el uso de series de tiempo con un umbral mínimo del 75% de datos válidos y la modelación bajo los escenarios más desfavorables.

Los valores observados de calidad del aire deben presentarse tabulados. En caso de utilizarse distintos valores de calidad del aire para distintas zonas, estos deben presentarse en un mapa del dominio de modelación. El proyecto debe indicar claramente el período de mediciones, la justificación y análisis de la representatividad de dichas mediciones del dominio de modelación. Además, se debe presentar un análisis completo de los datos utilizados, incluyendo el porcentaje de datos válidos y el método de validación. Se debe especificar el tratamiento de los registros faltantes y datos nulos.

En adición, al escoger la estación o las estaciones con datos observados disponibles, se debe analizar la incertidumbre o validez de los datos metereológicos modelados, para determinar, si el modelo se ajusta al comportamiento de la atmósfera en su área de influencia. En este sentido, sólo será necesario un análisis cuantitativo, calculando como mínimo las métricas estadísticas del sesgo (error medio o BIAS), error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Tanto BIAS como MAE son estimadores de la diferencia entre el valor modelado y observado de un mismo fenómeno, en este caso meteoro lógico. De igual forma, RMSE es un estimador de la frecuencia de las diferencias entre los valores observados y modelados, siendo especialmente sensible a los valores atípicos, por lo tanto, a mayor diferencia entre estos valores menor será el grado de ajuste de este estadístico. Las variables meteorológicas que como mínimo deben presentar estas métricas estadísticas, corresponden a la **temperatura y velocidad del viento**. Presentando valores esperados en la temperatura medida a 2 metros del suelo con errores medios entre $\pm 4^{\circ}\text{C}$, error absoluto medio menor o igual a 4°C y la raíz del error cuadrático medio menor o igual a 4.5. Respecto a la velocidad del viento medida a 10 m sobre el suelo, se esperan valores de error medio entre ± 2.5 m/s, error absoluto medio menor o igual a 3 m/s y la raíz del error cuadrático medio menor o igual a 3.5 m/s.

Este análisis es indispensable para dotar de objetividad a la evaluación y entregar certeza sobre los niveles de contaminación proyectados. La información generada en el marco de un EIA se integrará como sustento técnico para la toma de decisiones sobre los umbrales de contaminantes en el contexto de alteración de hábitat.

Es preciso señalar que los umbrales definidos en el Cuadro 9 podrían resultar insuficientes para evaluar la alteración de hábitat, dado que se fundamentan mayoritariamente en **estudios de especies ruderales, agrícolas y urbanas**, las cuales poseen adaptaciones superiores a entornos antropizados. Sin embargo, ante la ausencia de datos específicos para la flora nativa, estos valores se adoptan como una **medida bajo el principio precautorio, en tanto se desarrolle investigación sobre las concentraciones críticas de contaminantes y su impacto en la fenología reproductiva de los ecosistemas locales**.

En este contexto, para proyectos que contemplen la **construcción de caminos**, es imperativo **detallar la tipología de los caminos (pavimento, ripio o tierra), el flujo proyectado, el tipo de vehículos y/o maquinarias que harán uso del camino, las restricciones de velocidad y**

especificar si el camino se mantendrá cerrado cuando no sea utilizado. Se enfatiza que la velocidad de tránsito es un factor directamente proporcional a la resuspensión de material particulado y la dispersión de contaminantes²⁷⁰; por tanto, este análisis es fundamental para cuantificar la carga de sedimentos y gases que impactarán la fisiología y reproducción de la vegetación circundante.

Si las concentraciones de contaminantes modeladas **superan cualquiera de los umbrales establecidos en el Cuadro 9, se deberá delimitar la alteración de hábitat hasta que los valores sean menores a los umbrales mencionados.** Asimismo, si se identifica un impacto potencial derivado del uso de caminos, dicho factor deberá considerarse como un vector de alteración de hábitat, obligando a una evaluación detallada de su área de influencia.

5.2. Variables y criterios que permiten evaluar la magnitud de la alteración de hábitat

La alteración de hábitat en ecosistemas boscosos no es un fenómeno estático, sino un proceso **dinámico cuya magnitud fluctúa en función de múltiples variables.** Un mismo proyecto puede inducir **diversos grados de afectación**, aspecto que frecuentemente se omite en informes de experto donde se suele asignar una valoración uniforme a todas las modificaciones del paisaje realizadas. Identificar estos factores es determinante para una evaluación precisa y una jerarquización de la alteración de hábitat, lo que a su vez facilita el diseño de medidas más adecuadas y proporcionales al daño ambiental proyectado.

5.2.1. Cuantificar número de individuos reproductivos de la especie

En la actualidad, las evaluaciones sobre la continuidad de las especies en la cuenca omiten frecuentemente la cuantificación de los **individuos reproductivos** intervenidos y/o alterados en los Bosques Nativos de Preservación (BNP). Este dato es crítico, pues la eliminación total o parcial de la cohorte reproductiva constituye un impedimento directo para la perpetuación de la especie, configurando una alteración de hábitat sustancial, llegando a afectar todo el hábitat de la especie.

Es fundamental distinguir entre **individuos reproductivos y ejemplares maduros.** Mientras que los primeros son aquellos capaces de producir estructuras florales, una producción escasa reduce significativamente la probabilidad de una fecundación efectiva²⁷¹²⁷²²⁷³. En contraste, los individuos maduros —que han estabilizado su desarrollo— presentan una floración abundante, mayor atractivo para los polinizadores y, por ende, una eficacia reproductiva superior²⁷⁴. En consecuencia, la

²⁷⁰ Flores, J., Sukla, M., Wang, J. & Hernández, B. 2011. Material particulado dispersado al aire por vehículos en caminos agrícolas no pavimentados. *Terra Latinoamericana*, 29(1):23-34.

²⁷¹ Murawski, D. & Hamrick, J. 1991. The effect of the density of flowering individuals on the mating systems of nine tropical tree species. *Heredity*, 67:167–174

²⁷² Molina-Montenegro, M. & Cavieres, L. 2006. Efecto de la densidad y tamaño floral sobre el éxito reproductivo de *Nothoscordum graminum* (Alliaceae). *Gayana Botánica*, 63(1): 93-98

²⁷³ Hesse, E. & Pannell, J. 2011. Density-dependent pollen limitation and reproductive assurance in a wind-pollinated herb with contrasting sexual systems. *Journal of Ecology*, 99(6):1531-1539

²⁷⁴ Murakoshi, N., Itagaki, T., Oguro, M. & Sakai, S. 2024. Effects of floral display size, local open raceme density, patch size, and distance between patches on pollinator behaviour in *Salvia nipponica*. *Scientific Reports*, 14:967

evaluación del impacto no debe limitarse al conteo de individuos fértiles, sino priorizar a los ejemplares maduros o de grandes dimensiones (como indicadores de edad y vigor), cuya remoción deteriora el potencial de reclutamiento y la estabilidad demográfica de la población²⁷⁵²⁷⁶²⁷⁷²⁷⁸²⁷⁹, configurando una alteración de hábitat o incluso condicionar la continuidad de la especie en la cuenca.

La determinación de la madurez de un individuo de una especie requiere considerar factores como la disminución en la velocidad de crecimiento (característica de las curvas de crecimiento sigmoideas) y la producción abundante de flores y frutos. Por ejemplo, en el caso de *Pinus radiata*, la madurez ocurre entre los 20 y 25 años, coincidiendo con la reducción de su tasa de crecimiento, a pesar de que la producción de frutos comienza antes²⁸⁰.

Dada la escasez de estudios sobre las tasas de crecimiento (para todas las especies) y la estabilización del mismo en especies nativas y considerando la necesidad de análisis dendrocronológicos para estimar la edad, se opta por utilizar criterios **alternativos de madurez**, como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) o el Diámetro a la Altura del Cuello (DAT) para individuos con múltiples vástagos.

Por lo tanto, se establecerá que un individuo es maduro si presenta floración y fructificación con un **DAP mayor o igual a 5 cm** (o DAT mayor o igual a 6 cm) mayores a 2 metros de altura.

Existen excepciones para especies específicas:

1. Para *Fitzroya cupressoides*, *Gomortega keule*, especies del género *Nothofagus* y *Araucaria araucana*, se exige un **DAP mínimo de 10 cm**. Por ejemplo, aunque *Araucaria araucana* puede alcanzar 5 cm de DAP a los 20 años, su fructificación a esa edad puede ser nula o escasa, siendo abundante y con una disminución de crecimiento alrededor de los 40 años.
2. En el caso de *Jubaea chilensis*, el **DAP mínimo considerado debe ser superior a 60 cm**.

²⁷⁵ Rocha-Santos, L., Mayfield, M., Lopes, A., Pessoa, M., Talora, D., Faria, D. & Cazetta, E. 2019. The loss of functional diversity: A detrimental influence of landscape-scale deforestation on tree reproductive traits. *Journal of Ecology*, 108(1):212-223.

²⁷⁶ Hending, D., Randrianarison, H., Mahefa, N., Ranohatra-Hending, C., Holderied, M., McCabe, G. & Cotton, S. 2023. Forest fragmentation and its associated edge-effects reduce tree species diversity, size, and structural diversity in Madagascar's transitional forest. *Biodiversity and Conservation*, 32:3329-3353

²⁷⁷ Flather, C., Hayward, G., Beissinger, S. & Stephens, P. Minimum viable populations: is there a "magic number" for conservation practitioners. *Trends in Ecology & Evolution* 26(6):307-316

²⁷⁸ Assumani, D., Ilunga-Mulala, C., Bourland, N., Beeckman, H., Boyemba, F., Hatakiwe, H., Ngongo, J. & Hardy, O. 2024. Inbreeding depression affects the growth of seedlings of an African timber species with a mixed mating reproductive system, *Pericopsis elata* (Harms) Meeuwen. *Heredity*, 133:238-248

²⁷⁹ Sebbenn, A., Degen, B., Azevedo, V., Silva, M., Lacerda, A., Ciampi, A., Kanashiro, M., Carneiro, F., Thompson, I. & Loveless, M. 2008. Modelling the long-term impacts of selective logging on genetic diversity and demographic structure of four tropical tree species in the Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 254:335-349

²⁸⁰ Lavery, P. 1986. Plantation forestry with *Pinus radiata*: Review papers. Christchurch, Nueva Zelanda: University of Canterbury, School of Forestry.

Por lo que se recomienda, contabilizar el número de individuos reproductivos e individuos maduros presentes en la cuenca, zona de intervención y la zona de alteración de hábitat si corresponde.

5.2.2. Tamaño mínimo del parche remanente

Los remanentes boscosos de mayor superficie mantienen condiciones internas más estables, lo que favorece la resiliencia ecosistémica y mitiga los efectos de borde. En contraste, los fragmentos pequeños son altamente susceptibles a impactos irreversibles²⁸¹. Por consiguiente, resulta imperativo evaluar la superficie del parche en los escenarios pre y post-intervención. El análisis pre-modificación permite prever la vulnerabilidad del fragmento, mientras que la evaluación post-modificación determina su viabilidad ecológica, funcionalidad y el régimen de protección legal aplicable.

La evaluación del **tamaño de los parches previa a la intervención** revela que los fragmentos de mayores dimensiones albergan una biodiversidad superior, lo que incrementa su resiliencia y su capacidad para mitigar los efectos de las modificaciones del paisaje. Por el contrario, en parches de tamaño reducido, el efecto de borde penetra con mayor intensidad, pudiendo comprometer la integridad total del ecosistema. En estos fragmentos pequeños, las variables estructurales, de diversidad y de eficiencia en el uso del agua presentan una correlación negativa con la superficie remanente²⁸²²⁸³²⁸⁴²⁸⁵.

En consecuencia y conforme a lo observado, **se establece que en parches con anchos mínimos inferiores a 40 metros, la alteración de hábitat debe calificarse con una magnitud superior**. Si bien existe la posibilidad de que este umbral de ancho mínimo deba ser mayor —especialmente al considerar la influencia de las matrices ecológicas—, dicha variable requiere estudios adicionales para su determinación precisa.

Por otra parte, se debe evaluar el tamaño del **parche remanente posterior a la modificación** (situación con proyecto), ya que cualquier **modificación del paisaje y/o alteración de hábitat** cuya fragmentación genere parches de Bosque Nativo de Preservación remanentes con anchos inferiores a los mínimos establecidos en la definición de *Bosque* y *Bosque nativo de preservación* del artículo 2º de la Ley N° 20.283, es decir, cuando el remanente no cumpla con un **ancho mínimo de 40 metros, serán considerados alterados en su totalidad (quedarían fuera de cualquier protección legal)** y se deben incorporar dentro de las **medidas de continuidad**, de manera de asegurar la

²⁸¹ Santana, L., Prado-Junior, J., Ribeiro, J., Araujo, M., Pereira, K., Antunes, K., Carvalho, F., van den Berg, E. 2021. Edge effects in forest patches surrounded by native grassland are also dependent on patch size and shape. *Forest Ecology and Management*, 482:118842

²⁸² Majumdar, K. & Datta, B. 2016. Effects of patch size, disturbances on diversity and structural traits of tropical semi-evergreen forest in the lowland Indo Burma hotspot: implication on conservation of the threatened tree species. *Journal of Mountain Science*, 13(8):1397:1410

²⁸³ Rubio, C., García-Fayos, P. & Bochet, E. 2019. Análisis de la distribución del tamaño de parches de vegetación como indicador de degradación de los encinares mediterráneos. *Cuadernos de Geografía*, 102:73-86

²⁸⁴ Rodríguez-Echeverry, J. & Leiton, M. 2021. Pérdida y fragmentación de ecosistemas boscosos nativos y su influencia en la diversidad de hábitats en el hotspot Andes tropicales. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92:e923449

²⁸⁵ Herbst, M., Roberts, J., Rosier, P., Taylor, M. & Gowing, D. 2007. Edge effects and forest water use: A field study in a mixed deciduous woodland. *Forest Ecology and Management*, 250(3):176-186

conservación estructural y funcional de la formación de bosque nativo de preservación afectada, al quedar sin protección legal, provocando la susceptibilidad de pérdida del remanente.

5.2.3. Matriz ecolonal previa modificación antrópica del paisaje

Resulta fundamental caracterizar las diversas formaciones vegetales, clases de suelo y sus extensiones dentro de la matriz ecolonal adyacente a los Bosques Nativos de Preservación (BNP), ya que esto condiciona la magnitud de la alteración de hábitat. La severidad del impacto difiere significativamente según la naturaleza de la matriz intervenida; la sustitución de una cobertura boscosa nativa genera consecuencias más críticas sobre el remanente que la modificación de áreas desprovistas de vegetación. Las zonas de ecotono son sistemas altamente dinámicos donde perturbaciones menores pueden desencadenar respuestas ecológicas abruptas²⁸⁶. En los cuales mientras menos modificada se vea la matriz mejor será para las especies que se encuentran en el sitio²⁸⁷.

Asimismo, los bordes antropogénicos ejercen una influencia más deletérea que las transiciones naturales, comprometiendo la funcionalidad ecosistémica y la persistencia de taxones sensibles²⁸⁸²⁸⁹²⁹⁰²⁹¹. Aunque el análisis de esta variable no permite descartar por sí solo la alteración de hábitat, es un **indicador determinante de la intensidad del cambio en el paisaje**. Esta información es, además, una **herramienta clave para el diseño de proyectos**, permitiendo la implementación de zonas de amortiguación vegetal que mitiguen los efectos del proyecto sobre el BNP.

5.2.4. Tipo, magnitud y uso de la(s) obra(s)

Las actividades inherentes a la ejecución de un proyecto constituyen el vector principal de la modificación del paisaje; por tanto, junto con la caracterización de las especies, representan las variables fundamentales para diagnosticar la alteración de hábitat. Resulta imperativo conocer con exactitud la **tipología, el régimen de uso y la magnitud de las obras proyectadas**, ya que sin este análisis —frecuentemente omitido en los informes de expertos— es técnicamente inviable evaluar la potencial alteración de hábitat real sobre un ecosistema boscoso.

La **tipología** de la modificación del paisaje es determinante para diferenciar la **magnitud y la ocurrencia de la alteración de hábitat**, dado que existen diferencias marcadas entre proyectos

²⁸⁶ Sottile, G., Meretta, P., Tonello, M., Bianchi, M. & Mancini, M. 2015. Disturbance induced changes in species and functional diversity in southern Patagonian forest-steppe ecotone. *Forest Ecology and Management*, 353:77-86

²⁸⁷ Aben, J., Adriaensen, F., Thijss, K., Pellikka, P., Siljander, M., Lens, L. & Matthysen, E. 2012. Effects of matrix composition and configuration on forest bird movements in a fragmented Afromontane biodiversity hotspot. *Animal Conservation*, 15:658-668

²⁸⁸ Martino, R. 2015. Matrix and edge effects on the maintenance of ecological functions in an Afromontane protected area. *Antioch University Dissertations & Theses, PhD Program in Environmental Studies at Antioch University*. 125 p.

²⁸⁹ Essen, P., Ringvall, A., Harper, K., Christensen, P. & Svensson, J. 2016. Factors driving structure of natural and anthropogenic forest edges from temperate to boreal ecosystems. *J. Veg. Sci.*, 27(3):482-492

²⁹⁰ Brice, M., Vissault, S., Vieira, W., Gravel, D., Legendre, P. & Fortin, M. 2019. Moderate disturbances accelerate forest transition dynamics under climate change in the temperate-boreal ecotone of eastern North America. *Global Change Biology*, 00:1-18

²⁹¹ Gallé, R., Tölgéysi, C., Torma, A., Bátori, Z., Lörinczi, G., Szilassi, P., Gallé-Szpisják, N., Kaur, H., Makra, T., Módra, G. & Batáry, P. 2022. Matrix quality and habitat type drive the diversity pattern of forest steppe fragments. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 20(1):60-68

lineales (e.g., caminos, líneas de transmisión) y proyectos areales (e.g., parques eólicos, minería a cielo abierto). Los impactos generados por proyectos lineales son, generalmente, de menor magnitud que los producidos por intervenciones areales. Un estudio de Franklin *et al.* (2020)²⁹² corrobora esta diferencia, al determinar que la distancia de influencia del borde fue ligeramente menor en corredores lineales estrechos (31 ± 4 m) en comparación con áreas perturbadas más extensas (37 ± 7 m). Esto sugiere que las áreas de intervención de mayor envergadura generan un efecto de borde de mayores dimensiones y, por ende, una alteración del hábitat potencialmente más severa.

En cuanto a la tipología de la obra, es necesario establecer **matices según el uso y la naturaleza de la infraestructura**, ya que la magnitud de la alteración de hábitat difiere significativamente entre proyectos de distinta índole. Por ejemplo, un depósito de relaves mineros conlleva una mayor complejidad de impactos en su fase de operación —incluyendo el transporte y dispersión de minerales en el suelo²⁹³— en comparación con una central hidroeléctrica, cuyos factores de alteración se vinculan principalmente a modificaciones microclimáticas y a la colonización de especies exóticas²⁹⁴.

De igual forma, en las intervenciones lineales se observan gradientes de impacto diferenciados: los caminos pavimentados ejercen una mayor influencia de efecto de borde que las vías de tierra o senderos pedestres²⁹⁵. Estas disparidades radican en la **magnitud de la modificación estructural, la frecuencia de uso y la temporalidad de la obra**.

Resulta imperativo cuantificar la **magnitud de la modificación del paisaje en términos de ancho y superficie**, dado que la alteración de hábitat se intensifica en función de la morfología y extensión de la superficie intervenida. Este fenómeno ha sido documentado por Zhou *et al.* (2020)²⁹⁶, quienes demuestran que el incremento en el ancho de los caminos correlaciona positivamente con la magnitud de los efectos de borde; por consiguiente, las vías angostas presentan una mayor compatibilidad con la conservación forestal. Sin embargo, la proliferación de redes densas de caminos estrechos puede generar impactos acumulativos equivalentes o superiores a los de una vía de gran envergadura²⁹⁷. Asimismo, la infraestructura vial tiende a homogeneizar la diversidad vegetal, reduciendo la riqueza de especies en comparación con el interior del bosque²⁹⁸. Esta variabilidad se evidenció en la evaluación de senderos pedestres con uso inferior a dos años, donde,

²⁹² Franklin, C., Harper, K. & Clarke, M. 2020. Trends in studies of edge influence on vegetation at human-created and natural forest edges across time and space. *Can. J. For. Res.* 51: 274–282 (2021)

²⁹³ Espinoza, S., Quiroz, I., Magni, C., Yañez, M. & Martínez, E. 2022. Long-Term effects of copper mine tailings on surrounding soils and sclerophyllous vegetation in Central Chile. *Water, Air & Soil Pollution*, 2022:233:288

²⁹⁴ Pacheco, F., Rojas, O., Hernández, E. & Caamaño, D. Effects on Fluvial Geomorphology and Vegetation Cover following Hydroelectric Power Plant Operation: A Case Study in the Maule River (Chile). *Water* 2022, 14(11), 1673

²⁹⁵ Li, H., Luo, P., Yang, H., Luo, C., Xie, W., Jia, H., Cheng, Y. & Huang, Y. 2022. Assessing the effect of roads on mountain plant diversity beyond species richness. *Sec. Functional Plant Ecology*, 13:985673.

²⁹⁶ Zhou, T., Luo, X., Hou, Y., Xiang, Y. & Peng, S. 2020. Quantifying the effects of road width on roadside vegetation and soil conditions in forests. *Landscape Ecol* (2020) 35:69–81.

²⁹⁷ Echiverri, L., Macdonald, S. & Nielsen, S. 2021. Neighboring edges: Interacting edge effect from linear disturbances in treed fens. *Applied Vegetation Science*, 25(1).

²⁹⁸ Li, H., Luo, P., Yang, H., Luo, C., Xie, W., Jia, H., Cheng, Y. & Huang, Y. 2022. Assessing the effect of roads on mountain plant diversity beyond species richness. *Sec. Functional Plant Ecology*, 13:985673.

cuatro años después de la intervención, los indicadores de alteración de hábitat fueron mínimos en comparación con rutas de mayor escala y frecuencia de tránsito (uso).

Contrario a la práctica común en los informes de expertos, la **alteración del hábitat no debe considerarse una constante**, ya que varía según las características del proyecto, topografía, la especie, la condición y ubicación del bosque. Las obras lineales, por ejemplo, tienden a generar impactos menores que los proyectos de gran superficie. Adoptar este enfoque multifactorial es esencial para abordar la complejidad del problema. En este sentido, se sugiere que la evaluación de la alteración de hábitat considere las particularidades de cada componente de la modificación del paisaje.

Adicionalmente, se subraya la necesidad de investigar los efectos en la etapa de operación, una fase frecuentemente ignorada en las evaluaciones actuales, pero que en ciertos casos genera cambios sustanciales en la integridad de los ecosistemas forestales remanentes.

5.2.5. Efecto de la topografía en la alteración de hábitat

La topografía condiciona significativamente la estructura forestal, siendo **la pendiente un factor determinante en la magnitud de la alteración del hábitat**. Al respecto, Souza *et al.* (2022)²⁹⁹ demostraron que la inclinación del terreno, junto con la profundidad del suelo y la presión antrópica, modulan la composición de especies en fragmentos boscosos. Complementariamente, Guerra *et al.* (2013)³⁰⁰ observaron que el efecto borde es más agudo en laderas que en las cumbres. Sin mencionar, el alto efecto de las pendientes y la erosión del suelo ante la reducción de la cobertura vegetal³⁰¹. Estos hallazgos, sumados a la evidencia de terreno, confirman que la respuesta del ecosistema a la alteración de hábitat es asimétrica: mientras que en las zonas de 'pendiente arriba' el relieve actúa como un amortiguador de los impactos, en las áreas de 'pendiente abajo' la alteración se intensifica debido a procesos de escorrentía, erosión y deslizamientos. En consecuencia, la magnitud del daño ambiental está directamente vinculada a la dinámica gravitacional del terreno.

En consecuencia, la magnitud de la alteración del hábitat tiende a ser baja en los sectores de contra-pendiente, moderada en terrenos llanos y significativamente mayor en las zonas a favor de la pendiente. Este impacto se ve potenciado de manera proporcional a la **inclinación y longitud de la pendiente**, así como a la tipología y dimensiones de la obra ejecutada.

Asimismo, deben considerarse las **particularidades** de proyectos como parques fotovoltaicos y eólicos. En el caso de las plantas solares, la disposición de los paneles genera una mayor irradiancia vertical en comparación con la horizontal³⁰², lo que, en casos excepcionales, puede intensificar la

²⁹⁹ Souza, D., Souza, L., Couto, E., Caxambu, M. & Peron, A. 2022. Effect of slope on the forest structure of the Atlantic Forest domain in southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 84, e258048

³⁰⁰ Guerra, T., Nogueira, M., Borges, A., Alves, M., Menezes, M. & de Araujo, P. 2012. Influence of edge and topography on the vegetation in an Atlantic Forest remnant in northeastern Brazil. *Journal of Forest Research*, 18:200-208.

³⁰¹ Zhang, Z., Sheng, L., Yang, J. & Chen, X. 2015. Effects of Land Use and Slope Gradient on Soil Erosion in a Red Soil Hilly Watershed of Southern China. *Sustainability*, 7(10):14309-14325

³⁰² Barron-Gafford, G., Minor, R., Allen, N., Cronin, A., Brooks, A., & Pavao-Zuckerman, M. 2016. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific reports*, 6:35070

alteración en las zonas situadas pendiente arriba. Por otro lado, los aerogeneradores afectan la humedad local y el comportamiento de polinizadores y dispersores³⁰³³⁰⁴³⁰⁵³⁰⁶, provocando una alteración del hábitat que suele ser más severa a una distancia específica del aerogenerador que en su borde inmediato. En terrenos accidentados, esto deriva en un efecto de borde dual: uno en el contacto directo con la infraestructura y otro en sectores específicos ladera arriba. Integrar estas variables es fundamental para optimizar el diseño y la sostenibilidad del proyecto.

La **orientación** del borde condiciona significativamente los cambios microclimáticos; las exposiciones norte y noreste presentan una mayor vulnerabilidad que el resto de las orientaciones. En consecuencia, la alteración del hábitat tiende a intensificarse en estos sectores debido a una mayor insolación. Por el contrario, en las laderas de exposición sur, los efectos de dicha alteración se manifiestan con menor severidad, debido a las condiciones de mayor humedad y menor radiación directa³⁰⁷.

5.2.6. Formación vegetal

Resulta crucial reconocer la variabilidad en la magnitud de la alteración del hábitat según la formación vegetal. Existe evidencia consolidada que demuestra diferencias en la manifestación del efecto borde por modificación antrópica entre **bosques tropicales, templados y boreales** (siguiendo el gradiente de sensibilidad: tropicales > templados > boreales)³⁰⁸³⁰⁹. No obstante, es relevante considerar las particularidades de los bosques mediterráneos, que exhiben efectos de borde comparables a los boreales o incluso superiores³¹⁰³¹¹. **Dentro de cada tipo de vegetación, la manifestación de la alteración de hábitat es heterogénea**, dependiendo de la ubicación geográfica y topográfica del límite, el tipo y magnitud de la modificación del paisaje, y las características específicas de la cobertura vegetal.

Adicionalmente, **deben establecerse matices internos en cada categoría**. Por ejemplo, existen diferencias significativas entre un bosque esclerófilo húmedo o costero —que en ocasiones presenta características de bosque templado— y uno esclerófilo de interior. La identificación precisa de la

³⁰³ Zhou, L., Tian, Y., Roy, S., Thorncroft, C., Bosart, L. & Hu, Y. 2012. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change, Letters*. 5p.

³⁰⁴ Trieb, M., Gerz, T., & Geiger, M. 2018. Estimating insect fatalities at wind turbines. *Renewable Energy*, 115, 817-823

³⁰⁵ Song, Z., Deng, X., & Kaffine, D. 2023. Blaming the wind? The impact of wind turbine on bird biodiversity. *Energy Economics*, 130:107386.

³⁰⁶ Leroux, L., Fourrier, M., & Leduc, L. 2025. Vibrations from Wind Turbines Increased Self-Pollination of Native Plants. *Journal of Ecological Engineering*, 5(2):15.

³⁰⁷ Bernaschini, M., Trumper, E., Valladares, G. & Salvo, A. 2019. Are all edges equal? Microclimatic conditions, geographical orientation and biological implications in a fragmented forest. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 280:142-151.

³⁰⁸ Franklin, C., Harper, K. & Clarke, M. 2021. Trends in studies of edge influence on vegetation at human-created and natural forest edges across time and space. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2):274-282

³⁰⁹ Harper, K., Macdonald, S., Mayerhofer, M., Biswas, S., Esseen, P., Highlander, K., Stewart, K., Mallik, A., Drapeau, P., Jonsson, B., Lesieur, D., Kouki, J. & Bergeron, Y. 2015. Edge influence on vegetation at natural and anthropogenic edges of boreal forests in Canada and Fennoscandia. *Journal of Ecology*, 103(3):550-562

³¹⁰ Belinchón, R., Martínez, I., Escudero, A., Aragón, G. & Valladares, F. 2007. Edge effects on epiphytic communities in a Mediterranean Quercus pyrenaica forest. *Journal of Vegetation Science* 18: 81-90.

³¹¹ Bruniati, G., Frati, L. & Loppi, S. 2012. Fragmentation of Mediterranean oak forests affects the diversity of epiphytic lichens. *Nova Hedwigia*, 96:265-278

formación vegetal y su correspondencia con el clima local y la composición florística es, por ende, fundamental.

5.2.7. Estructura del bosque remanente

Es fundamental comprender la **estructura del dosel forestal**, ya que determina la resiliencia del ecosistema ante modificaciones del paisaje. Generalmente, una cobertura densa a semidensa presenta una menor afectación que la observada en formaciones abiertas o muy abiertas³¹². No obstante, la respuesta varía significativamente según el tipo de formación vegetal; por ejemplo los bosques de espinal en general se ven menos afectados que los bosques siempreverde o mediterráneos, es decir esto también se asocia a los regímenes bioclimáticos que se presentan en Chile.

Es imperativo matizar esta premisa en el contexto de la fragmentación y degradación preexistente. El efecto borde tiende a ser menor en bosques con alta diversidad de dosel y baja invasión biológica, mientras que se intensifica en **hábitats degradados**³¹³. **Estos ecosistemas son, por ende, más vulnerables a la alteración de hábitat, al igual que ocurre con otros ecosistemas frágiles.** Cabe considerar, además, que la fragmentación es un potente vector de degradación paisajística³¹⁴³¹⁵.

Por otra parte, conocer la **dominancia de las especies es clave**: las modificaciones en bosques perennes generan una alteración del hábitat de mayores magnitudes que las realizadas en bosques caducífolios³¹⁶³¹⁷.

En relación con el **estado sucesional del bosque**, es pertinente señalar que los **bosques primarios poseen una mayor capacidad para amortiguar los efectos de borde en comparación con los secundarios**. En consecuencia, las condiciones microclimáticas tienden a estabilizarse en distancias menores dentro de formaciones primarias³¹⁸. No obstante, es probable que la severidad del impacto sea superior en estas últimas, manifestándose una alteración de menor alcance espacial pero de mayor intensidad biológica. Esta dicotomía exige un esfuerzo técnico superior y el diseño de medidas de continuidad robustas que respondan a la sensibilidad específica de estos ecosistemas.

³¹² Haneda, L., Brancalion, P., Valle, D., Silva, C., Gorgens, E., Prata, G., Kamimura, R., Gomes, S., Sanchez, A. & Alves de Almeida, D. 2025. Edge effect impacts on forest structure and carbon stocks in REDD + projects: An assessment in the Amazon using UAV-LiDAR. *Forest Ecology and Management*, 585:122646

³¹³ Harper, K., MacDonald, E., Burton, P., Chen, J., Brosowske, K., Saunders, S., Euskirchen, E., Roberts, D., Jaiteh, M. & Esseen, P. 2005. Edge Influence on Forest Structure and Composition in Fragmented Landscapes. *Conservation Biology*, Volume 19(3): 768–782

³¹⁴ Nunes, M., Vaz, M., Campana, J., Laurance, W., de Andrade, A., Vicentini, A., Laurance, S., Raumonen, P., Jackson, T., Zuquim, G., Wu, J., Peñuelas, J., Chave, J. & Maeda, E. 2023. Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forest. *Nature communications*, 14:8129.

³¹⁵ Sun, M., Li, W., Zhu, L., Guo, Z., Zhao, Z., Meng, N., Han, M., Wang, N. & Zhang, X. 2025. Degradation in edge forests caused by forest fragmentation. *Carbon Research*, 4:38

³¹⁶ Harper, K., Macdonald, E., Mayerhofer, M., Biswas, S., Essen, P., Hylander, K., Stewart, K., Mallik, S., Drapeau, P., Jonsson, B., Lesieur, D., Kouki, J. & Bergeron, Y. 2015. Edge influence on vegetation at natural and anthropogenic edges of boreal forests in Canada and Fennoscandia. *Journal of Ecology*, 103(3):550-562

³¹⁷ Sun, M., Li, W., Zhu, L., Guo, Z., Zhao, Z., Meng, N., Han, M., Wang, N. & Zhang, X. 2025. Degradation in edge forests caused by forest fragmentation. *Carbon Research*, 4:38.

³¹⁸ Franklin, C., Harper, K. & Clarke, M. 2021. Trends in studies of edge influence on vegetation at human-created and natural forest edges across time and space. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2):274-282

En síntesis, resulta imperativo determinar el estado de degradación del bosque, su cobertura, la composición de especies dominantes y su estadio sucesional (primario o secundario). Estos parámetros constituyen la base fundamental para realizar una caracterización precisa y rigurosa de la alteración del hábitat en términos estructurales.

5.2.8. Eventos climáticos

Actualmente, existe una carencia metodológica en la evaluación de la alteración del hábitat, dado que no se integran las **variables asociadas a eventos climáticos extremos** en las zonas de modificación antrópica. Esta omisión conduce a una subestimación de los efectos e impactos reales. Un ejemplo paradigmático es el período de 'megasequía' que afecta a Chile. Durante este fenómeno, la sinergia entre el estrés hídrico y las modificaciones del paisaje probablemente **incrementa la magnitud y severidad de la alteración de hábitat**³¹⁹³²⁰. Si bien su detección no es inmediata, su consideración es crucial para las entidades competentes, máxime cuando este factor aún persiste y no ha sido incluido en los análisis periciales estándar³²¹³²².

Esta misma lógica se aplica a ecosistemas afectados por incendios forestales u otros disturbios: intervenir paisajes en proceso de recuperación puede ser letal para la biodiversidad, especialmente para especies con problemas de conservación, si no se implementan medidas de protección y restauración adecuadas³²³³²⁴³²⁵.

Otro aspecto relevante es la incidencia del cambio climático en la exacerbación de los efectos de borde³²⁶. La transición hacia un régimen de precipitaciones de mayor intensidad pero menor duración, en contraste con los registros históricos, sumada a periodos de sequía prolongados, altera profundamente la resiliencia del entorno³²⁷³²⁸. En este escenario, las modificaciones antrópicas del

³¹⁹ Koelemeijer, I., Ehrlén, J., De Frenne, P., Jönsson, M., Berg, P. & Hylander, K. 2023. Forest edge effects on moss growth are amplified by drought. *Ecological Applications*, 33(4):e2851

³²⁰ Koelemeijer, I., Ehrlén, J., De Frenne, P., Jönsson, M., Berg, P., Anderson, J., Weibull, H. & Hylander, K. 2022. Interactive effects of drought and edge exposure on old-growth forest understory species. *Landscape Ecology*, 37:1839–1853

³²¹ Crocco, J. 2021. Megasequía: Diagnóstico, impactos y propuestas. Puntos de Referencia. Economía y Políticas Públicas. N°559. 24 p.

³²² Ayala, A., Muñoz-Castro, E., Farinotti, D., Fariñas-Barahona, D., Mendoza, P., MacDonell, S., McPhee, J., Vargas, X. & Pellicciotti, F. 2025. Less water from glaciers during future megadroughts in the Southern Andes. *Communications Earth & Environment*, 6:860

³²³ Bennet, A., Duncan, D., Rumpff, L. & Vesk, P. 2020. Disentangling chronic regeneration failure in endangered woodland ecosystems. *Ecosphere*, 11(1):e02998

³²⁴ Bowd, E., McBurney, L. & Lindenmayer, D. 2023. The characteristics of regeneration failure and their potential to shift wet temperate forests into alternate stable states. *Forest Ecology and Management*, 529:120673

³²⁵ Cordero, I., Leizeaga, A., Hicks, L. & Bardgett, R. 2023. High intensity perturbations induce an abrupt shift in soil microbial state. *The ISME Journal*, 17:2190–2199

³²⁶ Reek, J., Crowther, T., Lauber, T., Schemm, S., Parastatidis, D., Chrysoulakis, N., Huang, M., Piao, S., Zohner, C. & Smith, G. 2025. Forest edges are globally warmer than interiors and exceed optimal temperatures for vegetation productivity. *Communications Earth & Environment*, 6:635

³²⁷ Dirección General de Aeronáutica Civil. 2019. "Desafíos del pronóstico meteorológico en el actual escenario climático". Evidencias observacionales de los eventos extremos asociados a temperatura y precipitación. Informe elaborado por la Oficina Cambio Climático de la Sección de Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile. 21 p.

³²⁸ Dirección General de Aeronáutica Civil. 2021. Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Informe climático del año 2020, preparado en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022, para dar cumplimiento con el objetivo específico "Mejorar el Sistema de monitoreo de las principales variables climáticas a nivel nacional como base de información para el seguimiento de la evolución climática en Chile", Ficha MA2 de las líneas de acción para el Eje de Adaptación, Anexo I.B. 44 p.

paisaje derivan en una alteración del hábitat de mayor magnitud y severidad que en condiciones normales³²⁹³³⁰.. La escorrentía intensa degradó las propiedades fisicoquímicas del suelo, induciendo un estrés fisiológico en la flora local³³¹. En consecuencia, cualquier intervención adicional no solo incrementa la intensidad del impacto, sino también su probabilidad de ocurrencia. Esta vulnerabilidad se agrava durante las sequías, donde el estrés hídrico acumulado puede tornar letal cualquier perturbación del entorno.

Por consiguiente, resulta imperativo evaluar la desviación de estas variables climáticas respecto a los promedios históricos. Esta variabilidad condiciona la capacidad de respuesta de la vegetación ante las modificaciones del paisaje, pudiendo intensificar la magnitud de la alteración del hábitat en comparación con escenarios de estabilidad climática.

5.2.9. Sinergias no mencionadas

Resulta fundamental evaluar el grado de presión acumulativa sobre la cuenca hidrográfica para prevenir el colapso de sus ecosistemas³³²³³³. Toda intervención añade una carga adicional al sistema, incrementando tanto la magnitud como la probabilidad de ocurrencia de alteraciones en el hábitat. Ante este escenario, es imperativo identificar los siguientes factores:

- **Proyectos concurrentes:** Inventariar las obras ejecutadas o en proceso de evaluación ambiental dentro de la misma cuenca.
- **Heterogeneidad del suelo:** Analizar la diversidad de usos de suelo y la superficie total ocupada por actividades antrópicas.
- **Presiones bióticas adicionales:** Constatar la presencia de ganado, lagomorfos y especies del género *Rattus* en las áreas destinadas a remanentes de Bosque Nativo de Preservación (BNP).

Habiendo integrado previamente la sinergia climática y la presencia de especies exóticas, se requiere ahora un análisis sistémico que incorpore todas las variables mencionadas para determinar la vulnerabilidad real del territorio.

³²⁹ You, W., Xian, Z., Zhou, G., Agathokleous, E., & Yu, Z. 2023. Sensitivity of forest phenology in China varies with proximity to forest edges. *Forest Ecosystems* 10: 1000144.

³³⁰ Reinmann, A. & Hutyra, L. 2016. Edge effects enhance carbon uptake and its vulnerability to climate change in temperate broadleaf forests. *Sustainability Science*, 114(1):107-112

³³¹ Zhao, Y., Zhu, D., Wu, Z. & Cao, Z. 2024. Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 917:170425

³³² Morshed, S., Esraz-Ul-Zannat, M., Fattah, M. & Saroor, M. 2024. Assessment of the future environmental carrying capacity using machine learning algorithms. *Ecological Indicators*, 158:111444

³³³ Del Monte-Luna, P., Brook, B., Zetina-Rejon, M. & Cruz-Escalona, V. 2004. The carrying capacity of ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 13(6):485-495

5.3. Medidas

5.3.1. Estación del año recomendada para ejecutar modificaciones del paisaje

Existe evidencia que sugiere que la corta de árboles genera un menor impacto en la vegetación remanente y en las propiedades del suelo cuando se ejecuta durante el período de latencia fisiológica de los individuos, lo cual generalmente coincide con las estaciones de otoño e invierno. La principal ventaja radica en un menor estrés inicial para los especímenes remanentes ante cambios microclimáticos (exceptuando el riesgo de heladas severas). Adicionalmente, al estar los árboles en dormancia, los daños mecánicos potenciales reducen la exposición a plagas y enfermedades, y la pérdida de biodiversidad puede ser comparativamente menor³³⁴. Esta temporalidad también minimiza los impactos sobre la regeneración natural y atenúa los efectos de sequía y la compactación del suelo en comparación con intervenciones estivales. Sin embargo, es crucial que la faena se realice **con el suelo no saturado de agua**, para evitar daños irreversibles en su estructura y propiedades³³⁵³³⁶³³⁷; de no ser así, la magnitud de la alteración del hábitat resultante será superior en comparación a otra temporada del año. Pese a esta salvedad, la modificación del paisaje durante la latencia sigue siendo considerablemente más favorable que en verano, cuando los vectores de alteración de hábitat se verán maximizados.

Sin perjuicio de lo expuesto, la ejecución de faenas en otoño e/o invierno debe integrar obligatoriamente el componente fauna, dada la movilidad reducida de ciertos taxones durante esta estacionalidad. Se debe poner especial énfasis en anfibios, reptiles y marsupiales, los cuales entran en estados de brumación o hibernación. Resulta preocupante que existan antecedentes de planes de 'perturbación controlada' aprobados para estos grupos precisamente en meses de inactividad; dicha práctica contraviene su efectividad al ignorar la ecología básica de las especies. Por ello, se propone que las modificaciones del paisaje en períodos fríos se realicen bajo protocolos de perturbación controlada técnica y ecológicamente adecuados, asegurando además que el **suelo no presente saturación hídrica**.

Si bien se reconoce que no todas las intervenciones del paisaje podrán ajustarse a este cronograma, se sugiere **priorizar las actividades en sectores de Bosque Nativo de Preservación (BNP) durante estos períodos**. Esta medida busca atenuar los efectos de borde y la alteración del hábitat; aunque no elimina la posibilidad de alteración, permite reducir su magnitud y severidad.

³³⁴ Virkkala, R., Määttänen, A. & Heikkinen, R. 2023. Clear-cuts and warming summers caused forest bird populations to decline in a southern boreal area. *Forest Ecology and Management*, 548:121397

³³⁵ Schira, M. 2013. Winter weather conditions may be the ideal time for timber harvest activities. Michigan State University Extension

³³⁶ Cambi, M., Certini, G., Neri, F. & Marchi, E. 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338:124-138

³³⁷ Labelle, E., Hansson, L., Högbom, L., Jourgholami, M. & Laschi, A. 2022. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*, 8:20-37

5.3.2. Consideración de distancias de seguridad de amortiguación de los efectos de alteración de hábitat sobre BNP.

Es fundamental contemplar **zonas de amortiguamiento natural** entre las modificaciones del paisaje y los bosques nativos de preservación remanentes. Estas barreras vegetales son esenciales para absorber los impactos operativos y constructivos que, de otro modo, incidirían directamente sobre el borde del bosque. Un diseño óptimo en cuanto a ancho y densidad de la barrera no solo reduce la severidad de la alteración del hábitat, sino que puede evitar la manifestación de efectos negativos en el ecosistema protegido.

En virtud de lo expuesto, debe evaluarse el aprovechamiento de las formaciones vegetales existentes, ya sean naturales o artificiales (plantaciones), como zonas de protección. En ausencia de estas, se propone la **creación de barreras naturales mediante la reforestación técnica**, priorizando el uso de especies nativas pertenecientes a la misma asociación fitosociológica del Bosque Nativo de Preservación (BNP). El empleo de **especies alóctonas o exóticas debe evitarse**, ya que podría comprometer la integridad estructural y la composición florística del bosque remanente. Es pertinente señalar que tanto el **espesor de esta franja como el lapso transcurrido** entre su establecimiento y el inicio de las obras serán factores determinantes para mitigar la magnitud y/u ocurrencia de la alteración del hábitat.

De este modo, se consolida una alternativa orientada a mitigar la magnitud de la alteración del hábitat, o incluso a prevenir su ocurrencia, como medida de planificación previa a la ejecución del proyecto. Es imperativo que esta acción no contemple la corta ni la perturbación del entorno de la especie de interés bajo ningún concepto. La efectividad de esta estrategia de resguardo dependerá estrictamente de la capacidad de mantener en el tiempo parámetros óptimos de cobertura, estratificación (altura), composición florística y densidad poblacional³³⁸³³⁹.

5.3.3. Medidas de contingencia ante fallas y/o eventualidades en actividades y obras del proyecto que puedan generar alteración de hábitat

Frecuentemente, las obras y actividades de un proyecto generan alteraciones del hábitat no previstas inicialmente, derivadas de contingencias operacionales como derrames de materiales o deslizamientos de tierra que impactan directamente sobre la especie o su entorno. Estos eventos pueden causar la mortalidad de individuos e impedir su reproducción, afectando también la regeneración natural y el banco de semillas del área. La probabilidad de ocurrencia de estas eventualidades se incrementa notablemente en zonas de pendiente, por lo que es vital planificar medidas de contingencia. Ello permite cumplir con lo establecido en la “*Guía para la solicitud de excepcionalidad del artículo 19 de la Ley N.º 20.283*”, que exige “*Asegurar la continuidad de la especie en términos de superficie de hábitat que intervendrá y que alterará, junto a los individuos de la ECC que se intervendrán y cuyo hábitat será alterado, junto a las especies acompañantes que*

³³⁸ Arroyo-Rodríguez, V., Fahrig, L., Tabarelli, M., Watling, J., Tischendorf, L., Benchimol, M., Cazetta, E., Faria, D., Eigenbrod, F., Melo, F., Queiroz, S., Hernández-Ruedas, M., Lira-Noriega, A., Arce-Peña, N., Santos, B., Lourenço-de-Moraes, R., Richardson, J., Magrach, A., Vieira, I., Slik, J., Nowakowski, J. & Tscharntke, T. 2020. Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 23(9), 1404–1420

³³⁹ González del Tanago, M. & García de Jalón, D. 2001. Restauración de ríos y riberas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. 262 p.

son parte del hábitat de la ECC". Este es solo un ejemplo de las diversas fallas operativas que pueden ocurrir, incluyendo la liberación de líquidos químicos o daños a la vegetación remanente.

Ante estas situaciones imprevistas, es fundamental considerar su potencial ocurrencia e implementar protocolos de contingencia efectivos para mitigar los efectos de una alteración del hábitat no considerada en la planificación inicial o proponer medidas de compensación en caso de que ocurran.

5.4. Alteración de hábitat de *Citronella mucronata*

En línea con lo expuesto anteriormente, existen variables y criterios generales comunes a todas las especies, cuyo impacto sobre la vegetación fluctúa según las condiciones de sitio, las particularidades del proyecto y las características de cada individuo. No obstante, ciertos factores adquieren una relevancia crítica para *Citronella mucronata* debido a su autoecología. Esta especie se caracteriza por ser tolerante a la sombra, de crecimiento lento y propia de estadios sucesionales tardíos, vinculándose principalmente a bosques esclerófilos húmedos³⁴⁰ y a los tipos forestales Esclerófilo y Roble-Hualo³⁴¹, sin perjuicio de su presencia en otras asociaciones boscosas³⁴².

En primer término, es imperativo señalar el estado de vulnerabilidad de *Citronella mucronata*, derivado de una histórica deforestación y fragmentación de sus ecosistemas, impulsada principalmente por la actividad forestal, lo que ha diezmado sus subpoblaciones costeras. Actualmente, el estado sanitario de la especie es crítico: un 60% de la población se encuentra afectada por patógenos, un 23% ha sido impactada por la tala en contextos de plantaciones exóticas y un 15% presenta daños por herbivoría, incendios y proximidad a faenas agrícolas³⁴³. Otros factores determinantes en la degradación y pérdida de su hábitat incluyen la invasión de especies exóticas y el sobrepastoreo³⁴⁴³⁴⁵. Según Alarcón (citado en Neira *et al.*, 2014)³⁴⁶, los vectores principales de su estado son el cambio de uso de suelo, la extracción de biomasa (leña) y la presión ganadera. Complementariamente, Novoa destaca que en el límite norte de su distribución, los tendidos eléctricos y proyectos hidroeléctricos representan amenazas significativas, a lo que se suma el reemplazo de poblaciones en laderas bajas por monocultivos de frutales (paltos).

³⁴⁰ Villagrán, C. & Hinojosa, L. 2025. Historia evolutiva-biogeográfica de la flora de bosques subtropicales de Chile Central. Gayana Botánica, 82(1):1-23

³⁴¹ Donoso, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de Trabajo N° 38. Investigación y desarrollo forestal (CONAF, PNUD, FAO) (Publicación FAO Chile). 70 p.

³⁴² Corvalán, P., Galleguillos, M. & Hernández, J. 2014. Presencia, abundancia y asociatividad de *Citronella mucronata* en bosques secundarios de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile. Bosque, 35(3):269-278

³⁴³ Echeverría, C. & Rodríguez, R. 2014. Caracterización de *Eucryphia glutinosa*, *Citronella mucronata*, *Prumnopitys andina* y *Orites myrtleoides* según los criterios de la UICN. Informe Final Fondo de Investigación del Bosque Nativo, 75 p.

³⁴⁴ Hechenleitner, P., Gardner, M., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martínez, C. 2005. Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo, Valdivia, 188 p.

³⁴⁵ Serra, M., Gajardo, R. & Cabello, A. 1986. *Citronella mucronata* (R. et Pav.) D. Don, Programa de protección y recuperación de la flora nativa de Chile. Ficha técnica de especies amenazadas, Corporación Nacional Forestal, 27 p.

³⁴⁶ Neira, E., Zamorano, C., Cayuela, L. & Lara, A. 2014. Evaluación del estado de conservación de *Citronella mucronata*, *Eucryphia glutinosa* y *Persea lingue* de acuerdo a IUCN. Reporte final proyecto 052/2012. 78 pp.

En consecuencia, es posible afirmar que *Citronella mucronata* es susceptible de sufrir una alteración de su hábitat debido a la fragmentación y degradación ecosistémica derivada de la modificación del paisaje. En función de su autoecología, se han identificado variables específicas de alta relevancia para ayudar a predecir cómo responderá frente a modificaciones del paisaje: **la cobertura del sotobosque, la cobertura de especies vegetales exóticas (especialmente arbóreas y arbustivas), al igual que individuos del género *Chusquea* spp. (quilas o coligües) y la importancia de las especies tolerantes a la sombra en la formación.**

La cobertura del sotobosque es un indicador crítico de la integridad ecológica; en formaciones boscosas sin intervención antrópica significativa, se observa una densidad de sotobosque notablemente superior, lo que confiere una **mayor complejidad estructural y estratificación al interior del bosque en comparación con los sectores de borde**. Si bien las modificaciones del paisaje en estos ambientes pueden presentar una magnitud de alteración moderada, su probabilidad de ocurrencia es elevada al degradar las condiciones del hábitat para la especie. **Una reducción del estrato inferior acelera la erosión del suelo y la pérdida de biodiversidad**, afectando severamente a las especies umbrófilas al incrementar la aridez y facilitar la colonización de flora alóctona³⁴⁷³⁴⁸.

En este contexto, la presencia de especies exóticas y de ejemplares del género *Chusquea* spp. adquiere especial relevancia. Los hábitats de *Citronella mucronata* se caracterizan por un dosel cerrado con mínima influencia de invasoras o bambúceas. Sin embargo, la apertura del dosel en bordes antrópicos favorece el establecimiento de especies arbóreas intolerantes a la sombra y arbustos invasores como *Rubus* spp., *Rosa* spp. u otras. Asimismo, el aumento de la radiación solar potencia la **densidad de estas especies generalistas y/o exóticas, lo cual genera una competencia asimétrica que inhibe el crecimiento de *C. mucronata*** e incluso puede comprometer su supervivencia.

La importancia de las especies tolerantes se relaciona a la complejidad estructural, estratificación del bosque y sucesión ecológica. Se ha constatado que el **área basal de estas especies es significativamente mayor en bosques prístinos que en sectores degradados por actividades humanas**. La reducción de su presencia en áreas intervenidas refleja la presión competitiva ejercida por especies intolerantes de crecimiento acelerado. Este fenómeno no solo altera la sucesión ecológica natural, sino que pone en riesgo la supervivencia de las especies tolerantes, las cuales presentan una alta vulnerabilidad ante la pérdida de cobertura y la modificación del microclima.

Todas las variables descritas mantienen una interrelación sinérgica, por lo que se sugiere su **evaluación previa a cualquier modificación del paisaje**. Dicha evaluación permite prever la respuesta del ecosistema: si un área presenta un predominio de especies tolerantes a la sombra, es esperable que *Citronella mucronata* se vea afectada en **mayor grado tras una perturbación antrópica**, en comparación con zonas de baja influencia de estas especies, incrementando la probabilidad de alteración del hábitat. **Este principio aplica de igual manera a la complejidad del**

³⁴⁷ Giuggiola, A., Zweifel, R., Feichtinger, L., Vollenweider, P., Bugmann, H., Haeni, M. & Rigling, A. 2018. Competition for water in a xeric forest ecosystem – Effects of understory removal on soil micro-climate, growth and physiology of dominant Scots pine trees. *Forest Ecology and Management*, 409:241-249

³⁴⁸ Zhang, S., Yang, X., Li, D. & Li, S. 2022. A meta-analysis of understory plant removal impacts on soil properties in forest ecosystems, *Geoderma*, 426:116116

estrato arbustivo y herbáceo, cuya afectación incidirá negativamente en la especie focal. Este análisis debe complementarse con la **identificación de especies exóticas con potencial invasor** que puedan colonizar la zona tras la apertura del dosel.

Aunque se podría inferir que ciertas modificaciones del paisaje podrían beneficiar a la especie, **no debe soslayarse la naturaleza de la modificación ni la dinámica sucesional de *Citronella mucronata*.** Esta especie prospera en bosques esclerófilos húmedos o dominados por el género *Nothofagus spp.*, donde los procesos naturales de mortalidad permiten su desarrollo en un equilibrio que las perturbaciones antrópicas suelen desestabilizar³⁴⁹. Dado que las últimas implican un evento de **mayor susceptibilidad a generar degradación**³⁵⁰³⁵¹.

Si bien una apertura del dosel podría incentivar inicialmente el crecimiento de *C. mucronata*, estas áreas son colonizadas con celeridad por especies intolerantes o exóticas con mayores tasas de crecimiento y adaptabilidad a la radiación solar. Este fenómeno de competencia asimétrica puede suprimir a los individuos de la especie focal y conducir a su mortalidad. Asimismo, las alteraciones microclimáticas y la degradación de la matriz suelen persistir a largo plazo, alterando la estructura del bosque. Por lo tanto, es imperativo **evaluar la respuesta de la especie integrando la dinámica de disturbios, la tipología y magnitud de la obra, su temporalidad, la respuesta de su hábitat y los factores de sitio anteriormente descritos.**

Resulta común argumentar que el hábitat de esta especie se define por un radio de dispersión limitado exclusivamente a la barocoria y anemocoria. No obstante, dichas premisas carecen de verificación y evidencia concluyente. Existe un **vacio de información respecto a sus agentes dispersores**, habiéndose postulado relaciones mutualistas con diversas especies de aves que aún **requieren comprobación científica**. Dada la historia evolutiva del género y los patrones observados en especies afines, no es posible descartar la participación de la fauna en su dispersión (zoocoria)³⁵². Por tanto, es improcedente afirmar que su propagación se limita únicamente a la gravedad y al viento sin contar con estudios específicos que sustenten tal restricción.

5.4.1. Sugerencias a considerar en las medidas para la especie

Debido a los rasgos biológicos de *Citronella mucronata*, cualquier estrategia de enriquecimiento o reforestación debe considerar su naturaleza de especie umbrófila que prospera bajo el dosel. Dado que se integra de forma tardía en la dinámica sucesional, su establecimiento exitoso depende de la colonización previa de especies dominantes que provean la cobertura necesaria. Por tanto, es imperativo simular la dinámica sucesional en el sitio de modificación (considerando el estado sucesional a modificar; no es lo mismo restablecer un bosque dominado por especies tolerantes que

³⁴⁹ Donoso, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de Trabajo N° 38. Investigación y desarrollo forestal (CONAF, PNUD, FAO) (Publicación FAO Chile). 70 p.

³⁵⁰ Laurance, W., Camargo, J., Luizao, R., Laurance, S., Pimm, S., Bruna, E., Stouffer, P., Williamson, B., Benítez-Malvido, J., Vasconcelos, H., Van Houtan, A., Zartman, C., Boyle, S., Didham, R., Andrade, A. & Lovejoy, T. 2011. The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation*, 144(1):56-67

³⁵¹ Laurance, W. & Curran, T. 2008. Impacts of wind disturbance on fragmented tropical forests: A review and synthesis. *Austral Ecology*, 33(4):399-408

³⁵² Corvalán, P., González, V. & Estades, C. 2023. Secretos del Naranjillo: Crecimiento, desarrollo y reproducción en bosques cordilleranos dominados por roble. Primera edición. Andros Impresores. 145 pp.

uno dominado por especies intolerantes); si las condiciones de dosel no existen, se debe fomentar primero un estrato superior con especies de la formación original. Solo una vez consolidado este dosel protector, es viable la plantación de *C. mucronata*, integrando especies asociadas según la composición del bosque remanente.

Considerando que esta especie se distribuye en cerca de 36 pisos vegetacionales —con presencia destacada en asociaciones vegetales de *Nothofagus obliqua*, *Cryptocarya alba*, *Persea lingue*, *Peumus boldus* y/o *Lithraea caustica*—, resulta fundamental diagnosticar la composición florística local, dado que no presenta asociaciones rígidas (Corvalán *et al.*, 2014). Como medida complementaria, se sugiere la aplicación de técnicas silviculturales que emulen los disturbios naturales para estimular su crecimiento, siempre supeditadas a las condiciones edafoclimáticas y al estado del bosque remanente.

Resulta imperativo establecer un **programa de control periódico de flora exótica en el área de intervención, abarcando tanto la fase previa a la plantación como el seguimiento posterior**. Se debe priorizar el manejo de especies arbustivas y arbóreas alóctonas que, por su agresividad biológica, puedan competir por recursos, suprimir el desarrollo de los individuos establecidos o inhibir la germinación de las semillas de *Citronella mucronata*.

En relación con el **sustrato**, *Citronella mucronata* presenta preferencia por suelos orgánicos, profundos y de textura franca, con un pH de neutro a ácido, buen drenaje y alta porosidad³⁵³³⁵⁴. En consecuencia, es imperativo realizar análisis de suelos previos para determinar la necesidad de intervenciones como subsolado, enmiendas o adición de materia orgánica (compost o humus) que optimicen el establecimiento de los ejemplares. Respecto a la **topografía**, el sitio ideal debe presentar pendientes entre el 0% y el 15%, rango donde se concentra su mayor frecuencia según registros de ocurrencias de GBIF³⁵⁵ y CONAF. Asimismo, aunque la especie se distribuye en diversas orientaciones, muestra una mayor afinidad por laderas de exposición sur y fondos de quebrada en altitudes bajas. Por lo tanto, el área seleccionada debe reunir estas condiciones o ser adecuada mediante gestión edáfica para garantizar la supervivencia y el desarrollo de la especie a largo plazo.

La planificación y el diseño del sistema de riego deben proyectarse con un enfoque de sostenibilidad a largo plazo, garantizando que la especie alcance la autonomía hídrica tras su fase de establecimiento. En este sentido, se sugiere implementar un régimen de riego que incentive el desarrollo radicular profundo, permitiendo que los ejemplares sobrevivan por sus propios medios una vez que se retire el aporte de agua externo.

Es fundamental que la **procedencia y recolección del germoplasma se realice a nivel local** —preferentemente dentro del área de influencia directa del proyecto—, al igual que la producción de los ejemplares en viveros de la misma zona. Esta estrategia no solo facilita la adaptación y el

³⁵³ Musalem, M. 2019. Agrupación de especies nativas según condiciones agroecológicas aptas para su cultivo. VI Congreso Nacional de Flora Nativa. 29 pp.

³⁵⁴ Donoso, C. 1990. Ecología Forestal. El bosque y su medioambiente. Segunda edición, editorial universitaria. 368 pp.

³⁵⁵ Global Biodiversity Information Facility

establecimiento de los individuos en el sitio de destino, sino que resulta indispensable para salvaguardar la integridad y diversidad genética de las poblaciones locales.

La especie enfrenta una elevada presión por herbivoría, principalmente por parte de lagomorfos y, en menor medida, por ganado bovino, cuya incidencia se correlaciona con la distribución geográfica de la especie. Dado que aproximadamente el 96% de los registros de presencia coinciden con áreas de actividad ganadera, se recomienda la instalación de **protecciones individuales** para cada ejemplar con el fin de mitigar el impacto de los lagomorfos. Respecto al ganado, la necesidad de implementar **cercados de exclusión debe evaluarse según la carga y frecuencia de pastoreo en el sitio**. Se sugiere que los métodos de protección, basados en evidencias como el hallazgo de deyecciones en terreno, sean diseñados de manera que **no restrinjan la conectividad ni la movilidad de la pequeña fauna nativa y sus potenciales dispersores**.

Se sugiere evaluar la susceptibilidad al ataque de plagas y patógenos durante los estadios tempranos de desarrollo, factor determinante en el deterioro de la especie. Es imperativo diseñar planes de acción preventivos con especial énfasis en el control de hongos del género *Capnodium sp.*³⁵⁶ (fumagina), dada su incidencia en el deterioro fisiológico de los ejemplares. Estos protocolos deben integrarse como una variable crítica para asegurar la viabilidad de la población en el largo plazo.

5.5. Alteración de hábitat de *Porlieria chilensis*

En consonancia con lo expuesto anteriormente, existen variables y criterios generales comunes a todas las especies cuyo impacto fluctúa según las condiciones del sitio, las particularidades del proyecto y las características intrínsecas de cada individuo. No obstante, ciertos factores adquieren una relevancia crítica para *Porlieria chilensis* debido a su autoecología específica. Al ser una especie de crecimiento lento y con una recuperación limitada ante perturbaciones. Esta especie se vincula estrechamente a formaciones de espinal y bosques esclerófilos, lo que exige un análisis diferenciado de su resiliencia en estos ecosistemas.

En primer término, es imperativo señalar el estado de conservación de vulnerabilidad de *Porlieria chilensis*, cuyas áreas de distribución han sido sometidas a **procesos de degradación ambiental**³⁵⁷. Estos ecosistemas han sufrido transformaciones drásticas debido a la recurrencia de incendios, el sobrepastoreo caprino y ovino³⁵⁸, y la extracción indiscriminada de biomasa para carbón y artesanía³⁵⁹³⁶⁰³⁶¹. Como consecuencia, el bosque espinoso presenta una sucesión regresiva (Donoso,

³⁵⁶ Echeverría, C. & Rodríguez, R. 2014. Caracterización de *Eulychnia glutinosa*, *Citronella mucronata*, *Prumnopitys andina* y *Orites myrtoidea* según los criterios UICN. Informe Final Fondo de Investigación del Bosque Nativo. 75 p.

³⁵⁷ Vita, A., Luna, G. & Valenzuela, M. 2008. Ensayos de plantaciones de enriquecimiento de guayacán (*Porlieria chilensis* Johnst.) en la zona árida de Chile. Proyecto FIA PI-C-2004-1-F-053, presentado en Congreso Forestal 2008, 10 p.

³⁵⁸ Hechenleitner, P., Gardner, M., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martínez, C. 2005. Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo, Valdivia, 188 p.

³⁵⁹ Serra, M., Gajardo, R. & Cabello, A. 1986. *Porlieria chilensis*, Programa de protección y recuperación de la flora nativa de Chile, Ficha técnica de especies amenazadas, Corporación Nacional Forestal, 23 p.

³⁶⁰ Notton, C. 1987. El Guayacán. Chile Forestal, 142: 16-18.

³⁶¹ Loayza, A., Ríos, R., Carvajal, D. & Gática, A. 2015. Estado de conservación de *Porlieria chilensis*: Evaluación a través de modelos poblacionales matriciales, ecología y patrones de distribución. Fondo de investigación de Bosque Nativo. 28 p.

1981), exacerbada por el cambio de uso de suelo hacia fines agrícolas (destacando la producción de paltos), mineros e inmobiliarios.

Bajo este escenario, las proyecciones de Loayza *et al.* (2015) advierten una pérdida cercana al 60% del hábitat idóneo, lo que se traduciría en una reducción del 40% de sus poblaciones. **La gravedad de estas cifras se acentúa al considerar la escasa representatividad de la especie en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), donde apenas se registra en un 0,39% de sus ocurrencias.**

Ante este panorama, se han identificado variables críticas para evaluar la respuesta de la especie frente a la modificación del paisaje. **Además de los criterios generales, es imperativo analizar la diversidad y representatividad de los estratos arbóreo y arbustivo.** Si bien los ecosistemas donde habita *Porlieria chilensis* poseen una diversidad intrínsecamente baja, una alta riqueza relativa y una buena representación de especies acompañantes suelen ser indicadores de integridad ecológica. Paradójicamente, en estos sitios de mayor complejidad estructural, se prevé una respuesta más desfavorable de *P. chilensis* ante la alteración del hábitat en comparación con entornos más uniformes, debido a la ruptura de los equilibrios específicos del sitio y la competencia resultante.

Por otra parte, se observa que cualquier modificación del paisaje conlleva un incremento sustancial en la **cobertura de flora exótica, predominantemente especies herbáceas con potencial alelopático**³⁶²³⁶³. Dada su alta densidad, estas pueden comprometer la regeneración sexual y asexual de *Porlieria chilensis*, además de ejercer una intensa competencia por radiación solar en los estadios tempranos de desarrollo de esta última. Algunas herbáceas alóctonas alcanzan alturas superiores a un metro y mantienen una persistencia fenológica mayor que las nativas³¹⁵, aventajándolas gracias a su alta plasticidad y capacidad reproductiva. Si bien es imperativo profundizar en el estudio del efecto alelopático como vector de degradación ecosistémica, actualmente el análisis debe centrarse en la **competencia directa por recursos**, la cual resulta crítica debido al crecimiento extremadamente lento de *P. chilensis*.

En consecuencia, resulta imperativo analizar la composición, representatividad y uniformidad de las especies en las formaciones remanentes para determinar la magnitud de la alteración del hábitat. Esta evaluación es crítica dado el precario estado de conservación de la especie y la presión antrópica sostenida sobre sus poblaciones en su área de distribución geográfica. Es vital, por tanto, promover investigaciones que permitan cuantificar con mayor precisión el impacto de diversos factores de estrés sobre *Porlieria chilensis*. Asimismo, debe considerarse que un alto porcentaje de su propagación depende de la zoocorria, donde aves y cánidos³⁶⁴³⁶⁵³⁶⁶ —como el zorro

³⁶² Fuentes, N., Sánchez, P., Pauchard, A., Urrutia, J., Cavieres, L. & Marticorena, A. 2014. Plantas invasoras del centro-sur de Chile: una guía de campo. Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB), Concepción, Chile.

³⁶³ Soumoulo, M. 2021. Estudios preliminares sobre el efecto alelopático de cultivares de Avena y Centeno sobre el establecimiento inicial de malezas anuales. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía. 52 p.

³⁶⁴ Silva, S. 2001. Ecología trófica y nutricional del zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*): restricciones digestivas y energéticas asociadas a la frugivoría y sus efectos sobre la dispersión de semillas. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 199 pp.

³⁶⁵ Cabello, A., Valdés, P., Escobar, D. & Letelier, P. 2014. Efecto de la temperatura y de la aplicación de tratamientos pregerminativos sobre la germinación de semillas de *Porlieria chilensis* I. M. Johnst., guayacán. Revista Chagual 11:61-71.

(*Lycalopex spp.*)— actúan como dispersores clave; cualquier modificación del paisaje que interfiera con el comportamiento de estos agentes puede comprometer seriamente la dinámica regenerativa de la especie.

5.5.1. Sugerencias a considerar en las medidas para la especie

Para el establecimiento de *Porlieria chilensis*, es imperativo diagnosticar el estado del sustrato en las áreas de modificación, dado que la degradación y compactación edáfica donde se presenta la especie suelen ser moderados a severos, lo cual puede ser un vector de su escasa regeneración natural. Esta especie muestra preferencia por suelos de texturas gruesas (francas a franco-arenosas), caracterizados por un drenaje eficiente, porosidad adecuada, pH neutro a ligeramente ácido y ausencia de salinidad³⁶⁷. Topográficamente, si bien tolera pendientes de hasta el 30%³⁶⁸, su mayor abundancia se registra en rangos de 0% a 15% (según datos de GBIF y CONAF). En cuanto a la exposición, aunque posee una amplia distribución, destaca su frecuencia en laderas de orientación Oeste y Sureste. En consecuencia, la selección del sitio debe priorizar estas condiciones o asegurar su generación mediante obras de suelo, tales como subsolado, aplicación de enmiendas e incluso medidas de conservación de suelo, con el fin de generar las condiciones propicias para el establecimiento y desarrollo de la especie en el tiempo.

Es fundamental destacar que esta especie, en concordancia con la dinámica de los ecosistemas mediterráneos, tiende a establecerse bajo el dosel de plantas nodrizas. Estas proporcionan un microclima esencial que protege a los individuos de factores estresantes como heladas, desecación y herbivoría, además de mejorar la disponibilidad de humedad y nutrientes³⁶⁹³⁷⁰. En el caso de *Porlieria chilensis*, se observa una asociación recurrente con taxones como *Prosopis chilensis*, *Schinus polygama*, *Acacia caven*, *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica*³¹⁴, todas especies con comportamiento de planta nodrizas³⁷¹³⁷²³⁷³³⁷⁴³⁷⁵³⁷⁶. En consecuencia, y dependiendo de la fenología y

³⁶⁶ Cartes-Rodríguez, E., Álvarez-Maldini, C., Acevedo, M., González-Ortega, M., Urbina-Parra, A. & León-Lobos, P. 2022. Pre-Germination Treatments at Operational Scale for Six Tree Species from the Sclerophyll Forest of Central Chile. *Plants* 2022, 11, 608.

³⁶⁷ González, D. 2018. Propiedades edáficas asociadas a comunidades de *Porlieria chilensis* Johnst y su potencial uso para la conservación de esta especie. Proyecto de grado presentado como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. 115 pp.

³⁶⁸ Hechenleitner, P., Gardner, M., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martínez, C. 2005. Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo, Valdivia, 188 p.

³⁶⁹ Callaway, R. 1992. Effect of shrubs on recruitment of *Quercus douglasii* and *Quercus lobata* in California. *Ecology*, 73(6), 2118-2128.

³⁷⁰ Domingo, F., Villagarcía, L., Brenner, A., & Puigdefábregas, J. 1999. Evapotranspiration model for semi-arid shrublands of SE Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(2), 141-157.

³⁷¹ Root-Bernstein, M., Valenzuela, R., Armesto, J. & Jaksic, F. 2017. *Acacia caven* nurses endemic sclerophyllous trees along a successional pathway from silvopastoral savanna to forest. *Ecosphere*, 8(2):e01667.

³⁷² Rossi, B. & Villagra, P. 2003. Effects of *Prosopis flexuosa* on soil properties and the spatial pattern of understorey species in arid Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 14(4):543-550.

³⁷³ Squeo, F., Holmgren, M., Jiménez, M., Albán, L., Reyes, J. & Gutiérrez, J. 2007. Tree establishment along an ENSO experimental gradient in the Atacama desert. *Journal of Vegetation Science*, 18(2):195-202

³⁷⁴ Becerra, P., Arellano, E., Villagrosa, A. & Hernández, G. 2024. The provision of water and shade but not soil amendments in degraded habitats increases the seedling survival of woody species in restoration processes of the Chilean sclerophyllous forest. *Trees*, 38(3):1-13

dimensiones del ejemplar, se debe evaluar su plantación bajo cobertura natural o, en su defecto, implementar medidas de protección artificial que emulen estas condiciones hasta lograr su establecimiento y persistencia en el sitio.

Resulta innegable el impacto adverso de la ganadería sobre las formaciones vegetales que albergan a *Porlieria chilensis*. En consecuencia, es altamente recomendable implementar **perímetros de exclusión ganadera, complementados con protecciones individuales para cada ejemplar debido a la elevada presión por herbivoría de lagomorfos en el territorio**. El diseño de estas exclusiones debe priorizar la permeabilidad para la fauna nativa mediante el uso de **elementos disuasivos específicos para el ganado**. Dado que el zorro (*Lycalopex spp.*) es un agente dispersor fundamental para *P. chilensis*, asegurar su movilidad es imperativo para la dinámica regenerativa y la continuidad de la especie. Asimismo, la erradicación del pastoreo o la evaluación de la capacidad de carga en estas áreas es una condición crítica para la recuperación del ecosistema.

Es fundamental que la **procedencia y recolección del germoplasma se realice a nivel local** —preferentemente dentro del área de influencia directa del proyecto—, al igual que la producción de los ejemplares en viveros de la misma zona. Esta estrategia no solo facilita la adaptación y el establecimiento de los individuos en el sitio de destino, sino que resulta indispensable para salvaguardar la integridad y diversidad genética de las poblaciones locales.

En ecosistemas de zonas áridas, semiáridas y mediterráneas con regímenes hídricos limitados, el **diseño de los sistemas de riego debe priorizar el estímulo del crecimiento radicular profundo**. Este enfoque facilita la aclimatación paulatina de los individuos a la eventual supresión del riego. Toda planificación estratégica debe orientarse hacia la autonomía de la plantación, garantizando que los ejemplares introducidos restablezcan las funciones ecológicas de la formación original de manera independiente. Por **consiguiente, asegurar la capacidad de autosustentación de la cobertura vegetal es un requisito indispensable para garantizar la continuidad de la especie en el largo plazo**.

³⁷⁵ Gutiérrez, J., Meserve, P., Contreras, L. Vásquez, H. & Jaksic, F. 1993. Spatial distribution of soil nutrients and ephemeral plants underneath and outside the canopy of *Porlieria chilensis* shrubs (Zygophyllaceae) in arid coastal Chile. *Oecologia*, 95:347-352

³⁷⁶ Velasco, N., Soto-Agurto, C., Carbone, L., Massi, C., Bustamante, R. & Smit, C. 2024. Large-scale facilitative effects for a single nurse shrub: Impact of the rainfall gradient, plant community and distribution across a geographical barrier. *Journal of Ecology*, 112(2):233-245

6. Estrategias para mejorar la evaluación de la alteración de hábitat

6.1. Determinación de la demografía poblacional y sus tendencias.

El objetivo de esta propuesta es determinar si la modificación del paisaje y la consecuente alteración del hábitat comprometen la viabilidad de la especie a largo plazo y si podrían derivar en una extinción local. Asimismo, busca establecer el umbral crítico de remoción de ejemplares sin comprometer la estabilidad demográfica. Actualmente, la toma de decisiones enfrenta un elevado grado de incertidumbre debido a la falta de antecedentes sobre la resiliencia de las subpoblaciones ante perturbaciones antrópicas. Bajo el paradigma de metapoblaciones³⁷⁷, el desconocimiento del valor conectivo de una subpoblación específica impide prever si su pérdida afectará la persistencia de otros núcleos poblacionales. En consecuencia, integrar estudios demográficos precisos permitirá gestionar los proyectos de manera sustentable, mitigando los sesgos derivados del limitado conocimiento actual sobre los ecosistemas chilenos

Esta información constituye un insumo crítico para el diseño de medidas de restauración, compensación y mitigación, fortaleciendo la gestión de los recursos naturales y la conservación de ecosistemas en el país. Resulta pertinente señalar que algunas especies son categorizadas bajo estados de conservación debido a sus densidades poblacionales, aun cuando la información al respecto es contradictoria y sin metodologías robustas. En Chile, el caso de *Citronella mucronata* podría ilustrar esta inconsistencia informativa: mientras que ciertos registros identifican solo 6.633 individuos maduros y 182 poblaciones (algunas mononuméricas), Ramírez *et al.* (2025)³⁷⁸ estiman una población de 128.987 individuos reproductivos entre las regiones del Maule y Biobío, basándose en datos de terreno y registros de presencia. Pese a las posibles contradicciones metodológicas de dicho estudio, las cifras contrastan con lo expuesto por Echeverría y Rodríguez (2014)³⁷⁹, quienes reportan una disminución poblacional del 9,1% en la última década.

Por otro lado, Corvalán *et al.* (2023)³⁸⁰ sugieren una estructura poblacional estable, con una densidad de 117 individuos por hectárea (DAP > 5 cm) y distribución agrupada en la precordillera del Maule. Si bien este análisis carece de la dimensión temporal necesaria para confirmar el autorreemplazo, aporta antecedentes sobre la resiliencia de ciertos núcleos. No obstante, persiste la incertidumbre sobre el umbral mínimo de individuos requerido para garantizar la viabilidad poblacional o para conocer sus tendencias poblacionales en el tiempo, considerando que cada sitio presenta condiciones ambientales y factores de perturbación particulares.

El conocimiento de las tendencias poblacionales es fundamental para determinar si las poblaciones presentan un decrecimiento y para establecer umbrales de manejo sustentable, es

³⁷⁷ Levins, R. 1969. Some Demographic and Genetic Consequences of Environmental Heterogeneity for Biological Control. Bulletin of the Entomological Society of America 15:237-240.

³⁷⁸ Ramírez, P., Sepulveda, J. & Alarcón, D. 2025. Estimación del tamaño poblacional mínimo de *Citronella mucronata* (Ruiz & Pav.) D. Don (Cardiopteridaceae), árbol endémico de Chile. *Chloris Chilensis* 28 (1):182-197.

³⁷⁹ Echeverría, C. & Rodríguez, R. 2014. Caracterización de *Eucryphia glutinosa*, *Citronella mucronata*, *Prumnopitys andina* y *Orites myrtoidea* según los criterios UICN. Informe Final Fondo de Investigación del Bosque Nativo. 75 p.

³⁸⁰ Corvalán, P., González, V. & Estades, C. 2023. Secretos del Naranjillo: Crecimiento, desarrollo y reproducción en bosques cordilleranos dominados por roble. Primera edición. Andros Impresores. 145 pp.

decir, cuántos y qué individuos pueden extraerse sin comprometer la viabilidad de la población o contribuir a su extinción local. Esto permite priorizar la asignación de recursos y el diseño de medidas coherentes con el estado real de vulnerabilidad de cada núcleo poblacional. Un referente internacional de esta aproximación es el proyecto español “Inventario Nacional de Biodiversidad. Poblaciones en peligro: viabilidad demográfica de la flora vascular amenazada en España” (2009)³⁸¹. Esta iniciativa cuantificó la viabilidad demográfica de especies amenazadas mediante un seguimiento de seis años sobre 37 especies, 65 poblaciones y más de 13.000 individuos, generando información crucial sobre el balance entre mortalidad y reclutamiento, y la probabilidad de extinción futura.

Es fundamental comprender el concepto de población de manera ecológica como el conjunto de individuos de una misma especie o taxón, aislados de otros grupos **por distancias que tornan esporádico o despreciable el flujo genético**; en el caso de la flora, este aislamiento está determinado por el alcance de la polinización y la dispersión de semillas. Para el análisis de viabilidad, lo óptimo es estudiar la totalidad de las poblaciones conocidas, dada la variabilidad espacio-temporal de sus dinámicas genéticas, demográficas y ambientales. Ante la imposibilidad de un censo total, se debe **asegurar la representatividad de dicha variabilidad** mediante muestreos estratificados por pisos vegetacionales o áreas de influencia (buffers) que integren las variables del entorno. No obstante, debe precisarse que los datos obtenidos en poblaciones no monitoreadas tendrán un carácter meramente referencial, ya que la determinación precisa de las tendencias poblacionales exige una medición directa. Para la estructuración de los pasos necesarios para esta estrategia, **se adoptará el marco metodológico propuesto por Iriondo *et al.* (2009) respecto a las etapas necesarias para el análisis demográfico de especies amenazadas**.

6.1.1. Duración del monitoreo

Los estudios demográficos deben proyectarse en un horizonte temporal que permita capturar las dinámicas poblacionales de la especie objetivo. El diseño debe responder a la autoecología y al ciclo biológico; idealmente, debería abarcar un ciclo vital completo. No obstante, en especies de alta longevidad como *Fitzroya cupressoides* (Alerce), esto resulta inviable sin políticas de Estado a largo plazo.

En consecuencia, se sugiere que el monitoreo cubra, al menos, la transición desde el estado de regeneración hasta la fase reproductiva, o un periodo suficiente para evaluar el reclutamiento y la mortalidad. Para especies como *Porlieria chilensis* y *Citronella mucronata*, se recomienda un mínimo de 5 a 10 años. En el caso de herbáceas y geófitas, un periodo de 5 años es técnicamente aceptable para identificar tendencias poblacionales.

6.1.2. Diseño de muestreo

Se utilizarán unidades de muestreo (parcelas) cuadrangulares o rectangulares, georreferenciadas en su centro y vértices, asegurando la identificación de las vías de acceso para el seguimiento. La superficie de muestreo estará supeditada al tipo biológico y al entorno:

³⁸¹ Iriondo, J. M., Albert, M. J., Giménez Benavidez, L., Domínguez Lozano, F. & Escudero, A. (Eds.) 2009. Poblaciones en peligro: Viabilidad Demográfica de la Flora Vascular Amenazada de España. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid, 242 pp.

- **Poblaciones pequeñas y homogéneas (<3.000 individuos):** Se establecerán parcelas que integren idealmente 300 individuos, censando cada ejemplar independientemente de su estado de desarrollo. Si no se alcanza este número, se podrán disponer tres parcelas de 100 individuos cada una. En presencia de diversos microhábitats, las parcelas deben distribuirse de forma representativa.
- **Poblaciones grandes y homogéneas:** Se establecerán al menos dos parcelas que cubran el 5% de la población (con un máximo de 300 individuos por unidad).
- **Poblaciones grandes y heterogéneas:** Se requieren al menos dos parcelas ubicadas en áreas representativas de cada microhábitat. Si la densidad es baja, se permite aumentar el número de parcelas reduciendo el número de individuos por unidad (ej. 12 parcelas de 100 individuos en lugar de 4 de 300).
- **Poblaciones críticas (<100 individuos):** Se debe censar el máximo número de ejemplares posibles, instalando idealmente más de una parcela por población.

6.1.3. Identificación espacial de los individuos

El objetivo es realizar un seguimiento individualizado de la supervivencia, crecimiento, reproducción y mortalidad. Se recomienda hacer coincidir el monitoreo con el periodo de fructificación para capturar datos reproductivos y de vigor simultáneamente.

Es fundamental identificar entidades genéticas discretas. En especies con reproducción asexual o clonal, **los clones no deben contabilizarse como individuos nuevos.** Ante la inviabilidad de realizar excavaciones en especies protegidas para verificar el origen, se establece que una entidad genética será considerada independiente si la distancia entre tallos o ejes es superior a la distancia promedio de los brotes del mismo individuo. En caso de ambigüedad, se priorizará el registro como individuos independientes.

Los ejemplares se identificarán mediante etiquetas, banderillas o marcas en elementos abióticos contiguos (rocas). En especies anuales, la marcación individual es excepcional, salvo en estudios específicos de fenología. La identificación espacial de los individuos se puede llevar a cabo mediante diferentes métodos de mapeo:

- **Láminas de acetato o plásticos:** Útil para proyectar el contorno de plantas pequeñas (ej. cactáceas como *Eriosyce spp.* o geófitas). Requiere cautela para evitar daños mecánicos.
- **Cuadrículas de precisión:** Uso de marcos (PVC) o cuerdas tensadas para identificar individuos mediante coordenadas locales. Ideal para altas densidades o plántulas.
- **Georreferenciación (GPS):** Aplicable solo a árboles o arbustos de grandes dimensiones debido al margen de error de los dispositivos estándar.
- **Posicionamiento relativo:** Determinación de ubicación mediante brújula y distancia desde un punto de referencia georreferenciado (ej. vértice de la parcela). Es fundamental documentar el individuo de origen para minimizar errores acumulativos.

- **Coordenadas polares (Triangulación):** Método basado en dos puntos fijos (a y b) en la base de la parcela considerando que c es la distancia entre los polos que corresponde a la “base” del mapa generado. Permite calcular coordenadas cartesianas mediante la fórmula:

$$x = \frac{(c^2 + b^2 - a^2)}{2c} \quad \text{e} \quad y = (b^2 - x^2)^{0,5}$$

Es altamente preciso en hábitats no forestales, donde es posible desplazar las huinchas métricas de uno a otro individuo sin que se enrede en árboles o arbustos.

- **Fotogrametría e identificación fotográfica:** Serie fotográfica digital que, al incluir escalas (reglas), permite el análisis de crecimiento mediante software especializado (ej. ImageJ). Debe emplearse siempre como complemento a los métodos anteriores para garantizar la precisión espacial.

6.1.4. Mediciones de terreno

6.1.4.1. Biometría de los individuos

Dada la heterogeneidad morfológica de las especies con problemas de conservación, los parámetros de medición deben adaptarse al tipo biológico. Para ejemplares arbóreos y arbustivos, se registrará obligatoriamente el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), el Diámetro a la Altura del Cuello (DAC) y/o la altura máxima. Para otros tipos biológicos, se considerarán la altura total, el diámetro basal y las dimensiones de la copa o cobertura (medidas perpendicularmente).

6.1.4.2. Estados fenológicos y de desarrollo

Siempre que la biología de la especie lo permita, se categorizarán los individuos en tres estados:

- **Plántula:** Individuos menores a un año de edad.
- **Vegetativo:** Individuos juveniles o adultos sin estructuras reproductivas visibles.
- **Reproductivo:** Individuos con presencia de flores, frutos o estructuras seminíferas.

En casos donde se desconozca la morfología de las plántulas, se recomienda la recolección de germoplasma para realizar siembras controladas que faciliten su identificación técnica en terreno. Es imperativo considerar que en especies leñosas longevas —como *Jubaea chilensis* (Palma chilena)— el reclutamiento puede ser esporádico y responder a ciclos plurianuales.

Respecto a la mortalidad, esta debe registrarse sistemáticamente. En el caso de las geófitas, debido a su capacidad de entrar en latencia, un individuo **sólo se considerará muerto tras su ausencia en al menos dos períodos de seguimiento consecutivos**.

6.1.4.3. Evaluación de la producción de frutos y semillas

La fructificación es altamente sensible a las variables ambientales y la estacionalidad. Ante la falta de información bibliográfica, se deben realizar visitas recurrentes durante los períodos de antesis y

maduración para determinar la fenología poblacional y la sincronía reproductiva. Junto a evaluar la persistencia de la estructura reproductiva post maduración.

Para la estimación de la carga reproductiva, se establecen los siguientes criterios:

- **Censo total:** Aplicable si el número de estructuras (botones, flores o frutos) es inferior a 100.
- **Estimación por extrapolación:** Si la producción es homogénea, se contabilizará una sección proporcional de la estructura vegetal y se proyectará al total de la planta.
- **Estimación por inflorescencias:** En producciones heterogéneas, se determinará la relación entre el número total de inflorescencias y el número medio de frutos por inflorescencia. Para ello, se requiere una muestra mínima de 30 inflorescencias por individuo, seleccionadas aleatoriamente en al menos el 10% de la población.

Para cuantificar la producción de semillas por fruto, se recolectarán de 1 a 2 frutos de al menos 30 individuos fuera de las parcelas de monitoreo. El recuento se realizará en laboratorio antes del inicio de la dispersión natural.

6.1.4.4. Mediciones adicionales

- **Interacciones bióticas:** Se registran evidencias de herbivoría, parasitismo o depredación, cuantificando el daño mediante porcentajes de superficie afectada o clases de severidad.
- **Reproducción asexual:** Se identifica la propagación vegetativa vinculando el nuevo vástago al individuo parental más cercano.
- **Tasas de germinación in situ:** Ante la dificultad de rastrear la dispersión natural, se sugiere la siembra de un número conocido de semillas en al menos 5 réplicas distribuidas en la población para evaluar el éxito de emergencia. Se debe advertir que este método puede sobreestimar el reclutamiento real por sobre el natural.
- **Banco de semillas del suelo:** En especies anuales, se deben recolectar al menos 50 muestras de los primeros 3 cm de suelo (mínimo 200 cm³ por muestra) antes de la dispersión. En laboratorio, se determinará la densidad de semillas viables mediante pruebas de germinación (mínimo dos meses) o inspección directa del sustrato.

6.1.5. Análisis de datos

6.1.5.1. Modelamiento mediante matrices de transición

A partir de los datos recolectados, se procederá a la construcción de matrices de transición de Lefkovitch³⁸² para proyectar la dinámica demográfica de cada población. Este análisis sintetiza las

³⁸² Lefkovitch, L. 1965. The study of population growth in organisms grouped by stages. Biometrics, 21:1-18.

tasas de crecimiento, supervivencia y reproducción de los individuos monitoreados, organizándolos en categorías de estados vitales o clases de tamaño específicas.

La categorización inicial se fundamenta en el estado de desarrollo (plántula, vegetativo y reproductivo). Para optimizar la homogeneidad y representatividad de las clases, estas podrán subdividirse mediante el análisis de la relación entre las tasas vitales y variables biométricas (altura, diámetro o número de ramificaciones). La variable con mayor capacidad explicativa sobre la varianza de las tasas vitales será la seleccionada para definir los intervalos de clase (utilizando, por ejemplo, análisis de k-medias).

La fecundidad o contribución reproductiva (elementos $F_{i,t}$ de la matriz) se estima relacionando el esfuerzo reproductivo medio de cada clase en el tiempo t con la emergencia de plántulas en el tiempo $t+1$, mediante la ecuación³⁸³:

$$F_{i,t,t+1} = \frac{P_{t+1} * R_{i,t}}{\sum_{i=1}^N (R_{i,t} * n_{i,t})}$$

Donde $F_{i,t,t+1}$ es el valor de fecundidad de la clase i para el período t al $t+1$, P_{t+1} es el número total de plántulas censadas en la población en el tiempo $t+1$, $R_{i,t}$ es la contribución proporcional al esfuerzo reproductivo total de la clase i , N es el número de clases y $n_{i,t}$ es el número de individuos de clase i en el tiempo t .

En ecosistemas con banco de semillas permanente, el cálculo debe integrar tasas de viabilidad y depredación post-dispersión para determinar la incorporación efectiva al banco. Finalmente, se generarán pirámides poblacionales anuales para visualizar la estructura de clases.

6.1.5.2. Determinación de parámetros demográficos

Se calculará la tasa finita de crecimiento poblacional (λ) como el valor propio dominante de la matriz de transición. Este valor representa la tasa de crecimiento bajo una distribución estable de estados, asumiendo ausencia de densidad-dependencia, estocasticidad y migración. Para el periodo total de monitoreo, con los valores de λ de cada período se debe calcular la λ estocástica, una medida del valor de λ para todo el período de monitoreo:

$$\lambda_G = (\lambda_1)^{1/t} * (\lambda_2)^{1/t} * (\lambda_3)^{1/t} * \dots * (\lambda_t)^{1/t}$$

Donde λ_G es la medida geométrica del valor de λ (λ estocástica) y t es el número de años para los que se realiza el monitoreo.

Si se dispone de información climática detallada o registros de disturbios, la probabilidad de ocurrencia de cada intervalo podrá ajustarse para ponderar eventos extremos o años atípicos. Asimismo, se realizarán análisis de elasticidad para identificar los estados vitales con mayor impacto relativo sobre λ . Las elasticidades cuantifican la contribución proporcional de cada elemento de la matriz al crecimiento poblacional, permitiendo priorizar acciones de manejo en las

³⁸³ Caswell, H. 2001. Matrix population Models: Construction, analysis and interpretation 2nd Ed. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, USA.

etapas más críticas del ciclo de vida. Adicionalmente, se calculará la esperanza de vida al nacer, derivada de la matriz de transición fundamental. Es pertinente notar que este valor suele ser inferior a la longevidad percibida en terreno, dado que integra la alta mortalidad de los estados iniciales.

6.1.5.3. Proyección de reducción poblacional y riesgo de extinción

El grado de amenaza se debe evaluar bajo los estándares de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), aplicando los siguientes criterios:

- **Criterio A3(b):** Reducción proyectada del tamaño poblacional en un horizonte de 10 años, basada en índices de abundancia específicos para el taxón.
- **Criterio E:** Análisis cuantitativo de la probabilidad de extinción en períodos de 10, 20 y 100 años.

La reducción poblacional se estimará mediante simulaciones de Análisis de Viabilidad Poblacional (PVA), incorporando la estocasticidad ambiental según los modelos de Morris y Doak (2002)³⁸⁴. La probabilidad de extinción (tamaño poblacional igual a cero) se puede modelar mediante entornos de programación como R o software especializado (ej. RAMAS GIS³⁸⁵), garantizando que la aprobación o modificación de proyectos se sustente en una base científica robusta y auditável.

Es fundamental subrayar que, sin la información demográfica descrita, resulta inviable garantizar que una modificación del paisaje —sea por la eliminación, corte o descepado de individuos de Especies en Categoría de Conservación (ECC), obras o actividades del proyecto— no generará alteraciones significativas en el hábitat, ni comprometerá la continuidad espacio-temporal de la especie o aumentará su probabilidad de extinción local. **La ausencia de estos datos impide prever efectos a largo plazo que solo se manifiestan años después de la perturbación. Dicha información es crucial para establecer el umbral mínimo de individuos requerido que garantice la viabilidad poblacional y permita un manejo sostenible de nuestros ecosistemas.** La implementación de estos estudios debe ser fomentada mediante investigación y estrategias nacionales, ya que sus aplicaciones son transversales a la gestión territorial, la planificación de medidas de mitigación, compensación y restauración, y la conservación in situ.

6.2. Resiliencia de ecosistemas

La incorporación del concepto de **resiliencia de los ecosistemas** es fundamental para una evaluación integral de los ecosistemas y de la alteración de hábitat. Este enfoque proporciona una perspectiva crucial sobre la **reversibilidad del impacto** en función de la escala de intervención, tanto a nivel espacial como temporal. Entender la resiliencia no solo permite establecer **escalas de severidad de la alteración de hábitat**, sino que también es clave para determinar si una alteración es intrínsecamente reversible o irreversible sin esfuerzos adicionales y el tiempo necesario para su recuperación y cómo acelerar este proceso.

³⁸⁴ Morris, W. & Doak, D. 2002. Quantitative Conservation Biology. Theory and Practice of Population viability analysis. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts, USA.

³⁸⁵ Akcakaya, H. 2002. RAMAS GIS: Linking Spatial Data with Population Viability Analysis. Applied Biomathematics, Setauket, New York.

Esta información de alta calidad es esencial para la **definición y diseño de medidas de mitigación y compensación** más efectivas y realistas. El conocimiento de la capacidad de recuperación intrínseca de un ecosistema permite una **mejor gestión territorial** y una planificación de obras más estratégica. Lógicamente, es preferible y más eficiente intervenir áreas con una alta capacidad de recuperación natural (resiliencia) ante la magnitud de la perturbación, en contraste con áreas que carecen de esta capacidad y, por lo tanto, requieren de medidas de conservación intensivas y costosas para su restauración.

Más allá de la alteración de hábitat directa por proyectos, la resiliencia es un concepto transversal y de gran utilidad en otras áreas de la conservación y la gestión de recursos naturales. Permite comprender y predecir la **respuesta de las formaciones vegetales** a diversos tipos de disturbios naturales y antrópicos, tales como:

- **Incendios forestales:** Evaluando la capacidad del ecosistema de regenerarse *post-fuego* sin intervención.
- **Deslizamientos de tierra y eventos geomorfológicos:** Comprendiendo la velocidad y el patrón de recolonización vegetal.
- **Ataques de plagas y enfermedades:** Analizando la resistencia y la recuperación de la comunidad biológica.
- **Eventos de sequía o inundaciones:** Midiendo la tolerancia a la escasez o el exceso hídrico.
- **Disturbios y perturbaciones naturales y antrópicas** en general.

Adicionalmente, el estudio de la resiliencia se vuelve vital en el contexto del **cambio climático**, ayudando a evaluar cómo diferentes zonas podrán adaptarse a nuevas condiciones ambientales y cómo se puede **garantizar la sostenibilidad y la continuidad de los servicios ecosistémicos** clave en el territorio. Este conocimiento avanzado facilita una mejor evaluación de la alteración de hábitat y la **continuidad de las especies**, y es fundamental para generar **herramientas útiles para la gestión de desastres** (p. ej., post-incendio), la planificación territorial y la priorización de recursos de conservación.

Relacionado con la resiliencia, el concepto de **resistencia** complementa la evaluación al proporcionar información sobre **cuánto puede soportar** una formación vegetal o un ecosistema sin sufrir una modificación significativa o un cambio de estado permanente (umbral de alteración) ante una perturbación determinada³⁸⁶.

Si bien el estudio de la resiliencia a gran escala mediante **imágenes satelitales** presenta aún ciertas **contrariedades metodológicas** y, en ocasiones, resultados inconsistentes o sesgados (lo que sugiere la necesidad de validar métricas de mayor relevancia antes de su aplicación masiva), existen oportunidades inmediatas para estudios *in situ* de alto valor.

³⁸⁶ Rungue, K., Tucker, M., Crowther, T., Fournier de Lauriere, C., Guirado, E., Bialic-Murphy, L. & Berdugo, M. 2025. Monitoring Terrestrial Ecosystem Resilience Using Earth Observation Data: Identifying Consensus and Limitations Across Metrics. Wiley, Global Change Biology, 31(3):e70115.

Se recomienda enfáticamente la realización de **estudios en terreno** en zonas de obras temporales asociadas a proyectos (por ejemplo, caminos de acceso provisionales o áreas de acopio). Estos estudios deben centrarse en evaluar si el ecosistema, bajo una intervención específica, es capaz de **recuperarse por sí solo** y, en su caso, determinar el **tiempo requerido** para lograr dicha recuperación. Esto implica medir las **condiciones iniciales** del bosque (estructura, composición florística, biomasa) antes de la intervención y monitorear su evolución posterior³⁸⁷. Esta aproximación de campo puede ser enriquecida mediante la **complementación con información satelital** para escalar los resultados y ser útil para evaluar el comportamiento de otros sistemas, tomando como referencia investigaciones previas relevantes como la realizada por Rungue *et al.* (2025).

Una metodología análoga puede ser aplicada en **zonas afectadas por incendios forestales** que no hayan sido sometidas a programas de reforestación o restauración activa. La observación de la regeneración natural en estas áreas proporciona datos empíricos directos sobre la resiliencia del ecosistema al fuego.

En resumen, el conocimiento preciso de la resiliencia de un ecosistema permite determinar si este podrá **volver a su condición previa** a una perturbación, y, crucialmente, si es capaz de **revertir los efectos de la alteración de hábitat**. Esta información es determinante para **asignar de manera eficiente los esfuerzos** y recursos en las medidas de continuidad de las especies, priorizando las intervenciones de acuerdo con la capacidad intrínseca de recuperación de los bosques y la naturaleza de las perturbaciones a las que están sujetos.

6.3. Distancias de alteración de hábitat

Como complemento a las medidas propuestas por el titular del proyecto, se sugiere el establecimiento de una estrategia colaborativa entre la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y los proponentes para la creación de estaciones de monitoreo permanente. Estas estaciones permitirán cuantificar variables críticas en la alteración del hábitat y evaluar la dinámica de los efectos de borde en áreas intervenidas. El objetivo primordial es desarrollar modelos predictivos que integren las particularidades de cada proyecto —tales como la superficie de perturbación, la tipología de la obra y las variables topográficas, climáticas, edáficas y bióticas— otorgando un rigor técnico y una representatividad real a las evaluaciones de impacto ambiental.

Para este propósito, es necesario establecer protocolos de monitoreo anual con un horizonte temporal de entre 5 y 30 años; este último periodo es esencial para analizar variables de respuesta lenta, como el pH del suelo. El seguimiento sistemático permitirá evaluar los factores determinantes en la magnitud y frecuencia de la alteración del hábitat. La integración de estos datos, provenientes de diversas tipologías de proyectos, facilitará el ajuste y la validación de un modelo predictivo capaz de cuantificar con precisión la extensión espacial de la perturbación o, en su defecto, confirmar la ausencia de impactos significativos en el ecosistema.

³⁸⁷ Bryant, T., Waring, K., Sánchez, A. & Bradford, J. 2019. A Framework for Quantifying Resilience to Forest Disturbance. *Frontiers in Forest and Global Change*, 2(56):1-14.

Es fundamental evaluar cuáles son las **variables con mayor poder predictivo sobre la alteración del hábitat**. La identificación de estos indicadores clave —sean estructurales, de composición, de funcionalidad o abióticos— resulta esencial para el desarrollo de un modelo robusto, ya que constituirán los **principales predictores de la magnitud y ocurrencia de dicha alteración**.

Para la construcción de este tipo de modelos, la implementación de **modelos de efectos mixtos no lineales resulta efectiva para la reducción de errores**. Su ventaja radica en la capacidad de integrar la estructura jerárquica de los datos, permitiendo que los parámetros de efectos fijos (comunes entre unidades de muestreo, como el DAP o la cobertura) varíen en función de los efectos aleatorios (específicos de cada parcela o zona, como la topografía, el clima o la tipología de la obra)³⁸⁸³⁸⁹. Esta estructura jerárquica y el uso de efectos aleatorios permiten controlar la variabilidad inherente a cada ubicación geográfica o unidad de muestreo³⁹⁰. Estos modelos pueden desarrollarse para cada Especie con Problemas de Conservación individualmente o bien **incorporar la especie como un efecto aleatorio, integrando así la variabilidad interespecífica**.

Existen **modelos predictivos basados en la generación de bordes**, como el modelo de Efectos de Borde de Carbono de InVEST³⁹¹. Desarrollado específicamente para bosques tropicales, esta herramienta cuantifica la degradación de las reservas de carbono integrando la relación entre el almacenamiento de biomasa y la distancia al borde forestal. Para representar dicha relación, se evalúan tres modelos de regresión, seleccionando aquel que presente el mayor coeficiente de determinación R^2 . Los modelos considerados son:

1. $Biomasa = \theta_1 - \theta_2 * \exp \exp (-\theta_3 * Distancia)$; *Modelo Asintótico*;
2. $Biomasa = \theta_1 + \theta_2 * \ln \ln (Distancia)$; *Modelo Logarítmico*;
3. $Biomasa = \theta_1 + \theta_2 * Distancia$; *Modelo Linear*.

En consecuencia, esto constituye una base metodológica para desarrollar modelos de alteración del hábitat, fundamentados en la correlación existente entre la densidad de biomasa y la distancia de influencia del efecto de borde.

Asimismo, se ha modelado el efecto de borde en función del tamaño de los árboles y variables de rodal —como densidad, mortalidad y regeneración³⁹²—, permitiendo estimar este fenómeno sobre cualquier variable de rodal³⁹³. Se ha reportado, incluso, que el impacto del borde puede reducir el diámetro a la altura del pecho (DAP) hasta en un 50 %³⁹⁴. Por su parte, Bunyan *et al.* (2012)³⁹⁵

³⁸⁸ Pinheiro, J. & Bates, D., M. 2000. Mixed-effects Models in S and Splus. Springer- Verlag, New York, EE.UU. 528 p.

³⁸⁹ Salas, C., Corvalán, P., Pino, N., Donoso, P. & Soto, D. 2019. Modelos de efectos mixtos de altura-diámetro para *Drimys winteri* en el sur (41-43° S) de Chile. *Bosque*, 40(1):71-80.

³⁹⁰ De los Santos, H., Montero, M. & Kanninen, M. 2006. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia*, 40(4):521-532.

³⁹¹ Natural Capital Project. 2025. InVEST 3.17.0. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences.

³⁹² Chen, J., Franklin, J. & Spies, T. 1992. Vegetation Responses to Edge Environments in Old-Growth Douglas-Fir Forests. *Ecological Applications*, 2(4):387-396.

³⁹³ Zheng, D. & Chen, J. 2000. Edge effects in fragmented landscapes: A generic model for delineating area of edge influences (D-AEI). Michigan Tech Publications, 132(3):175-190.

³⁹⁴ Makaya, T. 1994. A family of segmented polynomial functions for modeling the border effect on the diameter growth of Ayous (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum). *Forest Ecology and Management*, 70:275-283.

emplearon modelos lineales para este propósito; no obstante, subrayan la importancia de integrar **modelos no lineales para optimizar la precisión de los ajustes estadísticos**.

No obstante, los modelos citados estiman el impacto del borde de forma reactiva, es decir, **una vez que la fragmentación ya ha ocurrido**. Por ello, surge la necesidad de evaluar la dinámica de las variables críticas para realizar proyecciones previas a la alteración. Este desafío puede abordarse mediante dos enfoques: el primero consiste en estimar temporalmente la tasa de cambio de las variables predictoras tras la perturbación del hábitat; el segundo radica en desarrollar modelos que integren esta evolución temporal intrínsecamente, tales como los modelos de crecimiento y mortalidad. Finalmente, para que estas herramientas sean efectivas en la toma de decisiones, deben **ser representativas y contar con protocolos rigurosos de calibración y validación mediante datos de terreno que aseguren la robustez de sus predicciones**.

Es fundamental reconocer que los modelos son representaciones simplificadas y generalistas que, aunque no son infalibles, resultan herramientas esenciales para la gestión³⁹⁵. En escenarios donde los informes de expertos carecen de justificaciones robustas para evaluar la alteración del hábitat, la implementación de modelos basados en toma de datos sistemática se vuelve imperativa para garantizar decisiones debidamente fundamentadas.

Si bien existe la posibilidad de considerar las mediciones y el monitoreo de bordes como indicadores de la alteración del hábitat como medidas a solicitar en informes de expertos, la **ausencia de una estrategia clara para el procesamiento y uso de estos datos invalida su exigencia en el contexto mencionado**. Por consiguiente, se plantea la necesidad de implementar esta estrategia de forma sistemática para lograr una evaluación robusta, objetiva y comprensiva de la valoración de la alteración del hábitat.

Este enfoque debe aplicarse tanto en la fase de construcción como en la de operación de proyectos, permitiendo identificar impactos en ambas etapas. No obstante, en la actualidad, pocos informes de expertos —con énfasis en el sector energético— reconocen la alteración del hábitat durante la fase operativa, a pesar de la evidencia disponible que sugiere la ocurrencia de tales eventos. Esta problemática se aborda en detalle en el siguiente apartado.

6.4. Muestreo de la potencial alteración de hábitat en fases de operación

Tal como se ha expuesto en este documento, es inusual que los informes de experto identifiquen alteraciones del hábitat durante la fase operativa de los proyectos, a pesar de la evidencia que demuestra impactos potenciales en la vegetación, particularmente en el sector energético. Para subsanar esta carencia, la respuesta vegetal debe analizarse mediante unidades de muestreo permanente en áreas colindantes a la operación. Este enfoque, complementado con análisis de laboratorio sobre individuos en regeneración y estructuras reproductivas, permitiría evaluar la resiliencia y respuesta frente a los estímulos derivados de la modificación del paisaje. Lo anterior es

³⁹⁵ Bunyan, M., Jose, S. & Fletcher, R. 2012. Edge effects in small forest fragments: Why more is better?. American Journal of Plant Sciences, 3(7):869-878.

³⁹⁶ Salas, C. & Real, P. 2013. Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte. En: Donoso, P., A. Promis eds. Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Marisa Cuneo Ediciones, Valdivia, Chile, p. 109–151.

crítico dado que la fase de operación no está exenta de producir alteración de hábitat, los cuales pueden verse acentuados por la sinergia con las alteraciones ejecutadas durante la construcción.

6.4.1. Líneas de transmisión de alto voltaje y subestaciones

Este tipo de proyectos han generado un marcado efecto de fragmentación en el paisaje, reduciendo la permeabilidad y conectividad de los corredores ecológicos al crear matrices de intervención lineales en la vegetación. Esta alteración del entorno físico deriva en procesos de erosión del suelo y cambios microclimáticos que pueden generar alteración el hábitat.

Dicho impacto se manifiesta claramente en la modificación del comportamiento de la fauna silvestre, la cual tiende a evitar el cruce por zonas con presencia de líneas eléctricas³⁹⁷. A diferencia de lo observado en otros tipos de bordes³⁹⁸, en estas áreas la depredación disminuye³⁹⁹, mientras que diversas especies de aves optan por anidar lejos de las torres de transmisión⁴⁰⁰. En consecuencia, estas modificaciones interrumpen las interacciones bióticas, afectando directamente los ciclos reproductivos de las plantas que dependen de la fauna para su propagación.

Si bien las consecuencias de la fase de instalación han sido ampliamente documentadas, resulta imperativo investigar el efecto residual de las líneas de transmisión una vez operativas. Mediante este conocimiento será posible minimizar la alteración de hábitat, mitigar su asociación con incendios forestales y proteger la biodiversidad circundante.

Las líneas de transmisión de alta tensión y las subestaciones asociadas generan campos electromagnéticos (CEM) significativos. La exposición prolongada a estos campos puede tener potenciales impactos adversos en los seres vivos. En estudios epidemiológicos se ha reportado una posible asociación entre la proximidad a estas infraestructuras y un aumento del riesgo de asma y leucemia infantil; estos hallazgos se han vinculado tanto a las descargas atmosféricas (tormentas eléctricas) como a la exposición crónica. Además, se ha sugerido un potencial efecto negativo sobre la capacidad reproductiva masculina.⁴⁰¹⁴⁰² No obstante, es crucial considerar las directrices de organismos internacionales. Según estudios y posicionamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se ha determinado que los niveles de campos eléctricos asociados a tensiones de hasta 400 kV se consideran inofensivos para la salud humana bajo condiciones de exposición

³⁹⁷ Colman, J., Efestøl, S., Tsegaye, D., Flydal, K. & Mysterud, A. 2012. Is a wind-power plant acting as a barrier for reindeer *Rangifer tarandus tarandus* movements?. *Wildlife Biology*, 18(4):439-445

³⁹⁸ López-Barrera, F., Armesto, J., Williams-Linera, G., Smith-Ramírez, C. & Hanson, R. 2007. Fragmentation and Edge Effects on Plant-Animal Interactions, Ecological Processes and Biodiversity. Capítulo 4. En: *Biodiversity Loss and Conservation in Fragmented Forest Landscapes: The Forests of Montane Mexico and Temperate South America*. 69-101 pp.

³⁹⁹ Fernie, K. & Reynolds, S. 2005. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: A review. *J. Toxicol. Environ. Health Part B* 8, 127-140.

⁴⁰⁰ Dinkins, J., Conover, M., Kirol, C., Beck, J. & Frey, S. 2014. Greater Sage-Grouse (*Centrocercus urophasianus*) select habitat based on avian predators, landscape composition, and anthropogenic features. *The Condor*.

⁴⁰¹ Wu, S., Di, G. & Li, Z. Does static electric field from ultra-high voltage direct-current transmission lines affect male reproductive capacity? Evidence from a laboratory study on male mice. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017, 24, 18025-18034.

⁴⁰² Redmayne, M. A proposed explanation for thunderstorm asthma and leukemia risk near high-voltage power lines: A supported hypothesis. *Electromagn. Biol. Med.* 2018, 37, 57-65.

normales, aunque la investigación sobre los efectos a largo plazo de los campos magnéticos de baja frecuencia sigue activa.⁴⁰³

Existen antecedentes que sugieren que los campos electrostáticos pueden interferir en procesos biológicos fundamentales, tales como el crecimiento vegetal, los patrones migratorios y la reproducción. En el ámbito de la fauna, la radiación electromagnética se ha asociado con una disminución del éxito reproductivo y de las tasas de supervivencia individual⁴⁰⁴. Por su parte, en la flora, estas emisiones pueden inducir mutaciones y alterar significativamente la actividad enzimática⁴⁰⁵.

Un estudio realizado en China⁴⁰⁶ determinó que, debido a la instalación de líneas de transmisión de alto voltaje, el 0,9% de la superficie forestal se convirtió en hábitat de borde. Los investigadores detectaron cambios temporales en el vigor de la vegetación (cuantificados mediante el índice NDVI), observando que la afectación se estabilizaba aproximadamente a 90 metros de distancia de las líneas. Sin embargo, el impacto fue más pronunciado en la proximidad de las torres de transmisión, donde la estabilización del vigor vegetal ocurrió a unos 150 metros.

Tras un periodo de seguimiento de nueve años, la zona de influencia se redujo, estabilizándose a 60 metros para las líneas de transmisión y a 90 metros para las torres. Estos resultados ponen de manifiesto que las torres de transmisión generan un impacto espacial mayor y más persistente que el cableado aéreo. Dicha información es crucial tanto para evaluar la afectación a la flora y vegetación circundante como para optimizar las estrategias de diseño de los proyectos.

Diversas investigaciones han documentado múltiples efectos negativos en la flora, que abarcan desde daños mecánicos y alteraciones en el crecimiento hasta la reducción en la germinación de semillas. A nivel fisiológico y metabólico, se han reportado variaciones en los parámetros respiratorios y bioquímicos, incluyendo cambios en la concentración elemental, la actividad enzimática, los niveles de clorofila y fenoles, así como alteraciones en las funciones de la membrana y el ciclo celular⁴⁰⁷.

Por ejemplo, estudios experimentales en plántulas de *Cupressocyparis leylandii* demostraron que la proximidad a las líneas de transmisión incide significativamente en su desarrollo⁴⁰⁸. No obstante, existen reportes indicando que los campos electromagnéticos pueden favorecer el crecimiento en

⁴⁰³ Bonnell, J. 1982. Effects of electric fields near power-transmission plant. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 75(12):933-941.

⁴⁰⁴ Fernie, K. & Reynolds, S.. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: A review. *J. Toxicol. Environ. Health Part B* 8, 127–140 (2005).

⁴⁰⁵ Rieucau, G., Vickery, W. L., Doucet, G. J. & Laquerre, B. An innovative use of white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) foraging behaviour in impact studies. 85 (2007).

⁴⁰⁶ Li, X. & Lin, Y. 2019. Do High-Voltage Power Transmission Lines Affect Forest Landscape and Vegetation Growth: Evidence from a Case for Southeastern of China. *Forests*, 10(2), 162.

⁴⁰⁷ Narasimhan, S. & Bindu, S. 2021. Increased density of high electric voltage lines causing hazardous effect on plants. *Disaster Advances*,14(10):63-66

⁴⁰⁸ Demir Z. 2010. Proximity effects of high voltage electric power transmission lines on ornamental plant growth, *African Journal of Biotechnology*, 9, 6486-6491.

especies específicas como el algodón⁴⁰⁹, lo que sugiere que el impacto depende de variables como la especie, el voltaje, la polaridad del campo y la distancia a la fuente.

En el caso de *Brassica chinensis*, se halló una correlación positiva entre la distancia a líneas de 132 kV y el número de vainas producidas⁴¹⁰. Sin embargo, en mediciones bajo líneas de entre 33 kV y 275 kV, esta misma especie presentó un incremento en proteínas, pigmentos de clorofila, nitrógeno soluble y actividad de peroxidasa a una distancia de 20 metros; dichas reacciones están estrechamente vinculadas a mecanismos de respuesta al estrés (Maziah *et al.*, 2021). En última instancia, la respuesta vegetal a la electricidad puede ser estimulante, destructiva o letal, dependiendo de la intensidad del campo⁴¹¹⁴¹². Ya en 1966, Sideway⁴¹³ postuló que los efectos de los campos electrostáticos están determinados primordialmente por el signo del campo, más que por su mera presencia, siendo capaces incluso de inhibir la germinación.

A partir de los antecedentes expuestos, se puede afirmar que las líneas y torres de transmisión ejercen efectos directos sobre la vegetación. Estos impactos varían según la especie y las características del campo electrostático, pudiendo derivar tanto en daños severos como en un estímulo del crecimiento. No obstante, aún existe una brecha en la literatura científica respecto al grado de afectación o beneficio real, así como a las consecuencias específicas en la fenología y los ciclos reproductivos de las plantas.

Dada la ausencia de información y el riesgo potencial de alteración del hábitat, resulta imperativo investigar estos fenómenos en diversas especies nativas. Para ello, es necesario implementar metodologías integrales que combinen el monitoreo en unidades de muestreo permanentes con estudios controlados de laboratorio. Solo así se podrá generar el conocimiento necesario para mitigar los impactos de estas infraestructuras sobre la biodiversidad local y evaluar su relación con la alteración de hábitat.

6.4.2. Parques fotovoltaicos

La construcción de parques fotovoltaicos conlleva impactos directos como la degradación del suelo y la remoción de la cobertura vegetal. Además, la disposición de los paneles solares altera el microclima local, generando una sinergia con el efecto de borde que compromete la supervivencia y el desarrollo de la flora⁴¹⁴⁴¹⁵. Diversas investigaciones han demostrado que las temperaturas dentro

⁴⁰⁹ Liu, X., Wan, B., Hua, H. & Li, X. 2021. Electric field generated by high-voltage transmission system is beneficial to cotton growth. *Acta Ecologica Sinica*, 41(6):552-559.

⁴¹⁰ Maziah, M., Ooi B., Tengku, M. & Sreeramanan S. 2012. Effects of electromagnetic field of 33 and 275 kV influences on physiological, biochemical and antioxidant system changes of leaf mustard (*Brassica chinensis*), *African Journal of Biotechnology*, 66, 13016-13029

⁴¹¹ Murr, L. 1963. A microscopic study of lethal electrotropism in plants, *Proceedings of the Pennsylvania Academy of Science*, 37, 7-15.

⁴¹² Murr L. 1966. The biophysics of plant growth in a reversed electrostatic field: a comparison with conventional electrostatic and electrokinetic field growth responses, *International Journal of Biometeorology*, 10, 135-146.

⁴¹³ Sidaway, G. 1966. Influence of electrostatic fields on seed germination. *Nature*, No 5046.

⁴¹⁴ Armstrong, A., Ostle, N. & Whitaker, J. 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ Res Lett* 11, 074016.

⁴¹⁵ Choi, C., Cagle, A., Macknick, J., Bloom, D., Caplan, J. & Ravi, S., 2020. Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. *Front Environ Sci* 8

de estas instalaciones son superiores a las de áreas circundantes sin paneles —tanto en períodos diurnos como nocturnos—, lo que deriva en una reducción crítica de la humedad edáfica (del suelo)⁴¹⁶.

Asimismo, la infraestructura fotovoltaica actúa como una barrera física para los agentes polinizadores, lo que podría afectar significativamente la dinámica de estas poblaciones y, por ende, el éxito reproductivo de la vegetación dependiente. No obstante, mediante una gestión integrada del paisaje y el mantenimiento de corredores biológicos entre los paneles y su entorno, estos impactos negativos pueden ser mitigados de manera satisfactoria⁴¹⁷.

La superficie ocupada por los parques fotovoltaicos puede experimentar un aumento de la temperatura del aire en un rango de 2 a 5 °C⁴¹⁸⁴¹⁹. Existe evidencia, además, de que estas instalaciones alteran la temperatura del aire en las áreas circundantes, lo que potencialmente perturba los procesos ecosistémicos locales. Este incremento térmico se disipa en el medio ambiente a alturas que oscilan entre los 5 y 18 metros; sin embargo, a 300 metros del perímetro del parque, la temperatura del aire se aproxima a la temperatura ambiente con una diferencia menor a 0,3 °C, indicando que su influencia puede extenderse cientos de metros⁴²⁰.

Esta modificación de las condiciones microclimáticas del sistema puede generar una alteración del hábitat, afectando la germinación de semillas, provocando la desecación foliar e incrementando la pérdida de vigor vegetal característica del efecto de borde, un fenómeno que puede acentuarse durante la operación continua de la central. Por consiguiente, resulta necesario investigar la respuesta de las especies nativas a estos cambios evidenciados, considerando la alta probabilidad de alteración del hábitat, especialmente por la sinergia entre las modificaciones de la fase de construcción y la fase de operación.

6.4.3. Parques eólicos

Tanto la fase de construcción como la de operación de los parques eólicos generan impactos significativos en el suelo y la vegetación. Específicamente, su funcionamiento induce modificaciones en el ambiente local que pueden resultar en la alteración del hábitat para diversas especies.

En un análisis de 250 parques eólicos, Han *et al.* (2025)⁴²¹ reportaron que estas instalaciones aumentan la temperatura superficial terrestre nocturna en 0,2 °C y la reducen en 0,11 °C durante el

⁴¹⁶ Yang, L., Gao, X., Lv, F., Hui, X., Ma, L. & Hou, X. 2017. Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas, *Sol. Energy* 144 (2017) 244–253

⁴¹⁷ Lech'vien, A., Bienvenu, L., Isselin-Nondedeu, F., Bischoff, A., Gros, R. & Schatz, B. 2025. Effects of solar panels and management on pollinators and their interactions with plants in Southern French solar parks. *Biological conservation*, 307, 111209.

⁴¹⁸ Barron-Gafford, G., Minor, R., Allen, N., Cronin, A., Brooks, A. & Pavao-Zuckerman, M. 2016. The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures *Sci. Rep.*, 6, p. 35070

⁴¹⁹ Chang, R., Shen, Y., Luo, Y., Wang, B., Yang, Z. & Guo, P. 2018. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe China. *Renewable Energy*, 118 (2018), pp. 131-137

⁴²⁰ Fthenakis, V. & Yu, Y. 2013. Análisis del potencial efecto isla de calor en grandes parques solares. *Conferencia de Especialistas en Fotovoltaica (PVSC) del IEEE*. DOI:10.1109/PVSC.2013.6745171

⁴²¹ Han, X., Lu, C. & Wang, J. 2025. Long-Term Impacts of 250 Wind Farms on Surface Temperature and Vegetation in China: A Remote Sensing Analysis. *Remote Sens.* 2025, 17(1), 10.

día, con una alta variabilidad estacional. El estudio también concluyó que aproximadamente el 75% de los parques eólicos generaron impactos negativos en la vegetación, descartando que estos efectos se debieran a factores geográficos como altitud, latitud o longitud. Además, se destacó que los parques eólicos de mayor envergadura ejercieron una influencia superior en los cambios de temperatura y en la alteración de la dinámica vegetacional circundante.

Se han detectado efectos inhibitorios en el crecimiento de la vegetación asociados a la operación de los parques eólicos⁴²². Sin embargo, también existen reportes de disminuciones que no impactan significativamente a la cobertura vegetal⁴²³. Esta disparidad sugiere que los impactos de los parques eólicos en el crecimiento de la vegetación son inciertos y requieren de investigaciones más profundas.

Adicionalmente, se ha observado que las zonas afectadas durante la fase de construcción de los parques eólicos presentan una mayor sensibilidad climática. Los efectos en la erosión del suelo en estas áreas pueden duplicarse o incluso multiplicarse por diez, lo cual repercuten negativamente en el componente vegetal y la integridad del paisaje. Cabe destacar que el rango de influencia directa de la base de la turbina eólica, específicamente en la fase de construcción, varía entre 0 y 90 metros⁴²⁴.

Se ha demostrado que los parques eólicos inducen una disminución en la producción de biomasa y en la absorción de radiación fotosintéticamente activa, registrándose efectos más severos en llanuras y zonas de baja altitud. Estas modificaciones **reducen la capacidad de secuestro de carbono en un radio de hasta 20 km**⁴²⁵, lo que plantea interrogantes críticos sobre su impacto neto en el actual escenario de cambio climático.

Según Li *et al.* (2024)⁴²⁶, tanto la construcción como la operación de estas centrales alteran el microclima edáfico, modificando la temperatura y las tasas de evapotranspiración. Estos cambios afectan directamente las propiedades fisicoquímicas del suelo; sin embargo, el alcance de los impactos sobre la vegetación durante la fase operativa aún presenta incertidumbres, sugiriendo una potencial alteración del hábitat que requiere mayor investigación.

Por otra parte, se ha observado que los vórtices asociados a las estelas de los aerogeneradores provocan un intercambio de masas de aire, desplazando el aire seco de las capas superiores hacia el nivel del suelo e impulsando el aire superficial húmedo hacia arriba. Esta disminución de la humedad relativa se extiende a lo largo de la zona de influencia (estela) del parque y **es más pronunciada en configuraciones alineadas que en aquellas con diseños escalonados**⁴²⁷.

⁴²² Tang, B., Wu, D., Zhao, X., Zhou, T., Zhao, W. & Wei, H. 2017. The Observed Impacts of Wind Farms on Local Vegetation Growth in Northern China. *Remote Sens.* 2017, 9, 332.

⁴²³ Xia, G. & Zhou, L. 2017. Detecting Wind Farm Impacts on Local Vegetation Growth in Texas and Illinois Using MODIS Vegetation Greenness Measurements. *Remote Sens.* 2017, 9, 698.

⁴²⁴ Ma, B., Yang, J., Chen, X., Zhang, L. & Zeng, W. 2023. Revealing the ecological impact of low-speed mountain wind power on vegetation and soil erosion in South China: A case study of a typical wind farm in Yunnan. *Journal of Cleaner Production*, 419, 20 September 2023, 138020.

⁴²⁵ Gao, L., Wu, Q., Qiu, J., Mei, Y., Yao, Y., Meng, L. & Liu, P. The impact of wind energy on plant biomass production in China. *Scientific reports*, 13: 22366

⁴²⁶ Li, L., Ma, W., Duan, X., Wang, S., Wang, Q., Gu, H. & Wang, J. 2024. Effects of Wind Farm Construction on Soil Nutrients and Vegetation: A Case Study of Linxiang Wind Farm in Hunan Province. *Sustainability* 2024, 16(15), 6350

⁴²⁷ Adkins, K. & Sescu, A. 2022. Wind Farms and Humidity. *Energies* 2022, 15(7), 2603.

Asimismo, se ha postulado que el impacto de los parques eólicos en el microclima local podría mitigarse mediante la optimización del diseño de los rotores o a través de su emplazamiento estratégico en regiones con alta turbulencia natural⁴²⁸.

En virtud de lo expuesto, cabe destacar que la fase de operación induce modificaciones en las variables ambientales y edáficas, así como en la vegetación circundante. Estas alteraciones microclimáticas y del suelo podrían tener implicaciones directas en la determinación legal de "alteración de hábitat", considerando que los cambios en las condiciones biofísicas del entorno pueden comprometer la viabilidad de los ecosistemas locales.

6.4.4. Centrales hidroeléctricas

Adicional a los impactos derivados de la remoción de vegetación para la creación de embalses y canales de aducción, la operación de las centrales hidroeléctricas puede inducir una alteración del hábitat persistente.

En Chile, un estudio realizado en la cuenca del Maule⁴²⁹ identificó una pérdida de la diversidad geomorfológica y un aumento gradual de la vegetación en el cauce activo del río entre 1989 y 2018. Este fenómeno, caracterizado por la reducción de espejos de agua, sedimentos activos y suelo desnudo, se hizo evidente diez años después del inicio de las operaciones y se intensificó durante la megasequía en Chile central (2008-2018). En este contexto, la especie *Acacia dealbata* predominó en las zonas más estabilizadas, evidenciando la ventaja competitiva que poseen las especies exóticas para colonizar ambientes perturbados antropogénicamente. Esta fragmentación del paisaje genera cambios microclimáticos y perturbaciones que facilitan la invasión de especies foráneas, las cuales compiten ventajosamente con taxones nativos, más aun con aquellos que presentan problemas de conservación.

Asimismo, la modificación de la fisonomía del paisaje y las alteraciones microclimáticas no se limitan a las zonas de inundación, sino que se manifiestan también en el tramo de descarga del curso de agua modificado, cuyos impactos ecológicos requieren una investigación profunda.

6.4.5. Centrales geotérmicas

Si bien las centrales geotérmicas se caracterizan por sus reducidas emisiones de dióxido de carbono, amoníaco y sulfuro de hidrógeno, así como por un uso eficiente del agua y el suelo, su operación no está exenta de impactos ambientales. Diversas investigaciones han detectado alteraciones en la composición química de la vegetación circundante, manifestadas en la reducción del área foliar o el incremento del peso seco. Estos cambios fisiológicos se asocian a la absorción de boro y arsénico⁴³⁰, derivados de las potenciales emisiones de estos elementos, junto con el mercurio, hacia

⁴²⁸ Liu, L., Liu, P., Yu, J., Feng, G., Zhang, Q. & Svenning, C. Wind farms increase land surface temperature and reduce vegetation productivity in the Inner Mongolia. *Geography and Sustainability*, 5(3):319-328.

⁴²⁹ Pacheco, F., Rojas, O., Hernández, E. & Caamaño, D. Effects on Fluvial Geomorphology and Vegetation Cover following Hydroelectric Power Plant Operation: A Case Study in the Maule River (Chile). *Water* 2022, 14(11), 1673

⁴³⁰ Bussotti, F., Cenni, E., Cozzi, A. & Ferretti, M. 1996. The impact of geothermal power plants on forest vegetation. a case study at travale (Tuscany, Central Italy). *Environmental Monitoring and Assessment* 45: 181–194.

el entorno⁴³¹. Cabe destacar que los daños identificados se limitan a las áreas inmediatamente adyacentes a las instalaciones y se vinculan primordialmente a condiciones de estrés fisiológico en la vegetación forestal aledaña.

No se dispone de estudios adicionales que permitan determinar si estas condiciones de estrés pueden provocar la mortalidad de individuos o impedir su éxito reproductivo. En consecuencia, actualmente no es posible establecer con certeza si la operación de estas centrales genera una alteración significativa del hábitat de las especies afectadas.

Para abordar esta brecha de conocimiento, es fundamental llevar a cabo investigaciones específicas en las áreas colindantes a las centrales geotérmicas, enfocándose en las especies de interés. Esto se justifica dado que las diferentes especies presentan sensibilidades variables tanto al tipo como a la intensidad del estrés ambiental.

Si bien la única planta geotérmica en Chile se localiza actualmente en la Región de Antofagasta, es previsible una futura expansión de esta tecnología dado el elevado potencial geotérmico del territorio nacional. En este contexto, investigar los efectos de estas instalaciones sobre la flora y la tolerancia al estrés de las especies permitirá optimizar el diseño de los proyectos y determinar con precisión si provocan una alteración del hábitat. Esta evaluación puede abordarse mediante el estudio de la respuesta fisiológica de las plantas ante diversas concentraciones de boro, arsénico y mercurio, elementos asociados a las emisiones de este tipo de centrales.

6.4.6. Hidrógeno verde

Además de los impactos directos por remoción de vegetación y degradación del suelo en el área de emplazamiento, la alteración del hábitat se vincula predominantemente a infraestructuras de energías renovables, tales como parques fotovoltaicos, eólicos y centrales hidroeléctricas. No obstante, resulta imperativo establecer protocolos de monitoreo para la vegetación colindante a las plantas de hidrógeno verde, con el fin de determinar si su fase operativa —independientemente de las fuentes de energía asociadas— genera modificaciones ambientales que afecten a las especies de interés. Dada la escasa literatura científica sobre sus efectos locales, es necesario trascender la valoración de sus beneficios en la matriz energética y la reducción de emisiones para evaluar su impacto ecológico real.

La evidencia científica indica que las fases operativas de diversos proyectos generan impactos significativos en la vegetación, con una alta probabilidad de inducir la alteración del hábitat; no obstante, este fenómeno suele ser omitido en los informes de experto. Ante este escenario, resulta imperativo evaluar la respuesta de especies clave frente a las modificaciones ecosistémicas derivadas de la operación, considerando que su autoecología y vulnerabilidad las hacen susceptibles a tales efectos. Si bien el impacto final dependerá de la magnitud de cada proyecto, es urgente desarrollar investigaciones que reduzcan la brecha de conocimiento y profundicen en variables de alta incertidumbre, tales como el efecto de los campos electromagnéticos.

⁴³¹ Dhar, A., Naeth, M., Jennings, D. & Gamal El-Din, M. 2020. Geothermal energy resources: potential environmental impact and land reclamation. *Environmental Reviews*, 8(4):2020

6.5. Determinación de posible afectación histórica de la continuidad de la especie en una cuenca, evaluación comparativa con su recuperación y fragmentación histórica.

Resulta crucial implementar estrategias de alerta temprana para detectar la posible afectación de la continuidad de las especies a nivel de cuenca. Esto exige una visión holística de la fragmentación del hábitat, considerada la variable principal a evaluar. Para lograr este objetivo, es indispensable almacenar, gestionar y analizar los datos de conectividad generados en la cuenca, de modo que cada nuevo proyecto que ingrese **pondere el nivel de fragmentación existente**. Los proyectos deben, en primer término, asegurar la no afectación de la continuidad por sus propias actividades y, secundariamente, considerar el impacto acumulativo sobre la conectividad global de la cuenca. Asimismo, es preciso analizar la recuperación de áreas fragmentadas e integrar dicha restauración en los análisis históricos de continuidad de especies.

La ausencia de estos análisis impide garantizar la continuidad de las especies en las cuencas que ya han sido objeto de modificación. No obstante, su implementación efectiva requiere de estrategias nacionales que centralicen los registros y permitan una cuantificación precisa del recurso vegetacional, así como el monitoreo sistemático de sus modificaciones temporales.

La gestión bajo el paradigma actual de incertidumbre en la evaluación de impactos y la planificación territorial constituye un **riesgo crítico para la sostenibilidad de los recursos naturales a mediano y largo plazo**. Esta problemática se agudiza en el diseño de medidas de compensación, las cuales frecuentemente omiten un análisis de fragmentación acumulada, derivando en soluciones ineficaces que comprometen la funcionalidad ecosistémica. Por consiguiente, resulta imperativo transitar hacia un modelo de gestión fundamentado en la evidencia científica y la continuidad ecológica.

6.6. Mejorar el estado de la información de las especies nativas.

Actualmente, existe una deficiencia crítica de información que impide una evaluación robusta y certera de estas especies. La falta de información detallada se extiende a múltiples aspectos esenciales, tales como:

1. Autoecología y Biología Reproductiva:

- **Autoecología:** Es crucial obtener datos precisos sobre la ecología individual de cada especie, donde existen especies con nula información.
- **Dispersores y Polinizadores:** Se requiere una comprensión profunda de las interacciones biológicas, identificando y caracterizando las especies bióticas y/o factores abióticos que participan en la dispersión de semillas y la polinización, lo cual es fundamental para la persistencia de las poblaciones.
- **Anatomía y Fenología Floral:** Es necesaria la descripción detallada de las estructuras florales y el seguimiento de los ciclos fenológicos (brotación, floración, fructificación,

autopolinización) a lo largo del año y en diferentes condiciones ambientales.

2. Relaciones Específicas y Sinecología:

- **Sinología y Relaciones Interespecíficas:** Las investigaciones deben ir más allá del individuo y abordar las complejas interacciones dentro de las comunidades. Esto incluye las relaciones simbióticas, parásíticas, de competencia y facilitación con otros taxones (plantas, animales, hongos y microorganismos del suelo).
- **Dinámica de las Formaciones Vegetales:** Es vital estudiar cómo evolucionan y se mantienen las comunidades o formaciones vegetales de estas especies en el tiempo y el espacio.

3. Edáficas y Fisiológicas:

- **Estudios Edafológicos:** La composición, estructura y salud del suelo donde crecen estas especies son determinantes para su supervivencia y deben ser estudiados en profundidad.
- **Fisiología de las Especies:** Es necesario conocer los procesos vitales internos, como la fotosíntesis, la respiración y la asimilación de nutrientes.
- **Tolerancia al Estrés y Contaminación:** Se deben determinar los límites fisiológicos de las especies ante diversas condiciones de estrés (ej. sequía, heladas, altas temperaturas) y los niveles de contaminación tolerables (ej. metales pesados, contaminantes atmosféricos).
- **Razones de Deterioro:** Es fundamental investigar las causas específicas que llevan al declive de ciertas poblaciones, como es el caso de especies vulnerables como *Porlieria chilensis*.

Gran parte de la información ecológica y biológica existente sobre las especies nativas data principalmente de las décadas de los 90' y 2000', lo que implica que está desactualizada y no considera los impactos del cambio climático y las presiones antrópicas recientes.

La consecuencia directa de esta laguna de información es la incertidumbre en la toma de decisiones. Si carecemos de un conocimiento científico sólido sobre la autoecología y sinecología de nuestras especies, no podemos asegurar que las medidas de gestión, conservación y las resoluciones en materia de evaluación ambiental sean las correctas y eficaces.

Por lo tanto, la generación y sistematización de esta base de datos es una **tarea ineludible y transversal**, que debe ser abordada de manera coordinada por los ámbitos de la evaluación ambiental, la gestión de recursos naturales, la conservación de la biodiversidad y la investigación científica. Invertir en este conocimiento es fundamental para garantizar la persistencia de la flora nativa y los ecosistemas que sustentan.

7. Consideraciones finales

Estos criterios buscan clarificar y simplificar la evaluación de la alteración de hábitat en diversos contextos, reduciendo y reconociendo la incertidumbre y ofreciendo un marco de referencia. Proporcionan herramientas a titulares de proyectos, expertos y profesionales encargados de esta evaluación. Sin embargo, es fundamental entender que estos criterios son solo una referencia de variables y pasos a considerar para fortalecer la evaluación de un concepto que no debería estar sujeto a interpretaciones. A pesar de su existencia, aún pueden quedar variables importantes invisibilizadas, ya que el proceso de evaluación no refleja la interrelación del ecosistema, lo que podría generar sesgos y una falsa sensación de certeza.

La propuesta de criterios es solo un paso inicial para disminuir la incertidumbre. Para una comprensión más robusta de la alteración de hábitat, se requiere una postura transversal en cuanto a políticas, investigaciones y voluntad política. La definición misma de alteración de hábitat debe ser reformulada de manera práctica y construida de forma colaborativa entre entidades públicas, privadas y académicas para corregir los problemas que actualmente generan más incertidumbre en su evaluación.

La validación de los criterios de alteración de hábitat requiere indispensablemente la participación activa y coordinada de diversos actores y partes interesadas. Esta aproximación no es solo una cuestión de buenas prácticas, sino un elemento crucial para la legitimidad y solidez del mecanismo propuesto. La inclusión de múltiples perspectivas garantiza:

1. **Representatividad:** Asegura que los criterios reflejen la realidad y las complejidades inherentes a la alteración de hábitat en diferentes contextos geográficos, ecosistémicos y socioeconómicos.
2. **Mitigación de Sesgos:** La confrontación de visiones ayuda a identificar y corregir posibles sesgos inherentes a un único grupo de expertos o institución, promoviendo una visión más balanceada y objetiva.
3. **Claridad Conceptual y Aplicabilidad:** La discusión multidisciplinaria previene malas interpretaciones del concepto de alteración de hábitat, asegurando que los criterios sean claros, unívocos y, fundamentalmente, aplicables en el terreno.

Los pilares de la robustez del mecanismo se construyen mediante la incorporación estratégica de tres visiones fundamentales:

- **Visión Científica y Técnica:** Aporta el rigor metodológico, el conocimiento ecológico profundo, las bases de datos y la evidencia empírica necesaria para la definición de umbrales y métricas de alteración. Incluye a investigadores, académicos y expertos en conservación, ecología del paisaje y teledetección.
- **Visión de Aplicación Práctica (Institucional y Regulatoria):** Proporcionada por las instituciones encargadas de la gestión, fiscalización y toma de decisiones ambientales (autoridades, ministerios, agencias reguladoras). Esta visión asegura que los criterios sean

operativos, encajen dentro del marco normativo existente y puedan ser implementados y monitoreados de manera efectiva con los recursos disponibles.

- **Visión de Aplicabilidad y Pertinencia Local:** Aportada por actores que viven la realidad en el territorio, como comunidades locales, pueblos indígenas, organizaciones no gubernamentales (ONG) de conservación, gremios productivos (ej. forestal, agrícola, minero) y consultores ambientales. Esta visión es clave para garantizar la viabilidad social y económica de los criterios y su aceptación por parte de quienes serán afectados por su aplicación.

La integración sinérgica de estas visiones permitirá la construcción de un mecanismo de evaluación y valoración de la alteración de hábitat que no solo sea sólido desde el punto de vista científico-técnico, sino también legítimo, práctico y sostenible en el tiempo.

Finalmente, es esencial establecer lineamientos y estrategias nacionales robustas y coherentes para mejorar, actualizar y armonizar las políticas y leyes asociadas al medioambiente. En la actualidad, muchas de estas normativas ambientales, aunque bien intencionadas, adolecen de una falta de sentido práctico, una desconexión con la realidad ecológica local y una deficiente integración sectorial, lo que limita su efectividad real en la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas.

Es imperativo que esta revisión legal y política se acompañe de un fuerte fomento a la investigación científica y tecnológica. La existencia de un alarmante alto grado de desconocimiento sobre la taxonomía, distribución, ecología, dinámicas poblacionales y requerimientos de hábitat de vastas proporciones de nuestras especies nativas y endémicas constituye una barrera crítica para la gestión ambiental efectiva. Este vacío de información de base biológica indica que aún queda un camino significativo y urgente por recorrer. Se necesita una inversión sostenida en la generación de conocimiento primario para poder traducir los hallazgos de la ciencia en políticas públicas sólidas, medidas de manejo eficientes y programas de conservación verdaderamente sostenibles. Solo a través de una comprensión profunda e integral de nuestros ecosistemas, sus procesos y las amenazas que enfrentan, podremos transitar hacia la sostenibilidad ambiental y lograr un balance efectivo entre la protección efectiva y sustentable de nuestro patrimonio natural y su uso.