



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

**EVALUACIÓN INTEGRADA DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA
CORDILLERA DE NAHUEL BUTA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
OPORTUNIDADES DE RESTAURACIÓN**

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

POR: Carlos Varela Ávila

Profesor Guía: Cristián Echeverría Leal

Noviembre, 2024

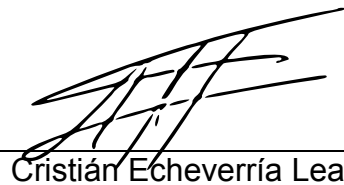
Concepción, Chile

© 2024, Carlos Alejandro Varela Ávila

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

EVALUACIÓN INTEGRADA DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA
CORDILLERA DE NAHUEL BUTA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
OPORTUNIDADES DE RESTAURACIÓN

Profesor Guía



Profesor Titular
Ingeniero Forestal, Ph.D.

Profesor Guía



Colaborador Externo
Ingeniero Forestal, Ms.C.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia por su cariño, comprensión y ser mi mayor apoyo durante este largo proceso, en especial a quienes partieron y no pudieron verlo concretado.

A mis amistades, por su cariño y compañía, con ellos he crecido, madurado y fue fundamental contar con su apoyo para seguir adelante. Se vienen buenos tiempos.

Al profesor Cristián Echeverría, quien confió en mí y me brindó la oportunidad de ser mi tutor, agradezco en especial sus enseñanzas y tremenda paciencia por esperarme durante este tiempo. Lo aprendido durante años de clases, ayudantías y la tutoría de tesis no quedará en vano, yo elegí este camino y de aquí en adelante siempre iré por más. A Rodrigo Fuentes por su gran apoyo, paciencia y disponibilidad a ayudar siempre, su calidad humana y docente quedará siempre en el recuerdo de quienes fuimos sus estudiantes.

Agradezco también al proyecto Fondecyt 1181374: "*A spatially explicit approach for an integrated assessment of ecological integrity and ecosystem services in agro-forestry landscapes*" por proporcionar los datos usados en este estudio.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA.....	7
2.1 Descripción del área de estudio	7
2.2 Cartografía de coberturas y usos de suelo	9
2.3 Determinación de la oferta de servicios ecosistémicos	11
2.4 Determinación de la demanda de servicios ecosistémicos.....	13
2.5 Cartografía y cálculo de la capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos más demandados en el área de estudio	15
2.6 Simulación de escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados.....	16
2.6.1 Escenario A	18
2.6.2 Escenario B	22
2.6.3. Escenario C.....	24
2.7 Cálculo de la capacidad de provisión y variación porcentual para los escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados ...	26
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1 Demanda de servicios ecosistémicos.....	30
3.2 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados...	35
3.2.1 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados a escala de paisaje para la condición inicial.....	38

3.2.2 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados a escala comunal para la condición inicial.....	40
3.3 Simulación de escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados	42
3.3.1 Escenario A	42
3.3.2 Escenario B	43
3.3.3 Escenario C	45
3.4 Oportunidades de restauración a escala de paisaje	45
3.5 Oportunidades de restauración a escala comunal.....	51
3.6 Implicancias para la sustentabilidad del paisaje y la planificación territorial	62
IV. CONCLUSIONES	67
V. GLOSARIO.....	69
VI. BIBLIOGRAFÍA	73
VII. APÉNDICE.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Servicios ecosistémicos e indicadores de provisión evaluados bajo el proyecto FONDECYT Regular 1181374 disponibles para el presente estudio.	12
Tabla 2. Criterios usados para definir escenarios de restauración de SE.....	17
Tabla 3. Capacidad de provisión de SE a escala de paisaje para la condición inicial y escenarios A, B y C.....	48
Tabla 4. Variación porcentual de la capacidad de provisión de SE a escala de paisaje para escenarios A, B y C respecto a condición inicial.	48
Tabla 5. Variación porcentual de capacidad de provisión de los tres SE más demandados para escenarios A, B y C respecto a la condición inicial, a escala comunal, para las tres comunas que presentaron las mayores variaciones en cada escenario.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ubicación de la cordillera de Nahuelbuta.....	8
Figura 2. Comunas pertenecientes al área de estudio.....	9
Figura 3. Coberturas y usos de suelo de la cordillera de Nahuelbuta para el año 2017.....	11
Figura 4. Media ponderada de la capacidad de provisión de SE del paisaje, donde $XP(a)$ es la media ponderada del SE a, xi representa el número de píxeles que poseen capacidad de provisión pi	15
Figura 5. Zonas de protección de 100 m alrededor de los cursos de agua del paisaje de estudio.	19
Figura 6. Tercio superior del rango altitudinal del paisaje de estudio.	21
Figura 7. Quintil superior del rango altitudinal de cada subsubcuenca en el paisaje de estudio.	23
Figura 8. Erosión mayor o igual a 50 t/ha en el paisaje de estudio.....	25
Figura 9. Frecuencia de respuestas para cada servicio ecosistémico según su nivel de importancia para los actores territoriales. n=63	31
Figura 10. Capacidad de provisión actual de los tres servicios ecosistémicos más demandados dentro del área de estudio. Los valores están normalizados siendo 0 la menor capacidad de provisión y 100 la mayor capacidad de provisión.	36
Figura 11. Capacidad de provisión de los SE más demandados para la condición inicial a escala de paisaje.	39
Figura 12. Capacidad de provisión de los SE más demandados: Regulación de la temperatura (RT), Control de erosión (CE) y Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos (RCH), para la condición inicial a escala comunal.	41
Figura 13. Oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C a escala de paisaje.	46

Figura 14. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C, a escala de paisaje.	47
Figura 15. Oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C a escala comunal.	52
Figura 16. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario A, a escala comunal.	53
Figura 17. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario B, a escala comunal.	54
Figura 18. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario C, a escala comunal.	54
Figura 19. Oportunidades de restauración del escenario A para la comuna de Arauco.	59
Figura 20. Oportunidades de restauración del escenario B para la comuna de Lota.	60
Figura 21. Oportunidades de restauración del escenario C para la comuna de San Pedro de la Paz.	61

RESUMEN

Los servicios ecosistémicos (SE) son beneficios obtenidos por las personas a partir de los ecosistemas. La cordillera de Nahuelbuta, un hotspot de biodiversidad único, proporciona múltiples SE, pero ha sufrido una significativa degradación debido a la sustitución de sus ecosistemas, disminuyendo la capacidad de proveer servicios esenciales para el bienestar humano. Es necesario identificar oportunidades de restauración para recuperar la capacidad de provisión de los SE más demandados por sus habitantes. El presente estudio se enfocó en identificar oportunidades de restauración en la cordillera de Nahuelbuta mediante una evaluación integrada de SE a multiescala, para ello se aplicó una encuesta a actores relevantes destacando: Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, Control de erosión y Regulación de la temperatura, como los tres SE más demandados. Mediante análisis y modelamiento espacial se determinó su capacidad actual de provisión, diseñándose tres escenarios de restauración (A, B y C), que contemplaron el reemplazo de ecosistemas antrópicos por naturales bajo criterios de: protección de cursos de agua, rango altitudinal y tasa de erosión actual, a escala de paisaje y comunal, para las 20 comunas que componen su territorio, a fin de aumentar su capacidad de provisión futura. A escala de paisaje, el servicio Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, presentó el mayor aumento, con un 18 %, bajo el escenario B. A escala comunal, San Pedro de la Paz, presentó el mayor aumento para este mismo

servicio, con un 66 %, bajo el escenario C. Las oportunidades de restauración identificadas deben ser integradas en los instrumentos de planificación territorial, considerando su alto potencial para proveer SE, el desafío está en diseñar configuraciones de escenarios adecuadas para mitigar los efectos de la degradación ambiental, conservar la biodiversidad y asegurar el bienestar humano de los habitantes de la cordillera de Nahuelbuta.

ABSTRACT

Ecosystem services (ES) are benefits obtained by people from ecosystems. The Nahuelbuta mountain range, a unique biodiversity hotspot, provides multiple ES, but has suffered significant degradation due to the replacement of its ecosystems, decreasing the capacity to provide essential services for human well-being. It is necessary to identify restoration opportunities to recover the capacity to provide the ES most in demand by its inhabitants. The present study focused on identifying restoration opportunities in the Nahuelbuta mountain range through an integrated multi-scale evaluation of ES, for which a survey was applied to relevant stakeholders, highlighting: Regulation of the hydrological cycle and water flows, erosion control and temperature regulation, as the three ES most in demand. Three restoration scenarios (A, B and C) were designed, which contemplated the replacement of anthropic ecosystems with natural ones under the following criteria: protection of watercourses, altitudinal range and current erosion rate, at a landscape and communal scale, for the 20 communes that make up its territory, in order to increase its future supply capacity. At the landscape scale, the service Regulation of the hydrological cycle and water flows presented the greatest increase, with 18%, under scenario B. At the communal scale, San Pedro de Paz presented the greatest increase for this same service, with 66%, under scenario C. At the communal scale, San Pedro de la Paz, presented the highest increase for this same service, with 66 %, under scenario C. The restoration opportunities

identified should be integrated into the territorial planning instruments, considering their high potential to provide ES, the challenge is to design appropriate scenario configurations to mitigate the effects of environmental degradation, conserve biodiversity and ensure the human wellbeing of the inhabitants of the Nahuelbuta mountain range.

I. INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos (SE) son los beneficios o contribuciones directas e indirectas que las personas adquieren de los ecosistemas (Costanza, 2008; Daily, 1997; MEA, 2005; Sukhdev et al. 2014). Forman un eje central que relaciona la naturaleza con las necesidades humanas, ambos componentes de la ciencia de la sustentabilidad del paisaje. Esta ciencia considera esencial abordar las interacciones socio-ecológicas a través de una planificación territorial que asegure la capacidad de los paisajes de proveer SE de forma consistente, y a largo plazo, para mantener y mejorar el bienestar humano (Wu, 2013). El concepto de SE fue propuesto formalmente por Daily (1997) con el objetivo de hacer explícito que la vida humana depende de la biodiversidad y los ecosistemas naturales. Sin embargo, la publicación de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA) en 2005, fue la que impulsó al uso del concepto de SE más allá del ámbito científico, marcando un hito al convertirse en un nuevo paradigma para la conservación de la biodiversidad, incidiendo en nuevas políticas de gestión ambiental pública y planificación territorial (De Groot et al. 2010; De la Barrera et al. 2015; Wainger et al. 2010).

Existen diferentes propuestas de clasificación de SE, actualmente está vigente la propuesta de clasificación internacional denominada CICES (*Common International Classification of Ecosystem Services*, por sus siglas en inglés), que

ha sido diseñada para estandarizar las diferentes denominaciones existentes, actualizándose periódicamente y simplificando el análisis especialmente en el contexto de las cuentas ambientales y ecosistémicas (MMA, 2014). La clasificación CICES, en su actual versión 5.1, define tres tipos de SE finales: regulación, provisión y culturales (European Environment Agency, 2019), los cuales pueden ser cuantificados, valorizados y cartografiados (mapeados) mediante modelos espacialmente explícitos.

La cuantificación y valorización de SE, a través del uso de indicadores espacialmente explícitos, se puede realizar según su oferta y demanda (Burkhard et al., 2012; Wolff et al., 2015). La oferta se define como la capacidad de una zona específica, como un ecosistema, para proporcionar un conjunto específico de bienes y SE en un periodo de tiempo determinado, también se denomina capacidad de provisión de SE (Burkhard et al., 2012; MMA, 2014; Villamagna et al., 2013); los ecosistemas tienen diferentes funciones basadas en sus estructuras y procesos, por ende, su capacidad para proveer determinados SE utilizados por los seres humanos puede variar considerablemente (Bastian et al., 2012; Wu, 2013). La demanda es definida como la suma de todos los bienes y SE que se consumen o utilizan actualmente en una zona concreta durante un periodo de tiempo determinado, representando ésta última, una perspectiva desde el punto de vista económico (Burkhard et al., 2012). En otra perspectiva, la demanda se define, desde el punto de vista de los deseos y preferencias, como

la cantidad de un servicio requerido o deseado por la sociedad, es decir, representa un enfoque de valoración perceptual (Burkhard et al., 2012; Villamagna et al., 2013). En base a lo anterior, y para fines de este estudio, la demanda se entiende como los deseos, preferencias y necesidades que las comunidades y/o actores locales tienen de los SE provistos por los diferentes ecosistemas que componen un paisaje (Arriagada & Aguayo, 2018; Burkhard et al., 2012; Pineda et al., 2019). En este último enfoque, la demanda de SE está relacionada con las necesidades que las personas tienen respecto al uso de estos servicios e influye en la generación de políticas y voluntades para conservarlos, asegurando la provisión actual y/o futura (Esquivel, 2020; Villamagna et al., 2013; Wolff et al., 2015).

El desarrollo de modelos espacialmente explícitos de SE es considerado de gran utilidad para la comprensión de las interacciones entre sociedad y naturaleza, ya que permite visualizar los sitios específicos donde un SE es provisto por un ecosistema o donde es demandado y utilizado por la sociedad para su bienestar (Burkhard et al., 2012). Además, permite mejorar su reconocimiento y facilitar la aplicación del concepto de SE en las instituciones encargadas de la gobernanza territorial constituyendo una herramienta útil como apoyo a la toma de decisiones públicas en temas ambientales (Burkhard et al. 2009; Daily & Matson, 2008). Una vez que se conoce qué servicios pueden ser suministrados por los ecosistemas y cuáles son los servicios demandados por el sistema social, se puede evaluar

de forma integrada cuál es el flujo de servicios que se da en el sistema socio-ecológico. Esto contribuye a identificar aquellos ecosistemas claves en la provisión de SE para protegerlos (Potschin & Haines-Young, 2010), además permite ejecutar acciones que contribuyan a la restauración de los SE que posean bajos niveles de oferta y altos niveles de demanda por parte de las personas.

A lo largo de las últimas décadas los cambios de usos de suelo y la intensificación del uso de la tierra han modificado la composición y configuración de los ecosistemas boscosos provocando la pérdida y fragmentación de hábitat, lo que ha conllevado a una pérdida de biodiversidad a diferentes niveles (Lindenmayer et al., 2013; 2016), afectando, además, la integridad ecológica, relacionada con la capacidad de un paisaje de mantener sus procesos ecológicos claves (Forman, 1995; Koschke et al., 2012). Esta alteración a gran escala de los ecosistemas naturales, como el efecto de la sustitución de bosque nativo por plantaciones forestales o cultivos agrícolas, ha provocado un aumento en los servicios de provisión (como madera o alimentos), en desmedro de los servicios de regulación y culturales (Vitousek et al., 1997). Este desbalance en la oferta, en general inclinado hacia algunos servicios de provisión, pone en manifiesto la necesidad de incluir también la demanda en las evaluaciones de SE, basada en que las decisiones de uso y gestión del territorio están influenciadas por la demanda

humana de bienes y servicios suministrados por los ecosistemas (Burkhard et al., 2012; Syrbe & Walz, 2012; Wolff et al., 2015).

En Chile evidencias de este desbalance en la oferta pueden visualizarse en la zona central, principalmente en la cordillera de la costa de las regiones del Maule y Biobío, donde los cambios de uso de suelo y la pérdida de bosques nativos se asocia fuertemente con el aumento de plantaciones de especies exóticas destinadas a la producción de madera y pulpa para celulosa (Echeverría et al. 2006; Echeverría et al., 2019; Heilmayr et al., 2016). Estudios realizados en los bosques templados de Chile han concluido que la disminución de la oferta de los SE de regulación y culturales está directamente ligada a la pérdida de diversidad del hábitat del bosque nativo (Rodríguez-Echeverry et al. 2018), por lo cual, ante la disminución de la oferta, la demanda inevitablemente se ve afectada (Esquivel, 2020; Wolff et al., 2015).

La cordillera de Nahuelbuta, cuyas formaciones vegetacionales la enmarcan dentro de los bosques templados de Chile, es considerada como un área de alto valor de biodiversidad, sin embargo, ha sufrido una intensa presión antrópica que ha transformado sus paisajes, principalmente por efecto de la sustitución del bosque nativo por plantaciones forestales, observándose una pérdida del 33% del bosque nativo entre 1986 y 2011, proceso que ha generado una fragmentación avanzada de estas coberturas naturales (Otavo & Echeverría,

2017). En este territorio resulta clave determinar la oferta y los SE más demandados a escala de paisaje para analizar las oportunidades de restauración de SE, a modo de recuperar su capacidad de provisión cuando la oferta no supla la demanda. Estas oportunidades se pueden identificar por medio de análisis y modelamiento espacial a través de la simulación del reemplazo de coberturas y usos de suelo (“CUS” de ahora en adelante), con baja capacidad de provisión de SE por CUS que tengan mayor capacidad de provisión, mediante una modelación basada en escenarios de restauración (Frank et al., 2014). La identificación de oportunidades de restauración a escala de paisaje y a escala comunal corresponde a un aporte a la implementación de políticas ambientales y estrategias orientadas a la planificación territorial, que consideren las cada vez más limitadas capacidades de los diversos ecosistemas para ofertar servicios, junto con la creciente demanda de SE de los habitantes del territorio (Frank et al., 2014; le-Vásquez & Gutiérrez, 2018).

El objetivo del presente estudio fue analizar las oportunidades de restauración de la cordillera de Nahuelbuta mediante una evaluación integrada de servicios ecosistémicos a multiescala. Los resultados permitieron identificar las oportunidades de restauración para mejorar la capacidad de provisión de los SE más demandados en las 20 comunas cuyo territorio pertenece a la cordillera de Nahuelbuta.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la cordillera de Nahuelbuta, franja montañosa perteneciente al relieve de la cordillera de la costa que se extiende por aproximadamente 200 km desde el río Biobío, por el norte, hasta el río Imperial, por el sur, abarcando parte de las regiones del Biobío y la Araucanía (Figura 1). El polígono de delimitación se basa en el estudio de Otavo & Echeverría (2017) en el que se utilizaron como base criterios geológicos, pedológicos, vegetacionales y altimétricos, fijándose la cota mínima altitudinal en 200 m s.n.m, constituyendo el cerro Alto Nahuelbuta su cota máxima con 1.530 m s.n.m. Posee una superficie aproximada de 681.938 ha; las precipitaciones anuales fluctúan entre 1.000 y 2.000 mm, con frecuentes nevadas invernales por sobre los 1.000 m s.n.m. con una temperatura media anual entre los 8 y 14°C (Ramírez de Arellano et al., 2018). La Cordillera actúa como biombo climático, por ello el clima de la zona de Angol, ciudad situada en su vertiente oriental, es relativamente árido, presentándose muy semejante a los de Linares o Curicó, localidades ubicadas por lo menos 200 kilómetros más al norte (Di Castri & Hajek, 1976).

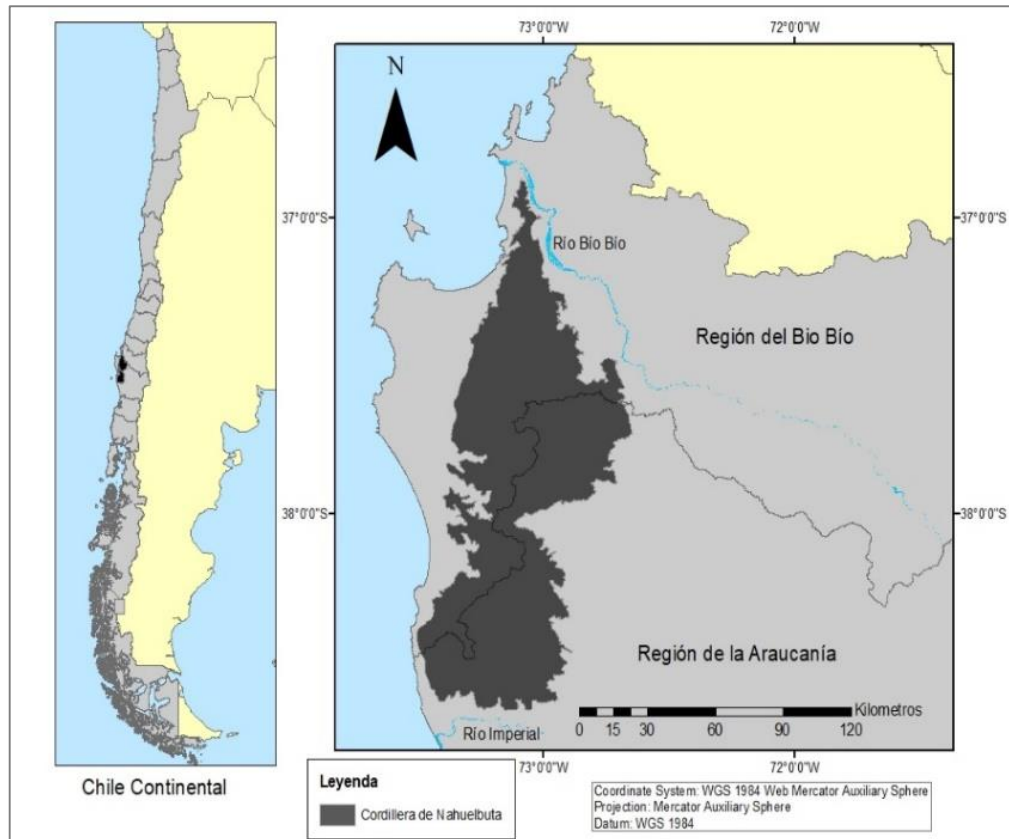


Figura 1.Ubicación de la cordillera de Nahuelbuta.

La división político-administrativa del área de estudio está conformada y subdividida por un total de 20 comunas, cuya superficie en parte pertenece al polígono de delimitación antes mencionado: San Pedro de la Paz, Coronel, Lota, Santa Juana, Nacimiento, Arauco, Curanilahue, Los Álamos, Cañete, Contulmo, Tirúa, Renaico, Angol, Purén, Los Sauces, Lumaco, Galvarino, Nueva Imperial, Cholchol, Carahue (Figura 2).

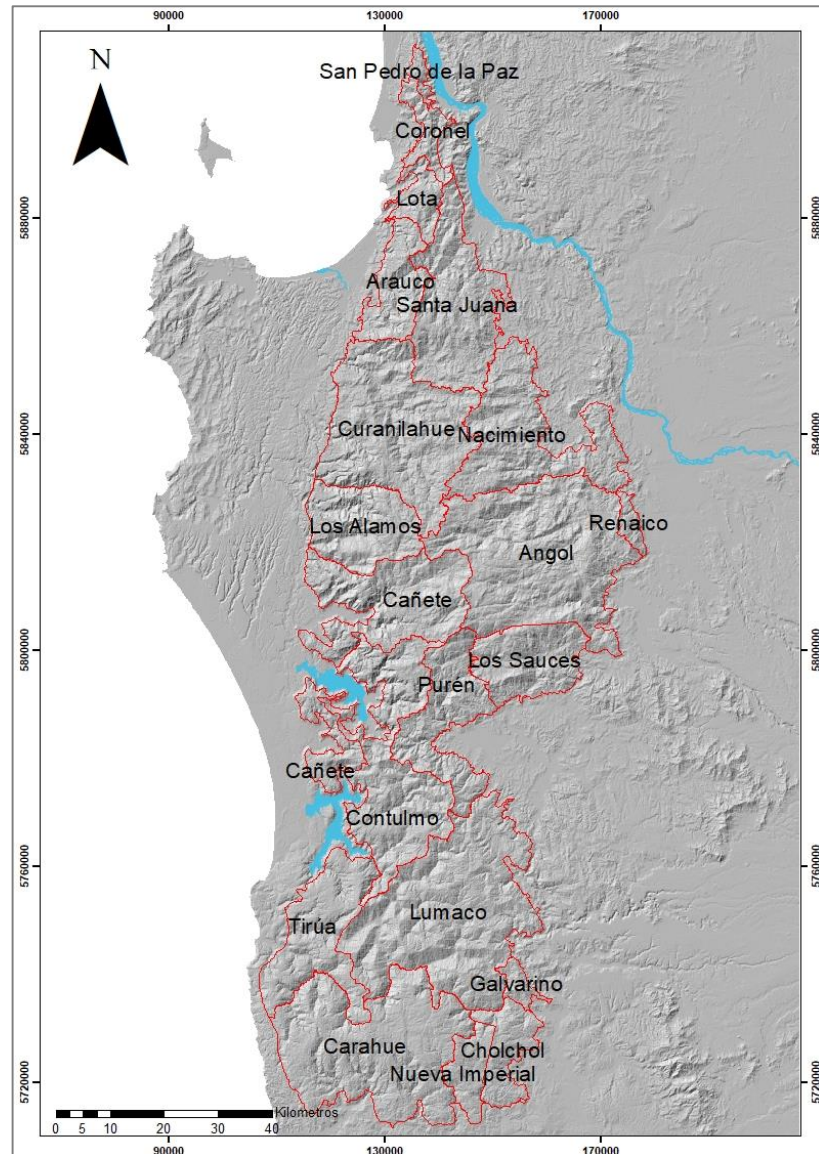


Figura 2. Comunas pertenecientes al área de estudio.

2.2 Cartografía de coberturas y usos de suelo

Mediante el proyecto FONDECYT Regular 1181374 (2018), ejecutado por el Laboratorio de Ecología de Paisaje (LEP), se obtuvo la cartografía de las

coberturas y usos de suelo (CUS) del área de estudio para el año 2017. Preliminarmente, para Nahuelbuta, se identificaron 33 categorías de CUS disponibles en formato ráster a una resolución espacial de píxel de 30 x 30 m. Mediante el software *ArcGIS 10.4* se reclasificaron y simplificaron las categorías de CUS agrícolas y pastizales, cuya diferencia no era mayormente relevante para este estudio, obteniéndose en total 21 CUS (Figura 3, Tabla A1), esta capa constituye la condición inicial (actual) del área de estudio para efectos del posterior modelamiento.

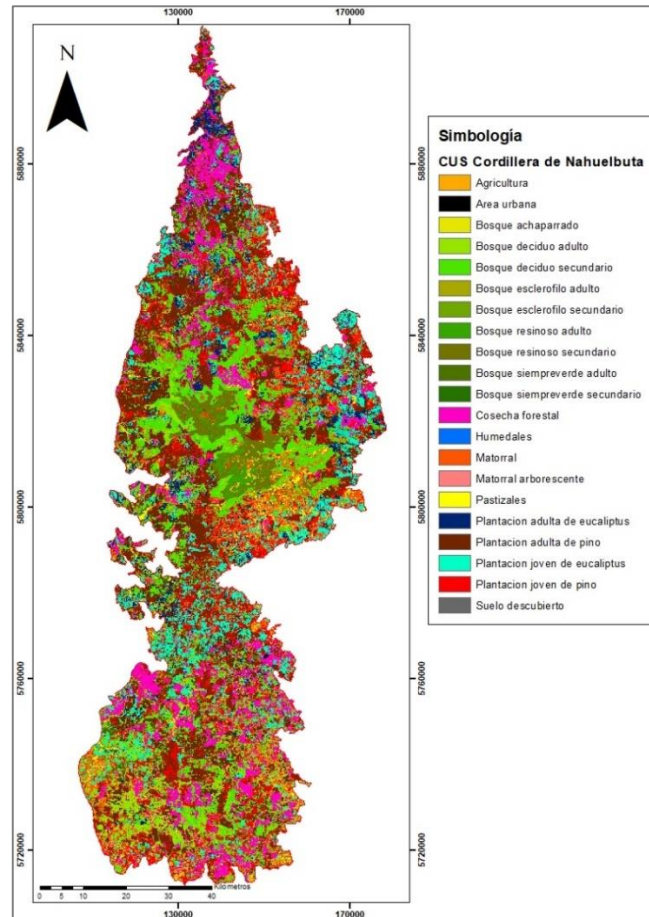


Figura 3. Coberturas y usos de suelo de la cordillera de Nahuelbuta para el año 2017.

2.3 Determinación de la oferta de servicios ecosistémicos

La oferta de SE fue obtenida con antelación a este estudio, mediante la construcción de indicadores cuantificables, espacialmente explícitos de 10 SE altamente demandados, en un área que comprende las regiones del Maule, Ñuble, Biobío y Araucanía (Tabla 1, Tabla A2), acción ejecutada dentro del anteriormente mencionado proyecto FONDECYT. Para los 21 CUS del área de

estudio se determinó su capacidad de provisión en base a los 10 SE disponibles, normalizándose en una escala de 0 a 100, que va de menor a mayor magnitud. La capacidad de provisión para cada CUS fue tabulada y se encuentra disponible en la matriz de evaluación (Tabla A3).

Tabla 1. Servicios ecosistémicos e indicadores de provisión evaluados bajo el proyecto FONDECYT Regular 1181374 disponibles para el presente estudio.

Sección	Clase	Indicador	Unidad
Regulación y soporte	Regulación de la temperatura local	Discomfort index	°C
Regulación y soporte	Control de erosión	Pérdida de suelo	T/ ha y-1
Regulación y soporte	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	Diferencia volumétrica	%
Regulación y soporte	Regulación de la condición química del agua	Pérdida de calidad de agua	%
Regulación y soporte	Regulación de la composición química de la atmosfera	Secuestro de carbono	T C/ha
Provisión	Plantas terrestres cultivadas con propósitos nutricionales	Producción de alimento	Kcal/ha
Provisión	Madera aserrada	Madera aserrada	M ³ /ha
Provisión	Plantas cultivadas como fuente de energía	Biomasa para leña	T/ha
Provisión	Fibras derivadas de plantas cultivadas	Pulpa	T/ha
Cultural	Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y experienciales	Potencial de recreación	%

2.4 Determinación de la demanda de servicios ecosistémicos

La demanda, para los 10 SE en evaluación, se obtuvo mediante la aplicación de una encuesta a actores territoriales dentro del área de estudio, para ello se consideró a cinco tipos de actores territoriales o partes interesadas relevantes: 1) Persona natural habitante de la Cordillera de Nahuelbuta, 2) Funcionario(a) de organismo público (Municipalidad, Gobierno Regional, CONAF, Ministerio del Medio Ambiente, etc.), 3) Integrante de ONG, Fundación u otra organización registrada, 4) Representante o integrante de alguna empresa (cuyas actividades se desarrollan en la cordillera de Nahuelbuta) y 5) Docente o integrante de la academia (Universidad, Instituto, Centro de Investigación, etc.); a modo de incluir la mayor cantidad de partes interesadas en la toma de decisiones dentro del territorio (Krishnaswamy, 2004; UICN & WRI, 2014).

Las partes interesadas son instituciones, asociaciones o personas que se ven afectadas por los cambios de CUS. Pueden influir fuertemente tanto en el desarrollo de escenarios de cambio de CUS como en la toma de decisiones, por ello su participación en los estudios de SE es indispensable (Koschke et al., 2014). Para el caso de este estudio, se siguieron modelos participativos, de recopilación de información, que integran la valoración perceptual de los actores locales presentes en el territorio, para así determinar el nivel o valor de

importancia que cada servicio tiene para ellos (Bidegain et al., 2019; Burkhard et al., 2012; Esse et al., 2014; Nahuelhual et al., 2013; Sherrouse *et al*, 2011).

La encuesta fue construida en *Office Forms* (Figura A1), y tuvo como objetivo obtener información de los beneficios que reciben las personas de los diferentes ecosistemas que existen en la Cordillera de Nahuelbuta, a modo de conocer las principales demandas de sus habitantes. A las personas encuestadas se les proporcionó una lista con los SE disponibles, una definición del concepto general de ecosistema y SE, junto a una breve descripción y/o ejemplo de cada uno.

En la encuesta las personas valorizaron los SE de acuerdo con su percepción de importancia mediante una escala tipo Likert de cinco categorías, que van desde “No es importante”, “Poco importante”, “Medianamente importante”, “Importante” hasta “Muy importante” (Likert, 1932; Koschke et al., 2012).

De los 10 SE incluidos en la encuesta, se seleccionaron los tres que tuvieron mayor frecuencia de votos para la opción “Muy Importante”, estableciéndose el orden de prioridad de restauración dado el número de menciones; esta opción se seleccionó como representativa de los SE más demandados por los actores territoriales, a modo de priorizar sus principales necesidades, diseñar oportunidades de restauración coherentes y simplificar el análisis final.

2.5 Cartografía y cálculo de la capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos más demandados en el área de estudio

Una vez obtenidos los tres SE más demandados en la cordillera de Nahuelbuta, se cartografió su distribución espacial por servicio en base a la capacidad de provisión de la matriz de evaluación, a modo de obtener una perspectiva general de las zonas que poseen mayor oferta. Posteriormente, se obtuvo su respectiva capacidad de provisión actual de SE a escala de paisaje y a escala comunal para la condición inicial (CUS para el año 2017) mediante el cálculo de la media ponderada por superficie para cada servicio. Para ello, a través de *Excel*, se aplicó la fórmula de media ponderada (Figura 4) que utilizó la cuenta de píxeles y la capacidad de provisión por cada CUS tabulados en la matriz de evaluación y obtenidos de la tabla de atributos del mapa de condición inicial. Este mismo procedimiento se utilizó para calcular la capacidad de provisión a escala de paisaje y a escala comunal de los tres escenarios de simulación de restauración de SE, contrastándolos con la condición inicial.

$$\bar{x}_{p(a)} = \frac{\sum_i^n (x_i * p_i)}{\sum_i^n x_i}$$

Figura 4. Media ponderada de la capacidad de provisión de SE del paisaje, donde $\bar{x}_{p(a)}$ es la media ponderada del SE a, x_i representa el número de píxeles que poseen capacidad de provisión p_i .

2.6 Simulación de escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados

Con el objetivo de aumentar la capacidad de provisión de los tres SE más demandados, para avanzar hacia la sustentabilidad del paisaje, se simularon escenarios de restauración de SE a través de un reemplazo de CUS antrópicas a CUS naturales que habrían existido si no hubiese habido cambios de uso del suelo, mediante las siguientes criterios: (i) el establecimiento de una zona de protección alrededor de los cursos de agua, (ii) considerando un rango altitudinal del paisaje y de las subcuencas presentes en el área de estudio, y (iii) considerando la tasa de erosión actual.

La modelación de escenarios de restauración se realizó mediante el software *ArcGIS 10.4*. y *Excel*, basada en el proceso realizado por Frank et al. (2014) mediante el software *GISCAM*E (Fürst et al., 2010), el cual permite representar condiciones pasadas o futuras de una región en específico, a partir de simulaciones donde los cambios en las CUS están determinados por cambios en la matriz de evaluación. Para el caso de este estudio se homologó el proceso que permite realizar simulaciones de reemplazo de CUS antrópicas por CUS naturales a través de reglas ambientales que implicaron el uso de una capa de cursos de agua (ríos y esteros), un modelo digital de elevación (DEM) y una capa de erosión actual, estos dos últimos disponibles gracias al mismo proyecto FONDECYT que enmarca el presente estudio.

La definición de los escenarios de restauración consideró sólo el reemplazo de las CUS antrópicas pertenecientes a las áreas definidas por los criterios (i), (ii) y (iii), cuya combinación da origen a los escenarios A, B y C (Tabla 2), las CUS naturales ya presentes en estas áreas no sufrieron alteración.

Tabla 2. Criterios usados para definir escenarios de restauración de SE.

Escenario	Zona protección cursos de agua	Rango altitudinal	Tasa de erosión actual
A	100 m a cada lado	Tercio superior del paisaje	-
B	100 m a cada lado	Quinto superior de las subcuencas	-
C	100 m a cada lado	-	≥50 t/ha

Las CUS antrópicas a reemplazar correspondieron a: Agricultura, Cosecha forestal, Pastizales, Plantación adulta de eucaliptus, Plantación adulta de pino, Plantación joven de eucaliptus, Plantación joven de pino y Suelo descubierto. Las CUS naturales objetivo correspondieron a: Bosque siempre verde secundario, para las zonas de protección de cursos de agua y Bosque deciduo secundario, para las zonas que incluyeron rango altitudinal y tasa de erosión actual, estas fueron seleccionadas simulando la trayectoria natural que los ecosistemas del área de estudio tomarían si no hubiese habido degradación, como guía se usaron los pisos vegetacionales de Luebert & Plischoff (2006), que evidenciaron la presencia predominante de vegetación asociada al bosque caducifolio,

vegetación que fue homologada con las CUS naturales disponibles en el FONDECYT mencionadas anteriormente; además ambas CUS naturales seleccionadas correspondieron a las que registraron los mayores valores de capacidad de provisión para los tres SE más demandados dentro del área de estudio (Tabla A3).

2.6.1 Escenario A

Para el establecimiento de una zona de protección alrededor de los cursos de agua se utilizó una capa de red hídrica del área de estudio, en formato polilínea, a la cual se le aplicó un área buffer de 100 m a cada lado, este nuevo polígono fue convertido en un ráster del mismo tamaño de píxel que las CUS (30 m), tras lo cual se extrajeron las CUS antrópicas coincidentes con esta área, generando un nuevo ráster de CUS antrópicas pertenecientes a la zona de protección alrededor de los cursos de agua (Figura 5).

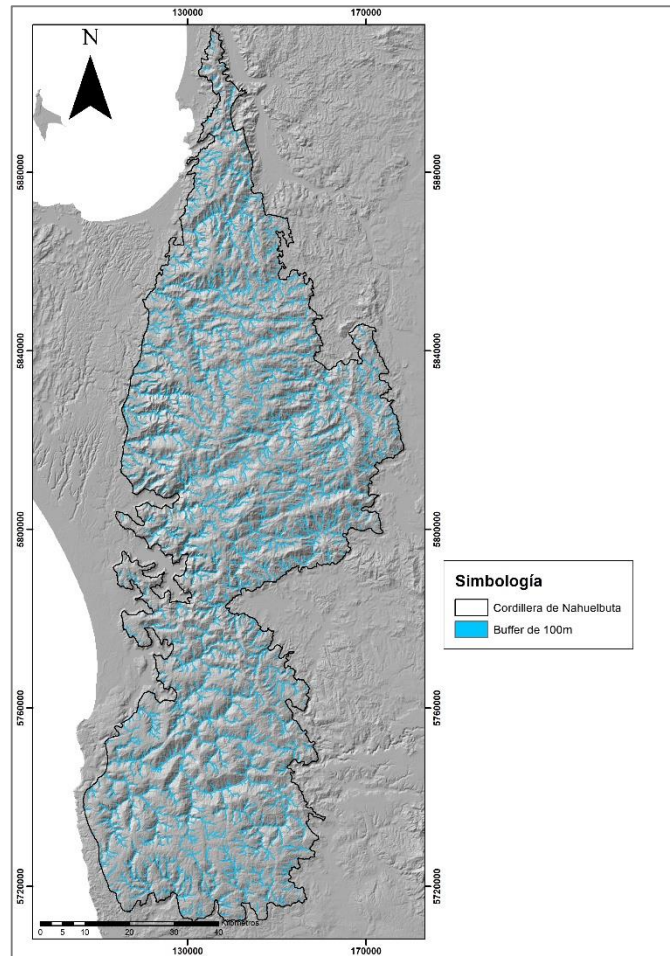


Figura 5. Zonas de protección de 100 m alrededor de los cursos de agua del paisaje de estudio.

El establecimiento de estas zonas de protección de cursos de agua se sustenta en su alta relevancia ecológica, dado que proporcionan hábitat y aumentan la conectividad entre parches de vegetación nativa favoreciendo la movilidad de las especies que los habitan (Moller, 2011; Romero et al., 2014), además, se menciona que es fundamental mantener una adecuada distancia entre un curso de agua (río o estero para el caso de este estudio) y las áreas destinadas a usos

productivos, como actividades forestales o agrícolas, para evitar el ingreso directo al agua de contaminantes y sedimentos que generan contaminación difusa, mucho más difíciles de controlar (Jullian et al., 2018; Lara et al., 2009; Little et al., 2010; Little et al., 2014, Romero et al., 2014).

Para obtener las CUS antrópicas pertenecientes al tercio superior del rango altitudinal del paisaje se utilizó, en primer lugar, el DEM (*Digital Elevation Model*) del área de estudio, reclasificándolo en tres clases, a modo de extraer la tercera parte de mayor altitud; luego, con esta nueva capa en formato ráster, se extrajeron las CUS antrópicas pertenecientes a este tercio superior, las que fueron unidas a las CUS antrópicas pertenecientes a la zona de protección de 100 m alrededor de los cursos de agua, generando un mosaico de CUS antrópicas que fueron reemplazadas por las CUS naturales correspondientes (Figura 6).

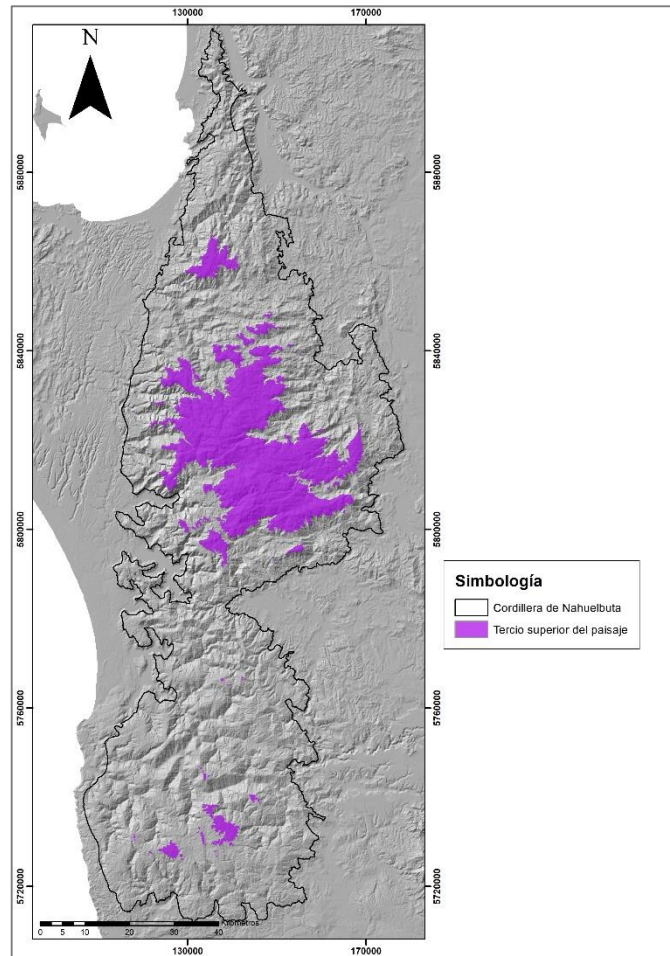


Figura 6. Tercio superior del rango altitudinal del paisaje de estudio.

El tercio superior del paisaje consideró los ecosistemas de altura, quienes cumplen un importante rol regulador del ciclo hidrológico al abarcar, en el caso de Nahuelbuta, áreas cercanas a bosques nativos primarios; estas áreas tienen mayor capacidad de regular la recarga de agua a las napas subterráneas por medio de la intercepción, infiltración y retención de sedimentos (Jullian et al., 2018; CONAF & MINAGRI, 2016), además favorece la conectividad con otros grandes parches nativos situados en las partes más altas de la cordillera.

2.6.2 Escenario B

Para este escenario se utilizó el mismo ráster de CUS antrópicas pertenecientes a la zona de protección alrededor de los cursos de agua generado en el escenario A.

Para obtener las CUS antrópicas pertenecientes al quinto superior de las subcuencas del área de estudio se recortó una máscara, en formato polígono, de cada una de las 42 subcuencas abastecedoras de agua, luego se extrajo el DEM de cada una de ellas, reclasificándolo en cinco clases, a modo de extraer la quinta de mayor altitud. Luego se generó un mosaico con estos 42 DEM y de esta nueva capa en formato ráster se extrajeron las CUS antrópicas, las que fueron unidas a las CUS antrópicas pertenecientes a la zona de protección de 100 m alrededor de los cursos de agua, generando un mosaico de CUS antrópicas que fueron reemplazadas por las CUS naturales correspondientes (Figura 7).

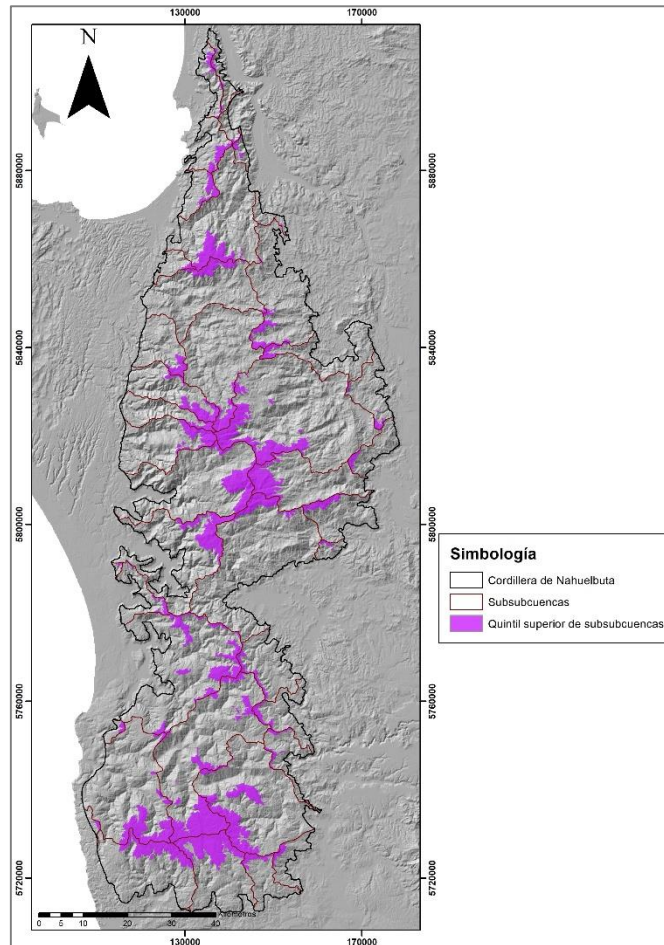


Figura 7. Quintil superior del rango altitudinal de cada subsubcuenca en el paisaje de estudio.

El quinto superior de las subcuencas del área de estudio consideró las cabeceras de unidades hidrográficas más pequeñas que una cuenca. El mantener una adecuada cobertura vegetal permite que estas zonas altas regulen naturalmente el flujo de los recursos hídricos, además de contribuir a la retención de sedimentos que fluyen hacia partes más bajas favoreciendo el aprovechamiento sostenido de toda la unidad hidrográfica y permitiendo el desarrollo de

actividades económicas sustentables a largo plazo (Romero et al., 2014; CONAF & MINAGRI, 2016).

2.6.3. Escenario C

Para este escenario se dispuso de una capa de erosión actual, en formato ráster, la cual fue reclasificada en dos clases: Erosión actual < 50 t/ha y Erosión actual ≥ 50 t/ha, extrayéndose las CUS antrópicas pertenecientes a esta última clase. De este nuevo ráster se extrajo una capa con las CUS antrópicas pertenecientes a las zonas de protección de 100 m alrededor de cada curso de agua, las cuales fueron propuestas a ser reemplazadas por Bosque siempre verde secundario, mientras que el resto de las áreas con Erosión actual ≥ 50 t/ha que no coincidieron con la zona de protección de 100 m fueron propuestas a ser reemplazadas por Bosque deciduo secundario (Figura 8).

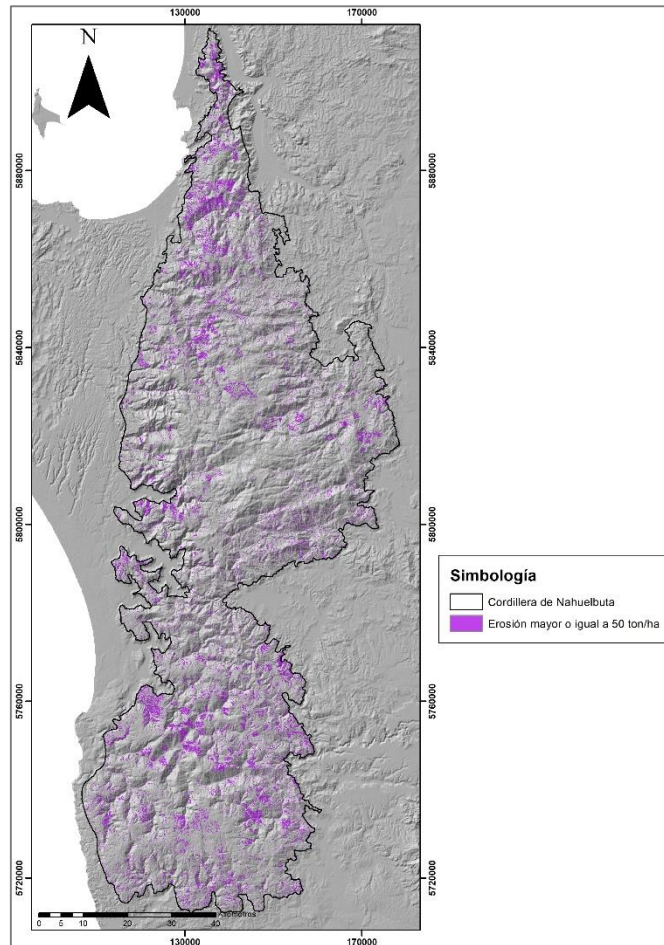


Figura 8. Erosión mayor o igual a 50 t/ha en el paisaje de estudio.

La definición de este escenario se basó en el sistema de clasificación para evaluar la degradación del suelo (FAO, 1979) que establece rangos para la erosión actual y considera por sobre las 50 t/ha como erosión alta, la modelación se construyó siguiendo el estudio de Bonilla et al. (2010) donde establece escenarios alternos de cobertura vegetal para recuperar suelos con alta susceptibilidad a erosión.

Cada escenario fue modelado y cartografiado a escala de paisaje, posteriormente se extrajo una máscara de cada escenario por cada una de las 20 comunas, valiéndose de la capa de división político-administrativa, a fin de realizar la misma simulación y posterior análisis a escala comunal.

Posteriormente, una vez modelados los tres escenarios, y sus resultados asociados, fueron expuestos, consensuados y validados mediante consulta a un experto, en este caso a Edgardo Flores Flores, actor clave del área de estudio y presidente de la Fundación Nahuelbuta Natural, organización sin fines de lucro que realiza labores de educación, difusión e investigación de los ecosistemas de la cordillera de Nahuelbuta.

2.7 Cálculo de la capacidad de provisión y variación porcentual para los escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados

La capacidad de provisión de SE para los escenarios a escala de paisaje y a escala comunal se calculó mediante el uso de las tablas de atributos correspondiente a la capa de la condición inicial y la de cada uno de los tres escenarios, estas se exportaron a *Excel* ocupándose específicamente los campos “cuenta de píxeles”, “CUS” y “capacidad de provisión de los SE más demandados”.

A escala comunal se realizó el mismo procedimiento realizando una máscara de la capa de CUS de condición inicial y de escenarios para cada una de las 20 comunas, extrayendo sus respectivas tablas de atributos y exportándolas posteriormente a *Excel*.

Para los tres escenarios se aplicó una suma ponderada entre “capacidad de provisión de los SE más demandados” y “cuenta de píxeles” para cada “CUS” (Mismo procedimiento aplicado en la sección 2.5), esto se hizo a escala de paisaje y a escala comunal. Luego, a la cuenta de píxeles de cada CUS antrópica, correspondiente a la condición inicial a reemplazar se le restó la cuenta de píxeles de cada CUS antrópica correspondiente a cada escenario, el cual se sumó a la cuenta de píxeles de Bosque deciduo secundario. Para el caso de las CUS antrópicas pertenecientes al buffer alrededor de los cursos de agua se hizo el mismo procedimiento, pero esta vez se sumó a la cuenta de píxeles de Bosque siempreverde secundario.

Luego para analizar de manera comparativa los resultados entre los tres escenarios propuestos y la condición inicial se calculó la variación porcentual de la capacidad de provisión de SE, a escala de paisaje y a escala comunal para cada una de las 20 comunas. Este cálculo corresponde a una forma de

normalización para comparar resultados en áreas que no son uniformes en cantidad de superficie (ESRI, 2023).

Para obtener la variación porcentual, se utilizó la capacidad de provisión de la condición inicial y la de cada uno de los tres escenarios aplicándose la siguiente fórmula:

$$\Delta\% = \left[\frac{\text{Capacidad provisión escenario} - \text{Capacidad provisión observada}}{\text{Capacidad provisión observada}} \right] \times 100$$

Posteriormente, en *ArcGIS*, mediante la herramienta *tabulate area* se identificó y cuantificó la superficie a restaurar por comuna para cada escenario de restauración de los tres SE más demandados en el área de estudio. Este análisis permitió determinar en qué medida impacta la simulación de diversos escenarios de restauración en las comunas y visualizar donde se deben realizar las acciones de restauración para lograr mejoras sustanciales en la capacidad de provisión de SE.

Finalmente, luego de la evaluación a escala de paisaje y comunal, se analizaron las implicancias de los resultados de este estudio para la sustentabilidad del paisaje y planificación territorial mediante la vinculación con instrumentos de

gestión territorial, como el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) y el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO), que consideraron gestión y restauración de ecosistemas claves para la provisión de SE más demandados, a fin de lograr un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes de la cordillera de Nahuelbuta.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y respectiva discusión se presentan en seis secciones: demanda de SE, capacidad de provisión de los SE más demandados, simulación de escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados, oportunidades de restauración de SE a escala de paisaje, oportunidades de restauración de SE a escala comunal, e implicancias para la sustentabilidad del paisaje y planificación territorial.

3.1 Demanda de servicios ecosistémicos

La encuesta para obtener la demanda de SE fue contestada por 63 actores territoriales, cuyas preferencias, en cuanto a nivel de importancia de los SE, se grafican y comparan en la Figura 9.

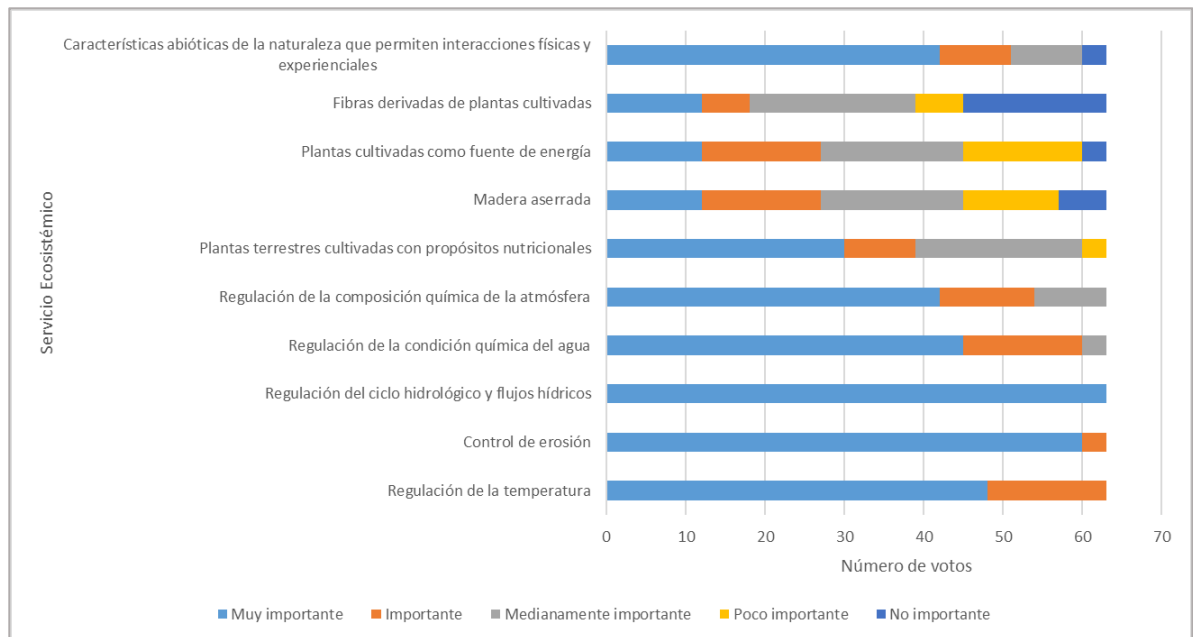


Figura 9. Frecuencia de respuestas para cada servicio ecosistémico según su nivel de importancia para los actores territoriales. n=63

El 100 % de los encuestados contestaron que el SE Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos es “muy importante” para ellos, por lo tanto, constituye la primera preferencia. Por otro lado, un 95,2 % del total de encuestados, contestaron que el SE Control de erosión es “muy importante” para ellos, constituyendo la segunda preferencia. Finalmente, el 76,2 % del total de encuestados, se inclinaron por el SE Regulación de la temperatura como “muy importante”, constituyendo la tercera preferencia. En resumen, los tres SE más demandados, por los habitantes del territorio, en orden de mayor a menor preferencia según la elección de la opción “muy importante” fueron: Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, Control de erosión y Regulación de la temperatura.

Los resultados de la encuesta evidenciaron la inclinación de las personas por los servicios de regulación, los cuales son mucho más difíciles de percibir que los de provisión, debido a que son menos tangibles y a la mayor complejidad de los procesos ecológicos involucrados (Pagiola et al., 2004; TEEB, 2010). Otros estudios de preferencias sociales de SE (Martin-López et al., 2012) también corroboran la inclinación de las personas hacia los SE de regulación, en especial el SE regulación del ciclo hidrológico, explicándose por una combinación de factores, entre ellos los medios de comunicación, la publicidad y los programas educativos, además esta tendencia está en concordancia con los conflictos por incompatibilidad entre los SE que se proveen en el paisaje y las demandas de los habitantes de un territorio que ha sufrido a gran escala espacio-temporal drásticos cambios de uso de suelo (Figueroa et al., 2013; Otavo & Echeverría, 2017). Particularmente, la inclinación de las personas por el SE de Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, se explica porque este es vital para el ser humano, ya que de él depende la disponibilidad de agua potable para consumo y para uso en actividades silvoagropecuarias. Su actual provisión está amenazada por el aumento de la población, actividades humanas y mayor frecuencia de sequías a raíz del cambio climático (Bidegain et al., 2019). Distintos autores aseveran que las cuencas con coberturas forestales poseen menor capacidad de provisión de este SE en comparación con cuencas con coberturas naturales, derivado del aumento de la escorrentía superficial (Jullian

et al., 2018; Lara et al., 2009; Little et al., 2009; Oyarzún & Huber, 1999), alterando el balance hídrico y afectando directamente a los ecosistemas y sus habitantes (Frene & Nuñez, 2010).

Para el SE de Control de erosión, la importancia dada por las personas se correlaciona con lo evidenciado por Aburto et al. (2020), donde suelos de terrenos montañosos con coberturas forestales pueden sufrir pérdidas de suelo hasta cuatro veces más que los mismos suelos con coberturas naturales boscosas. Por ello, surge la necesidad de mejorar la comprensión de los procesos erosivos, para evitar malas prácticas especialmente en períodos de cosecha forestal, y adoptar medidas que favorezcan la recuperación de suelos degradados y erosionados (Alaniz et al., 2021).

Para el SE Regulación de la temperatura las preferencias demuestran la necesidad de contar con áreas de vegetación continua en el paisaje, con alta capacidad de provisión de este servicio. Las coberturas forestales que actualmente dominan Nahuelbuta periódicamente están sujetas a ciclos de cosecha, dejando extensas áreas de suelo descubierto, lo que favorece el calentamiento de la superficie por transferencia de calor, al quedar expuesto a la radiación solar (Revueltas et al., 2020). Dado lo anterior, las coberturas forestales no proveen adecuadamente este SE, debiendo considerarse restaurar el paisaje con coberturas naturales para aumentar su capacidad de provisión.

Otros autores (Agbenyega et al., 2009; Bidegain et al., 2019) también afirman una inclinación de los beneficiarios por los SE de recreación. Esta tendencia también fue evidenciada en el presente estudio al encontrar que el servicio cultural Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y experienciales, en el cuarto lugar de preferencia. Esto deja en manifiesto la necesidad de identificar y potenciar zonas de alta provisión de servicios culturales de recreación que sirvan de base para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial. Las tendencias actuales reflejan una creciente demanda de beneficios no materiales por parte de las personas que tienen impactos positivos en la salud humana y provienen principalmente de áreas protegidas, paisajes y ecosistemas naturales (Arriagada Aguayo, 2018; Bidegain et al., 2019; Nahuelhual et al., 2013).

Mediante este y otros estudios queda en manifiesto que las cuantificaciones basadas en entrevistas, encuestas, cuestionarios validados con fuentes de información adicionales proporcionan resultados útiles y eventualmente espacialmente explícitos sobre el uso de recursos naturales (Driscoll et al., 2007; Sherrouse et al., 2011). Además, para investigadores medioambientales, constituyen una forma eficiente y secuencial de recopilar datos cualitativos de usos de recursos o parámetros sociales de fácil categorización como percepciones de actores sociales (Driscoll et al., 2007). Identificar qué servicios

ecosistémicos son relevantes para los diferentes grupos de interés y comprender las percepciones de los mismos es útil para tomar decisiones informadas, especialmente en regiones del mundo donde el éxito de los objetivos de conservación de la biodiversidad se ve amenazado por actividades económicamente productivas (Bidegain et al., 2019).

3.2 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados

La cartografía de capacidad de provisión de SE (Figura 10) reveló que en general el paisaje tiene una baja capacidad de provisión actual de los tres SE más demandados. Se observó que las zonas que tienen mayores magnitudes mostraron un patrón espacial agregado en áreas cubiertas por bosque nativo adulto y secundario, contiguas a la mayor área protegida presente en el área de estudio, el Parque Nacional Nahuelbuta.

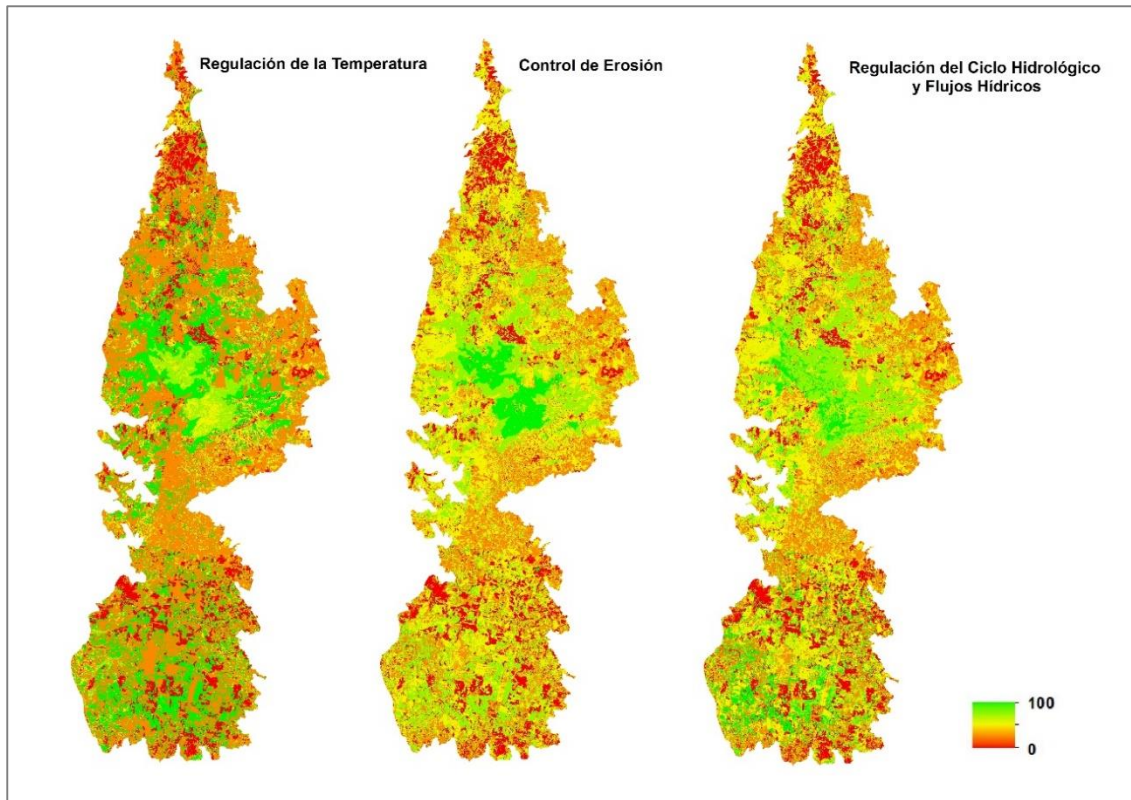


Figura 10. Capacidad de provisión actual de los tres servicios ecosistémicos más demandados dentro del área de estudio. Los valores están normalizados siendo 0 la menor capacidad de provisión y 100 la mayor capacidad de provisión.

Específicamente para el SE Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, las áreas de mayor capacidad de provisión coincidieron espacialmente con la presencia de coberturas de bosques nativos, específicamente bosque deciduo adulto y secundario, y bosque siempreverde adulto y secundario. Debido a su mayor complejidad estructural y diversidad funcional, estos ecosistemas tienen la capacidad de realizar procesos hidrológicos que dan soporte a este tipo de servicios de regulación, como la evapotranspiración (Esquivel et al., 2019, Lara et al., 2009). A diferencia de esto, las coberturas antrópicas como plantaciones

forestales, áreas agrícolas y pastizales proveen en menor medida este servicio debido a lo homogéneo de su composición y estructura (Cingolani et al., 2015; Jullian et al., 2018; Little & Lara, 2010).

Para el SE Control de erosión, se observaron áreas de alta capacidad de provisión asociadas a variadas coberturas de bosque nativo y en menor medida a plantaciones forestales. Las áreas que presentaron los menores valores para este servicio correspondieron a áreas sin vegetación, especialmente a sectores de cosecha forestal donde los suelos con escasa cobertura vegetal son más susceptibles a erosión debido a la reducción de la infiltración y el aumento de la escorrentía superficial (Oyarzun & Huber, 1999). Estudios de modelos predictivos de erosión hídrica en condiciones contrastantes entre bosque nativo y plantaciones forestales demuestran que implementar técnicas de conservación de suelos en áreas agrícolas e implementar actividades de plantación de matorrales y vegetación nativa reducen la erosión del suelo en zonas degradadas (Bonilla et al., 2010; Gann et al., 2019; Little & Lara, 2010).

Para el SE Regulación de la temperatura, se identificaron áreas con mayor capacidad de provisión que coincidieron principalmente con coberturas de bosques nativos adultos y secundarios. Así mismo, las coberturas forestales como plantación adulta de *Pinus* y *Eucalyptus* también proporcionaron este servicio, pero en menor magnitud; por el contrario, áreas con escasa cobertura

vegetal, como praderas y cultivos agrícolas, regularon en muy baja magnitud la temperatura, coincidiendo con lo evidenciado por Das & Angadi (2020).

En base a los antecedentes presentados anteriormente, se destaca que las áreas que concentraron la mayor capacidad de provisión de servicios de regulación, están cercanas a áreas protegidas como el Parque Nacional Nahuelbuta, Monumento Natural Contulmo, Quebrada de Caramávida o Villa las Araucarias, es decir, lugares donde se concentran los mayores remanentes de bosques nativos dentro del área de estudio. Otros estudios confirman esta tendencia y reafirman que los servicios de regulación se encuentran mayoritariamente asociados a zonas que concentran extensas áreas de bosques nativos (Esquivel, 2020). Se ratifica la necesidad de disponer de una superficie boscosa que sustente biodiversidad y funciones ecosistémicas que mantengan y aseguren a largo plazo la capacidad de los paisajes de proveer múltiples SE (Potschin & Haines-Young, 2010).

3.2.1 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados a escala de paisaje para la condición inicial

A escala de paisaje, para los tres SE más demandados, se presentan sus respectivas capacidades de provisión para la condición inicial, presentando el SE

Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos la menor magnitud de provisión (Figura 11).

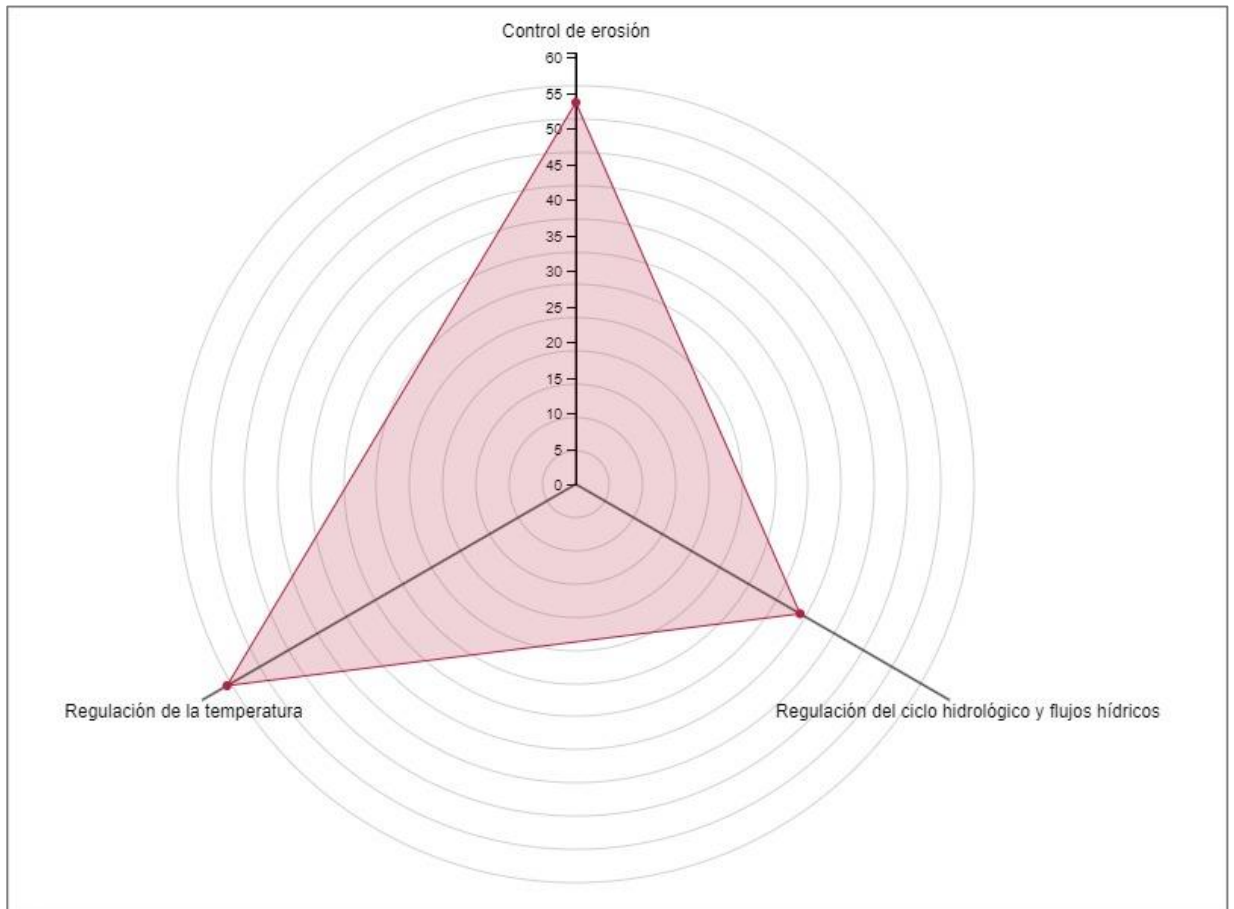


Figura 11. Capacidad de provisión de los SE más demandados para la condición inicial a escala de paisaje.

Esta baja capacidad de provisión del SE Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos se relaciona con la extensa superficie de CUS que tienen magnitud menor a 20 para este servicio, entre ellas: plantación joven de pino, plantación

joven de eucaliptus, cosecha forestal, cultivos agrícolas y praderas y suelo descubierto, quienes sumadas representaron un 36,8% de la superficie total del paisaje. La baja capacidad de provisión también se presentó para el SE Control de erosión donde, del total de las CUS antrópicas, cosecha forestal y cultivos agrícolas y praderas, presentaron muy baja magnitud de provisión para este servicio (de 6,4 y 0 respectivamente), representando su sumatoria, un 12,8% de la superficie total del paisaje.

3.2.2 Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos más demandados a escala comunal para la condición inicial

A escala comunal, para los tres SE más demandados, se presentaron sus respectivas capacidades de provisión para la condición inicial (Figura 12).

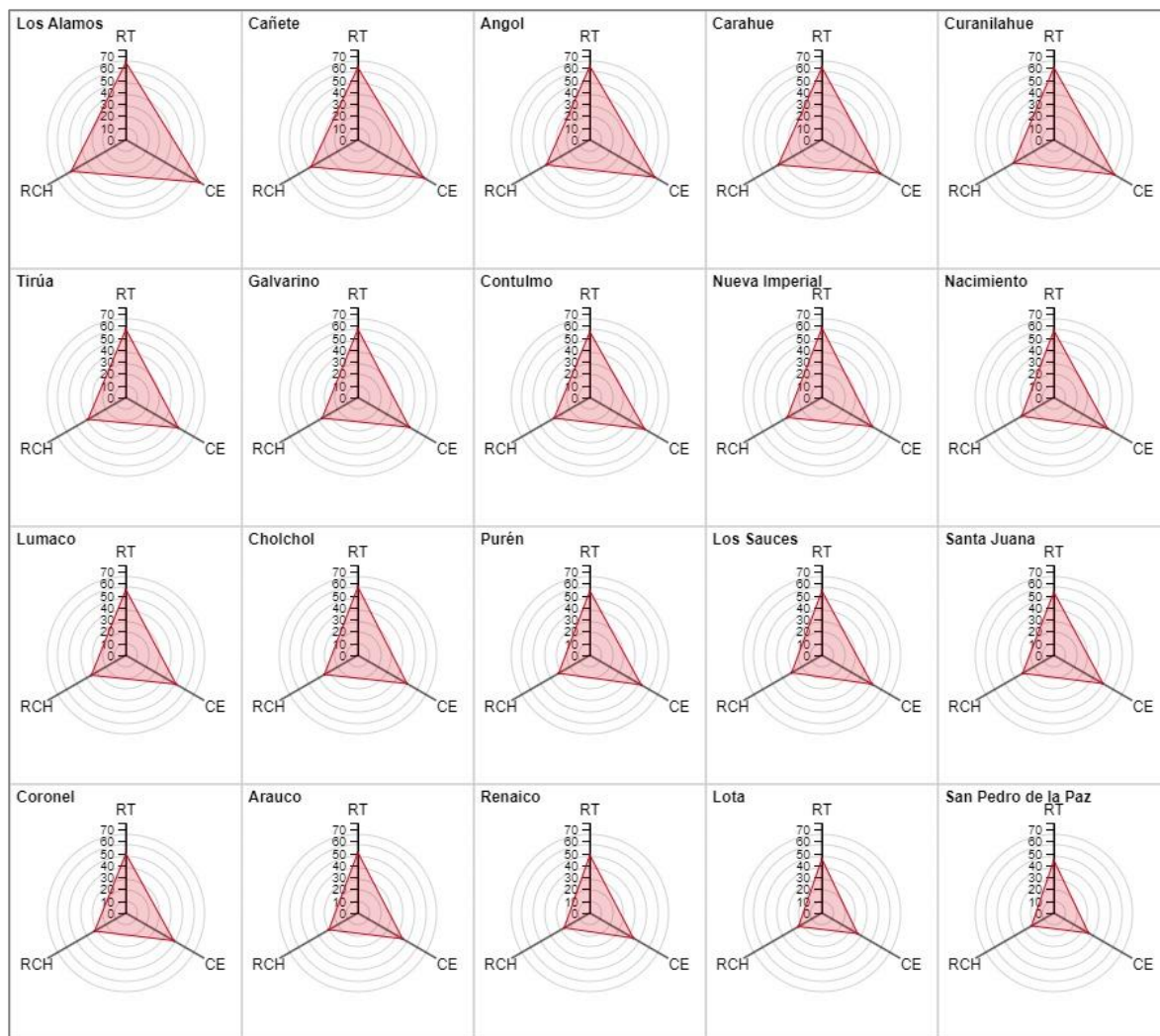


Figura 12. Capacidad de provisión de los SE más demandados: Regulación de la temperatura (RT), Control de erosión (CE) y Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos (RCH), para la condición inicial a escala comunal.

Para el SE Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos las tres comunas que presentaron la menor capacidad de provisión fueron: San Pedro de la Paz, Lota y Renaico. En contraste, las tres comunas con mayores magnitudes fueron: Los Álamos, Cañete y Angol (Figura 12).

Para el SE Control de erosión las tres comunas que presentaron menor capacidad de provisión fueron: San Pedro de la Paz, Lota y Renaico. En cambio, las tres comunas con mayores magnitudes fueron: Los Álamos, Cañete y Angol (Figura 12).

Respecto al SE Regulación de la temperatura local, las tres comunas que presentaron menor capacidad de provisión fueron: San Pedro de la Paz, Lota y Renaico. Por su parte, las tres comunas con mayores magnitudes fueron: Los Álamos, Angol y Carahue (Figura 12).

3.3 Simulación de escenarios de restauración de servicios ecosistémicos más demandados

3.3.1 Escenario A

La superficie asociada a las zonas de protección de 100 m alrededor de cada curso de agua fue de 82.486 ha, de las cuales 50.376 ha correspondieron a CUS antrópicas equivalente al 61 % de la superficie considerada a restaurar por este escenario. El área perteneciente al tercio superior del rango altitudinal del paisaje estudiado fue de 107.351 ha, de las cuales 32.291 ha correspondieron a CUS antrópicas, equivalente al 39 % de la superficie considerada a restaurar por el escenario A.

En total, el escenario A, consideró una superficie propuesta a restaurar de 82.667 ha, equivalente a restaurar un 12% del paisaje estudiado. Las áreas a restaurar se concentraron en parches grandes y contiguos situados en la sección centro-norte de la Cordillera, inmediatamente al oeste, norte y noreste del Parque Nacional Nahuelbuta, distribuidos principalmente en las comunas de Contulmo, Cañete, Curanilahue, Arauco, Santa Juana, Nacimiento y Angol. Además, se registró una segunda concentración de parches pequeños y contiguos en la sección sur de la Cordillera, situados al este del Bien Nacional Protegido Villa las Araucarias, distribuidos principalmente en la comuna de Carahue.

Dada las condiciones de cadena montañosa también se registró una marcada dispersión de parches pequeños de CUS antrópicas en los numerosos cursos de agua que componen el área de estudio, los cuales se distribuyen de forma heterogénea a lo largo y ancho del paisaje. El escenario A consideró restaurar la parte más alta de la cordillera de Nahuelbuta, abarcando un rango de alturas que rondan entre los 755 y 1.519 m s.n.m.

3.3.2 Escenario B

La superficie correspondiente a la zona de protección de 100 m alrededor de cada curso de agua es igual a la del escenario A, con la misma cantidad de superficie asociada a CUS antrópicas, sin embargo, éstas representaron un 55%

de la superficie considerada a restaurar por el escenario B. La superficie perteneciente al quintil superior de cada una de las 42 subcuencas del área de estudio correspondió a un total de 90.632 ha, de las cuales 41.280 ha correspondieron a CUS antrópicas. Esto constituyó el 45 % de la superficie considerada a restaurar por este escenario.

En total, el escenario B, consideró una superficie propuesta a restaurar de 91.656 ha, equivalente a restaurar un 13% del paisaje estudiado. Las áreas a restaurar se concentraron en parches grandes y contiguos situados en la parte norte de la Cordillera, principalmente entre el límite de las comunas de San Pedro de la Paz con Coronel y en el límite de las comunas de Arauco y Santa Juana. Además, en la sección centro-sur de la Cordillera se identificaron dos concentraciones de parches grandes y contiguos situados inmediatamente al sur del Parque Nacional Nahuelbuta, el primero entre los límites de las comunas de Contulmo, Cañete y Purén y el segundo entre los límites de las comunas de Contulmo y Lumaco, distanciados 4 y 30 km respectivamente desde la anteriormente mencionada área protegida. Una última gran concentración de parches grandes, agrupados y continuos se ubicaron en la comuna de Carahue, en la sección sur de la Cordillera, asociados al Bien Nacional Protegido Villa las Araucarias y a las partes más altas situadas inmediatamente al poniente de este. El escenario B consideró restaurar superficie perteneciente a un gradiente altitudinal más amplio que el escenario A, con alturas que abarcaron un rango entre los 257 y 1.519 m s.n.m.

3.3.3 Escenario C

La superficie asociada a erosión mayor o igual a 50 t/ha fue de 65.131 ha, de los cuales 51.006 ha correspondieron a CUS antrópicas, lo cual representó el total de superficie a restaurar por este escenario, equivalente a restaurar un 7,5% del paisaje estudiado.

Las áreas a restaurar se concentraron en áreas sometidas a cosecha forestal, distribuyéndose principalmente en la zona norte y centro-sur de la Cordillera, zonas que coincidieron con una alta presencia de plantaciones forestales de *Pinus* y *Eucalyptus* sujetas a rotaciones de cultivo periódicas que dejan el suelo descubierto, susceptible a procesos de erosión que se incrementan en periodos de lluvias intensas (Aburto et al., 2020; Alaniz et al., 2021; Little et al., 2009).

3.4 Oportunidades de restauración a escala de paisaje

La distribución espacial de las respectivas oportunidades de restauración a escala de paisaje se visualiza en la Figura 13. Las CUS antrópicas que contribuyeron más superficie a reemplazo fueron: Plantación adulta de pino, para los escenarios A y B, y Cosecha forestal para el escenario C (Figura 14).

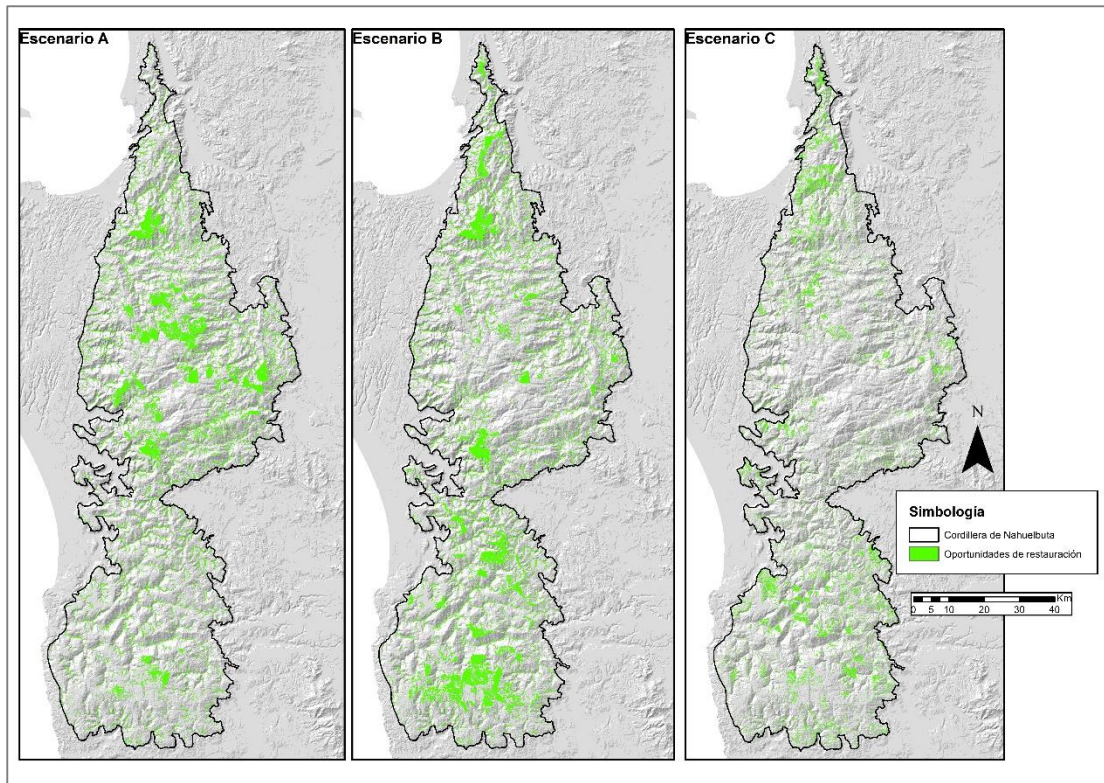


Figura 13. Oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C a escala de paisaje.

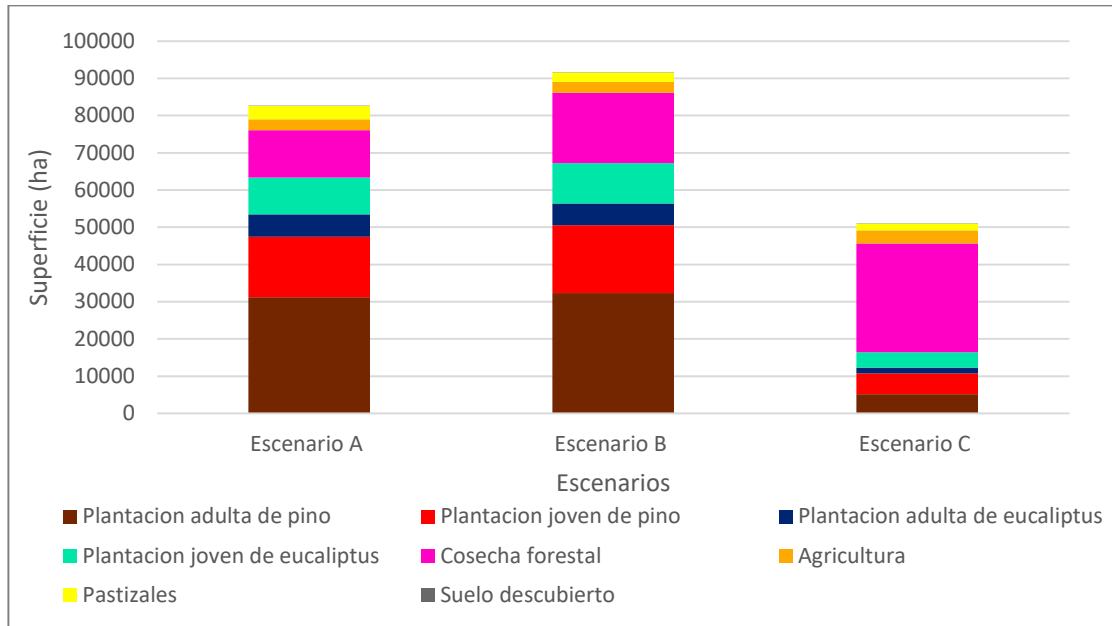


Figura 14. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C, a escala de paisaje.

Para los tres escenarios de restauración simulados aumentó la capacidad de provisión de SE respecto a la condición inicial (Tabla 3), resultando el escenario B el que presentó los mayores incrementos en la capacidad de provisión para los tres SE evaluados respecto a la condición inicial.

En específico, para el SE más demandado, Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, el escenario B presentó un incremento de 18 % de la capacidad de provisión respecto a la condición inicial, seguido del escenario A y del escenario C (Tabla 4). Para el segundo SE más demandado, Control de erosión, el escenario B presentó un incremento de un 12,1 % de la capacidad de provisión respecto a la condición inicial, seguido del escenario A y del escenario C. Para el

tercer SE más demandado, Regulación de la temperatura, el escenario B presentó un incremento de un 9,1 % de la capacidad de provisión respecto a la condición inicial, seguido por el escenario A y el escenario C.

Tabla 3. Capacidad de provisión de SE a escala de paisaje para la condición inicial y escenarios A, B y C.

Escenario	Regulación de la temperatura	Control de erosión	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos
Condición inicial	60,7	57,4	38,9
Escenario A	65,4	63,3	45,3
Escenario B	66,2	64,3	46,0
Escenario C	64,8	62,7	42,9

Tabla 4. Variación porcentual de la capacidad de provisión de SE a escala de paisaje para escenarios A, B y C respecto a condición inicial.

Escenario	Regulación de la temperatura	Control de erosión	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos
Escenario A	7,8	10,3	16,2
Escenario B	9,1	12,1	18,0
Escenario C	6,8	9,3	10,1

Los resultados observados, en cuanto a restauración valiéndose de CUS naturales, se condicen con lo evidenciado por Hua et al. (2022) en que la restauración con fines ambientales, orientada a establecer bosque nativo, provee mayores beneficios ecosistémicos simultáneos basados en mayor biodiversidad, control de erosión y suministro de agua que la restauración con fines forestales, caracterizadas por el establecimiento de plantaciones de estructura y composición más simple. Además, existe evidencia científica que indica que al forestar con bosque nativo se produce un menor impacto en el suministro de agua, contribuyendo al SE de regulación del ciclo hidrológico por medio de la

regulación de los caudales, manteniéndolos durante el verano, a diferencia de forestar con plantaciones forestales, donde se comprueba la disminución de los caudales durante el verano (Alvarez-Garreton et al., 2019; Huber et al., 2007).

Otros estudios muestran que las zonas ricas en ecosistemas naturales, como las partes altas de las subcuencas de los ríos Cayucupil y Butamalal en Cañete, tienen una alta capacidad de proveer múltiples SE (Palma et al., 2019). En contraste, las áreas urbanas y agrícolas en elevaciones más bajas tienen menor capacidad de provisión, pero reciben beneficios importantes de las zonas altas, como la regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos. Esto ratifica la importancia de conservar y restaurar las zonas altas de las subcuencas considerando zonas de protección a lo largo de los cursos de agua que bajan de las áreas montañosas, para promover el flujo de beneficios de zonas de alta capacidad de provisión hacia zonas con baja capacidad de provisión de SE.

Las zonas de protección de cursos de agua representaron una parte importante de la superficie destinada a restauración, constituyendo un 7,4 % de la superficie total del paisaje. Estas zonas, o franjas de amortiguación ribereñas, se distribuyeron heterogéneamente a lo largo y ancho de toda el área de estudio; dada sus condiciones montañosas y pluviométricas, naturalmente se generan una gran cantidad de esteros y ríos que fluyen hacia ambas vertientes de la cordillera de Nahuelbuta, en especial hacia la vertiente occidental.

Estudios que analizan el establecimiento de franjas de amortiguación ribereñas con cobertura de bosque nativo en plantaciones de *Eucalyptus* han probado que la tasa de escorrentía aumenta un 1,4 % por cada metro de aumento de la franja (Little et al., 2014), a su vez se ha comprobado que las zonas de amortiguación generan un impacto positivo al disminuir la erosión potencial de las áreas que están cubiertas por vegetación ribereña (Moller, 2011). En 2011 la Ley 20.283, sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, establece zonas de restricción de corta de árboles y arbustos nativos en terrenos cercanos a cursos de agua, específicamente se establece una restricción de corta de 25 m para cursos de agua permanentes y de 5 m para cursos de agua intermitentes. Sin embargo, el ancho propuesto por esta ley resulta insuficiente en comparación a otros estudios (Little et al., 2014; Moller, 2011), que recomiendan mantener una franja mayor o igual a 36 m de ancho para retener los sedimentos orgánicos y llegar a un nivel de retención comparable a cuencas boscosas del sur de Chile completamente cubiertas con bosque nativo (Lara et al., 2009; Little et al., 2014). Actualmente, el desafío está en incorporar en la legislación a las zonas ribereñas como corredores biológicos que permitan aumentar la conectividad entre parches aislados de bosque nativo, para ello son necesarios nuevos estudios que consideren anchos variables de franjas para cumplir objetivos de protección o conservación específicos.

Estudios similares de evaluación de SE asociados a regulación del ciclo hidrológico señalan que, si bien existe una correlación positiva entre el bosque nativo y el suministro de agua (Jullian et al., 2018), la superficie remanente actual del bosque nativo primario (adulto) es tan escasa en la cordillera de la costa de la zona centro sur de Chile que es necesario ahondar en estudios de evaluación de SE, relacionados con la regulación del ciclo hidrológico, haciendo una comparativa entre la capacidad de provisión de cuencas con plantaciones forestales, bosques nativos primarios y bosques nativos secundarios (Lara et al., 2009). En este sentido, el presente estudio, si bien considera sólo el uso de bosque nativo deciduo y siempreverde secundarios para mejorar la capacidad de provisión del SE Regulación del ciclo hidrológico y Flujos Hídricos, representa una base para futuros estudios comparativos entre cuencas dominadas por plantaciones forestales y cuencas con presencia de bosques nativos en distintos grados de desarrollo del bosque.

3.5 Oportunidades de restauración a escala comunal

La distribución espacial de las oportunidades de restauración puede visualizarse a escala comunal en la Figura 15.

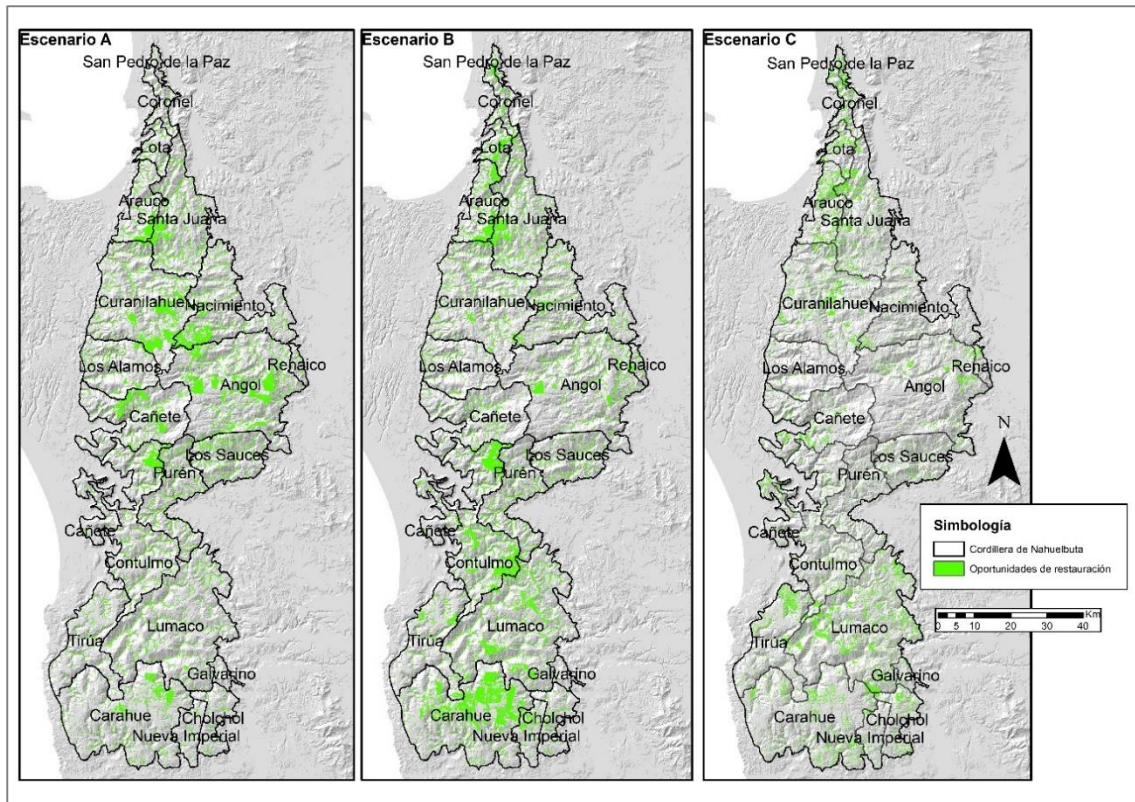


Figura 15. Oportunidades de restauración de los escenarios A, B y C a escala comunal.

Las comunas que presentaron las mayores superficies de CUS antrópicas destinadas a reemplazo por CUS naturales no correspondieron exclusivamente a las que presentaron las mayores oportunidades de restauración, esta condición se evidencia en las Figuras 16, 17 y 18, donde ninguna de las tres comunas que presentaron las mayores superficies de CUS antrópicas destinadas a reemplazo por CUS naturales para los escenarios A, B y C (Angol, Carahue y Lumaco, respectivamente), correspondieron a las comunas que presentaron mayores variaciones porcentuales de la capacidad de provisión de SE para los mismos escenarios (Arauco, Lota y San Pedro de la Paz, respectivamente).

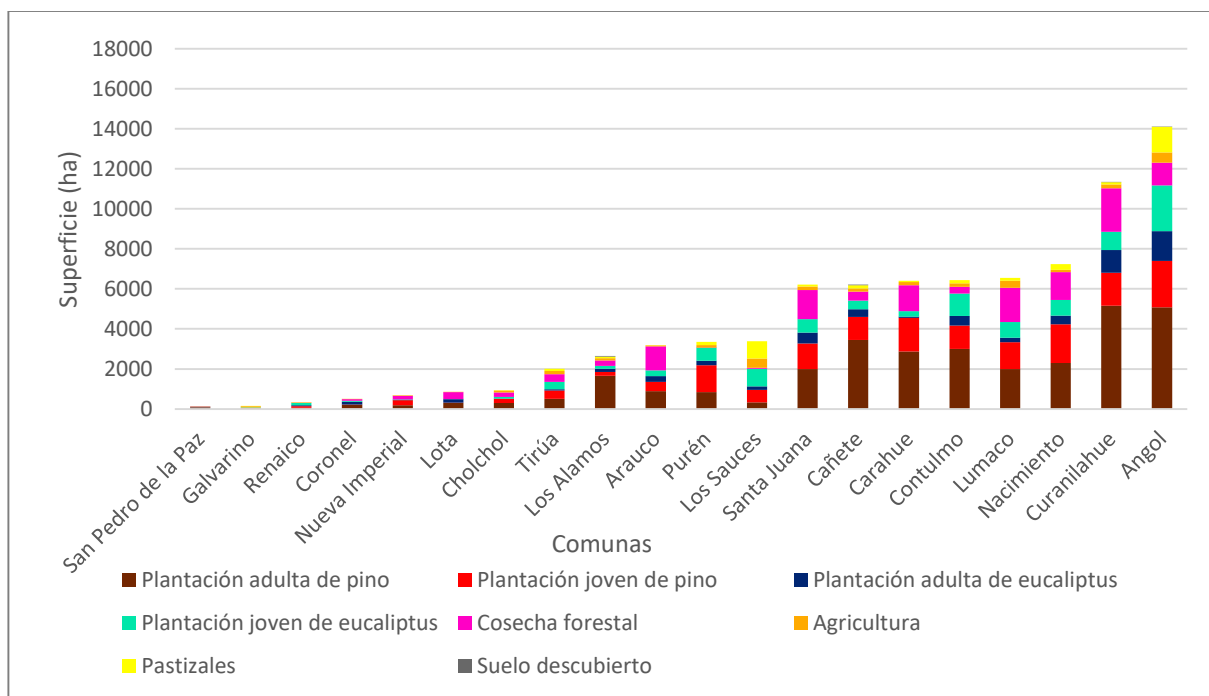


Figura 16. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario A, a escala comunal.

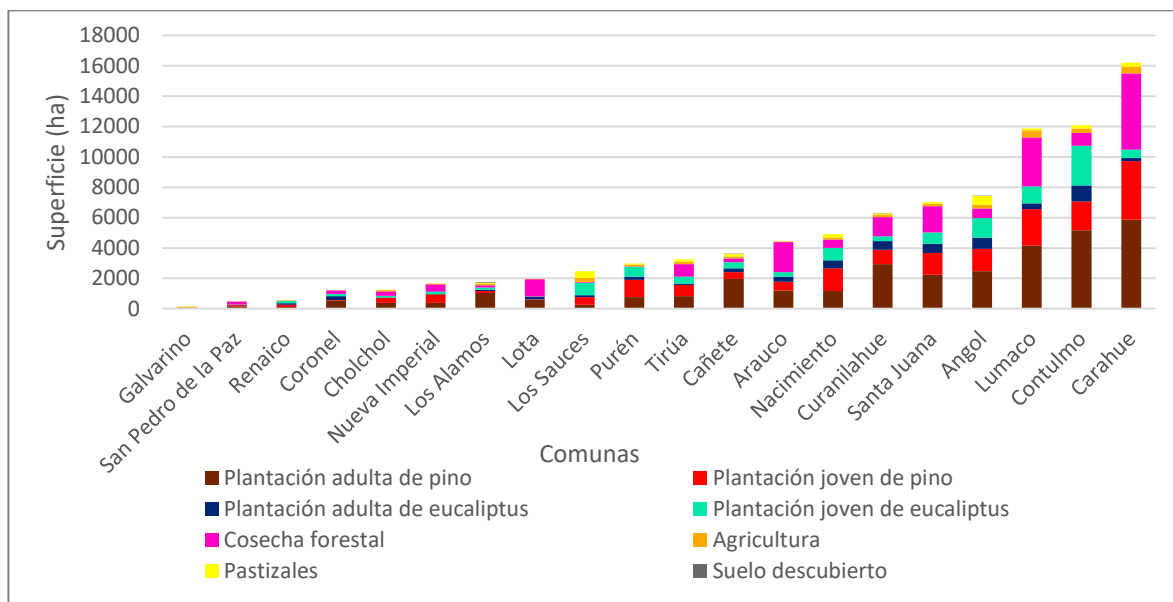


Figura 17. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario B, a escala comunal.

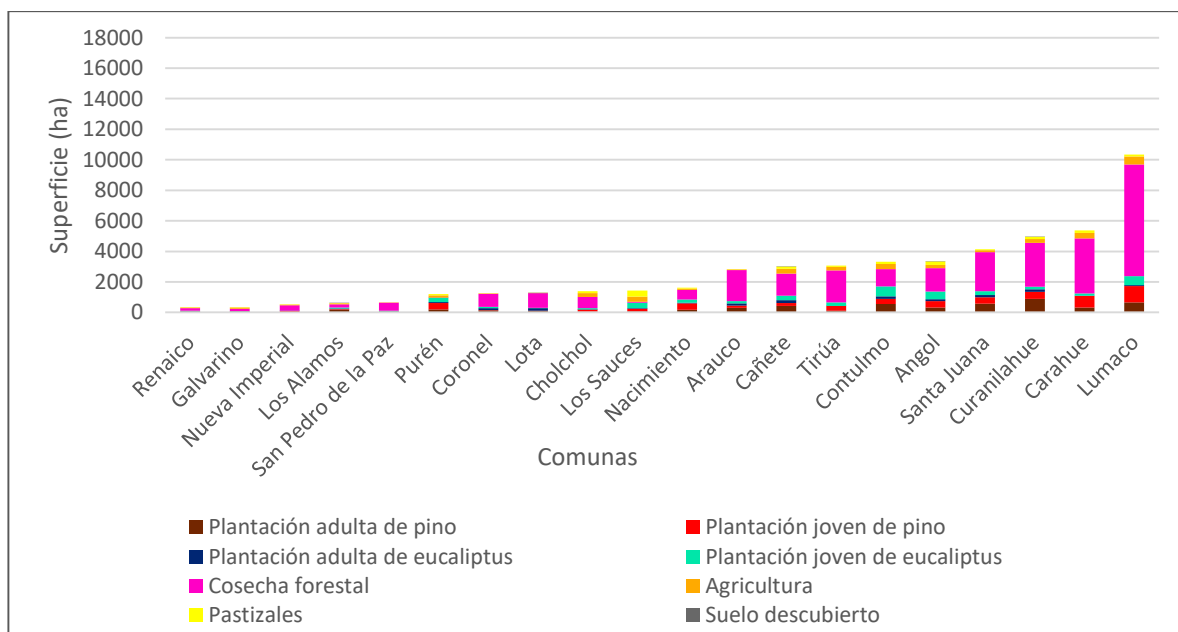


Figura 18. Superficie de las CUS antrópicas que contribuyeron a las oportunidades de restauración del escenario C, a escala comunal.

Para simplificar e integrar el análisis se analizaron las variaciones porcentuales en la capacidad de provisión para las tres comunas que presentaron mayores cambios por servicio y para cada escenario (Tabla 5). La variación porcentual para el total de las 20 comunas por cada escenario puede visualizarse en la Tabla A5.

Tabla 5. Variación porcentual de capacidad de provisión de los tres SE más demandados para escenarios A, B y C respecto a la condición inicial, a escala comunal, para las tres comunas que presentaron las mayores variaciones en cada escenario.

Condición inicial v/s escenario A					
Regulación de la temperatura local		Control de erosión		Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	
Arauco	14,8	Arauco	23,2	Arauco	33,1
Curanilahue	11,6	Santa Juana	15,4	Santa Juana	25,9
Angol	11,4	Nacimiento	15,0	Los Sauces	25,5
Condición inicial v/s escenario B					
Regulación de la temperatura		Control de erosión		Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	
Lota	22,8	Lota	40,9	Lota	51,4
Arauco	22,5	Arauco	33,8	Arauco	44,5
San Pedro de la Paz	21,5	San Pedro de la Paz	33,4	San Pedro de la Paz	44,2
Condición inicial v/s escenario C					
Regulación de la temperatura		Control de erosión		Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	
San Pedro de la Paz	33,7	San Pedro de la Paz	60,7	San Pedro de la Paz	66,2
Coronel	17,8	Lota	30,7	Lota	32,2
Lota	17,6	Arauco	26,4	Arauco	28,8

En el escenario A la comuna de Arauco fue la que presentó mayor variación para los tres SE más demandados, con una máxima variación de 33,1% para el SE de Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, por ende, es la comuna que

presentó las mayores oportunidades de restauración para este escenario. En el escenario B la comuna de Lota fue la que presentó mayor variación para los tres SE más demandados, con una máxima variación de 51,4% para el SE de Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos. En el escenario C la comuna de San Pedro de la Paz fue la que presentó mayor variación para los tres SE más demandados, con una máxima variación de 66,2% para el SE de Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, constituyendo esta la mayor variación porcentual a escala comunal.

Las variaciones porcentuales de capacidad de provisión por comuna revelaron que los mayores aumentos de provisión por escenario son contexto dependiente, existiendo factores que influyeron en los resultados como la superficie asociada a CUS antrópicas o naturales, la presencia de subcuencas y/o presencia de cursos de agua. Comunas como Angol presentaron una extensión considerable de superficie a restaurar para el escenario A, pero dado que es una comuna que posee una gran extensión territorial en altura dentro de la cordillera de Nahuelbuta, la superficie de restauración representó una mínima proporción respecto al total. Además, una significativa parte de la comuna está cubierta por bosques nativos por lo cual la capacidad de provisión para los tres SE más demandados está relativamente cubierta. Similar es el caso de Contulmo, cuyo 82,6 % del total de su superficie comunal se encontró dentro del polígono cordillera de Nahuelbuta, cubierto en gran parte por CUS naturales, en contraste

la comuna de Lota presentó un 73,7 % del total de su superficie comunal dentro del polígono del área de estudio, pero se encuentra dominada principalmente por CUS antrópicas. La comuna de Renaico es otro caso particular que, si bien presentó una baja capacidad de provisión de los tres SE más demandados, la escasa altura y ausencia de subcuencas relevantes que determinen una mayor cantidad de superficie considerada a restaurar por los escenarios A y B, no permite que se ubique entre las comunas más beneficiadas con estos escenarios. Incluso al aplicar el escenario C se ubica en el sexto lugar de comunas más beneficiadas. Para la comuna de Galvarino, si bien presentó la menor superficie de todas las comunas del área de estudio, está cubierta en mayor parte por CUS naturales que proveen en mayor magnitud los SE más demandados. Respecto a asentamientos humanos urbanizados, el único gran centro urbano que se encuentra por completo dentro del polígono del área de estudio, y que recibe de forma directa los beneficios del SE Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, a través del río Lumaco, es Capitán Pastene, de 4.132 habitantes, perteneciente a la comuna de Lumaco; por lo tanto la disminución de este SE puede traer consecuencias negativas en la calidad de vida y bienestar de sus habitantes, resultando prioritario asegurar su protección en toda su extensión, principalmente desde donde se provee hasta la zona donde los beneficiarios lo aprovechan. Similar situación se manifiesta en las ciudades de Curanilahue, Cañete, Angol, Contulmo y Trolhue, que, si bien presentan escasa o definitivamente no presentan superficie urbana dentro del polígono del área de

estudio, reciben directamente los beneficios del SE de Regulación del ciclo hidrológico a través de diversos ríos que fluyen desde la cordillera de Nahuelbuta, entre ellos el Carampangue, Cayucupil, Picoiquén, Elicura y Trovolhue, y que, respectivamente, abastecen de agua a las ciudades anteriormente mencionadas (INFOR, 2023).

Para el escenario C, la comuna de San Pedro de la Paz presentó las mayores oportunidades de restauración dada la extensa superficie de plantaciones forestales ubicadas en las cabeceras de las subcuencas, en gran parte cosechadas al momento de levantar la información de CUS usada en este estudio. Estos ecosistemas forestales, que sufren intervención periódica dada las rotaciones de cultivo a las que están sujetos, es poco probable que puedan seguir prestando servicios de regulación de manera inmediata, especialmente Regulación del Ciclo Hidrológico y Flujos Hídricos (Jullian et al., 2018). Si se llevan a cabo estrategias de restauración a largo plazo, que involucren una selección y procedencia adecuada de las plantas, replante, exclusión del ganado, control de especies exóticas, vinculación y capacitación a las comunidades locales, entre otras, es posible recuperar servicios de regulación que constituyan la base para la provisión sostenida de otros servicios, dado el efecto sinérgico que se genera entre distintos tipos de servicios (Bennett et al., 2009; Rey Benayas et al., 2009).

En cuanto a la ubicación de las oportunidades de restauración, para la comuna de Arauco, bajo el escenario A, las CUS antrópicas destinadas a ser reemplazadas por CUS naturales se concentraron principalmente en un gran parche agregado de plantaciones forestales adultas de *Pinus* y *Eucalyptus* (Figura 19) ubicado al sureste de la comuna.

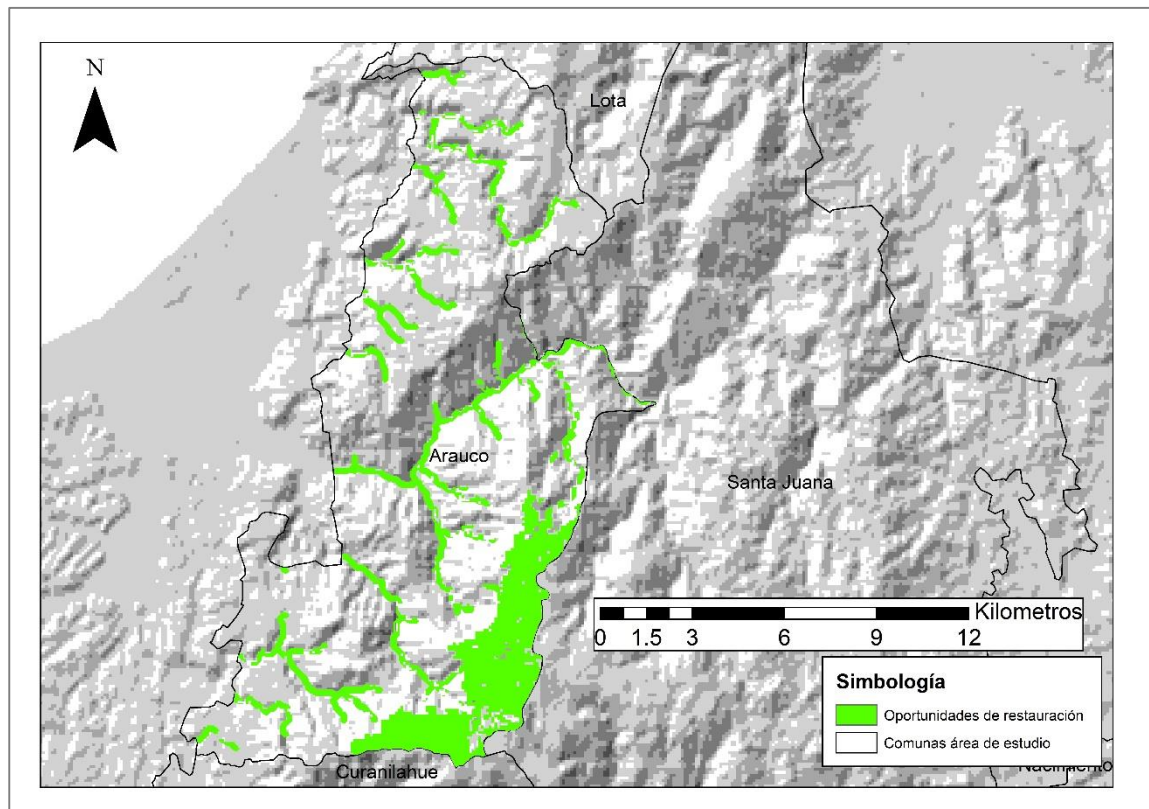


Figura 19. Oportunidades de restauración del escenario A para la comuna de Arauco.

Para la comuna de Lota, bajo el escenario B, las CUS antrópicas destinadas a ser reemplazadas por CUS naturales se concentraron en cabeceras de subcuencas dominadas por plantaciones forestales principalmente (Figura 20).

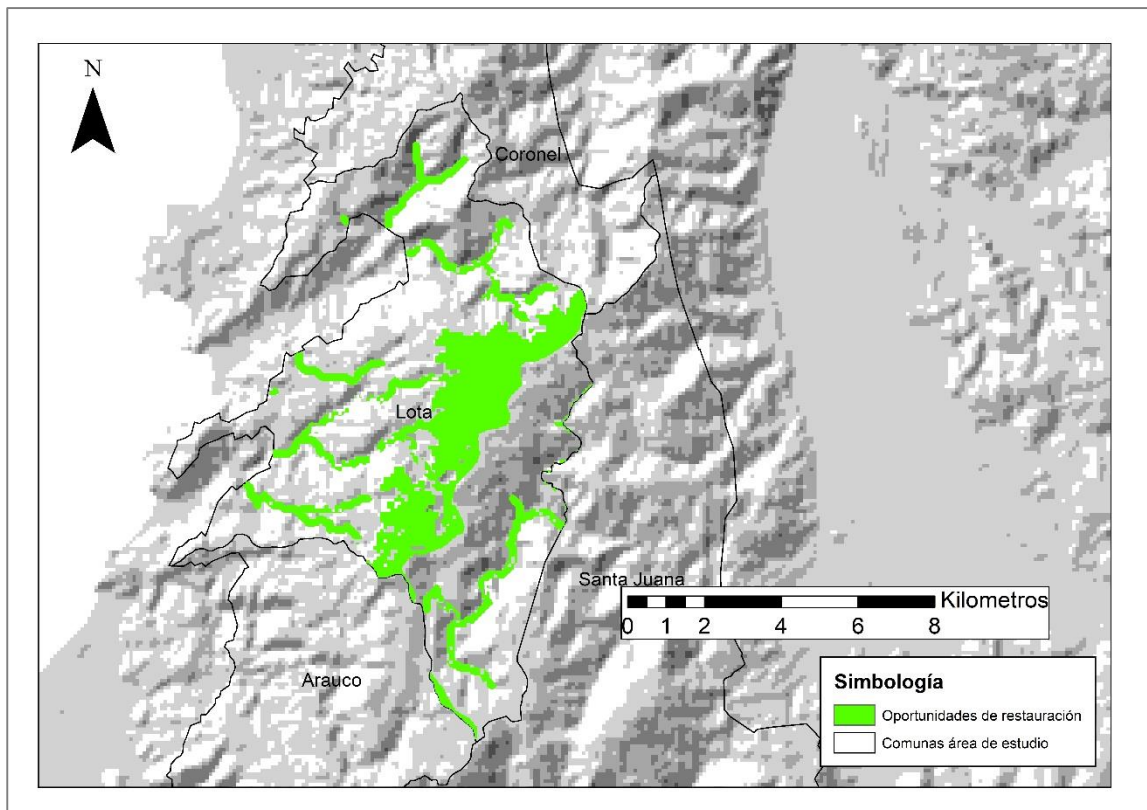


Figura 20. Oportunidades de restauración del escenario B para la comuna de Lota.

Para la comuna de San Pedro de la Paz, bajo el escenario C, las CUS antrópicas destinadas a ser reemplazadas por CUS naturales se concentraron en parches agregados ubicados en la parte centro sur de la comuna, correspondientes a cosecha forestal (Figura 21).

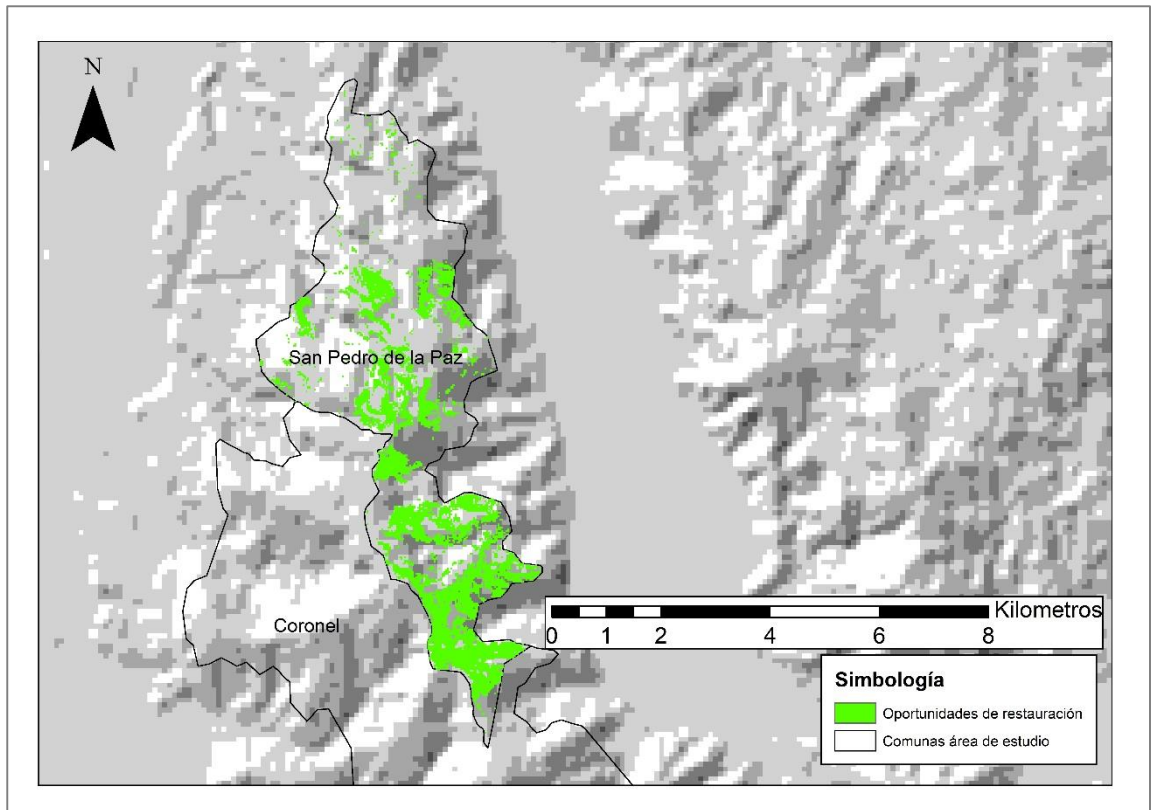


Figura 21. Oportunidades de restauración del escenario C para la comuna de San Pedro de la Paz.

En contraste a las oportunidades de restauración anteriormente identificadas, algunas comunas del área de estudio presentaron variaciones porcentuales negativas en la capacidad de provisión de SE (Tabla A5), entre ellas: Los Álamos con -1,5%, Nacimiento con -3% y Cañete con -7,4, las tres correspondientes al SE Regulación de la temperatura para el escenario B; además de Nacimiento que presentó una variación porcentual de -0,1%, correspondiente al SE Control de erosión, para el escenario B. Estas comunas presentaron las menores oportunidades de restauración de SE y no se verían favorecidas al aplicar las

acciones de restauración de SE propuestas en este estudio, bajo las condiciones anteriormente mencionadas.

3.6 Implicancias para la sustentabilidad del paisaje y la planificación territorial

Los resultados dejan a la vista que el área de estudio posee una baja capacidad de provisión de SE más demandados por los habitantes del territorio; SE que son claves para asegurar el bienestar humano (Burkhard et al., 2012; Potschin & Haines-Young, 2010). Queda en evidencia que las zonas con mayor presencia de CUS naturales aportan en gran medida a la provisión de los SE más demandados, pero lamentablemente estas zonas presentan una superficie reducida respecto a las CUS antrópicas y se encuentran en gran parte desprotegidas de cualquier instrumento de protección oficial, salvo por la superficie correspondiente al Parque Nacional Nahuelbuta. La planificación territorial y los esfuerzos para identificar oportunidades de restauración deben enfocarse en proteger las áreas con alta capacidad de provisión y recuperar las áreas con baja capacidad de provisión de SE (Lara et al., 2010; UICN & WRI, 2014). Debido a esto, es necesario integrar el concepto de SE en las políticas públicas y en la toma de decisiones para planificar el territorio cordillera de Nahuelbuta bajo directrices que permitan avanzar hacia la sustentabilidad del paisaje, con el fin que sus ecosistemas puedan recuperarse ante perturbaciones y mantener su capacidad de autorregulación y resiliencia (Wu, 2013).

A escala de paisaje, la identificación de oportunidades de restauración en las zonas de protección alrededor de los cursos de agua resultó determinante para aumentar la capacidad de provisión de los SE más demandados. Es fundamental que instrumentos de planificación a nivel regional, como el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT), gestionen el territorio a escala de cuencas hidrográficas y consideren un ancho adecuado para estas zonas de protección que permita el establecimiento de vegetación nativa. La provisión del SE Regulación del Ciclo Hidrológico y Flujos Hídricos depende de la alta diversidad funcional de las cuencas hidrográficas (Esquivel, 2020) y su manejo trasciende los límites administrativos comunales.

Implementar técnicas y herramientas que faciliten la recuperación de ecosistemas degradados mediante la restauración ecológica y la rehabilitación de suelos, aporta al objetivo de aumentar la diversidad funcional de los ecosistemas boscosos (Esquivel, 2020), la que está directamente relacionada con una mayor provisión y estabilidad de múltiples SE de regulación (Rey Benayas *et al.*, 2009; Little & Lara, 2010). La restauración de áreas degradadas en las partes altas de Nahuelbuta, en cabeceras de cuencas y franjas ribereñas que se desprenden de ellas permitiría proponer una red interconectada de zonas ubicadas longitudinalmente a lo largo de la cordillera, que contribuyan a mantener la biodiversidad en todos sus niveles, las funciones clave de los ecosistemas y la

provisión de múltiples SE. Además, estas actividades se consideran un aporte a cumplir las metas que ha suscrito Chile en materia de Contribución Determinada a Nivel Nacional (Gobierno de Chile, 2020), disminuyendo la vulnerabilidad social, económica y ambiental del territorio, y aumentando su resiliencia ante escenarios de cambio climático (Ministerio de Agricultura - Corporación Nacional Forestal - Ministerio del Medio Ambiente, 2021). En base a lo anterior, para alcanzar mayor probabilidad de éxito, resulta clave que las actividades que consideren un enfoque integrado de SE, enmarcadas en futuros planes de restauración a escala de paisaje, sean subsidiadas o bonificadas especialmente en aquellas zonas críticas para la provisión de SE más demandados.

El PROT para la región del Biobío, aprobado por el Consejo Regional en 2018 pero nunca implementado (Gobierno Regional del Biobío, 2018), orienta la utilización del territorio regional para lograr su desarrollo sustentable a través de lineamientos estratégicos, derivados de la Estrategia Regional de Desarrollo, y una macro zonificación del territorio, sirviendo como marco guía, de carácter indicativo, para la planificación y gestión territorial en una región determinada (MMA, 2015). Este instrumento plantea una serie de territorios funcionales en que la cordillera de Nahuelbuta está considerada como un área de soporte ambiental cuyo objetivo es la protección del patrimonio ambiental y cultural, promoviendo actividades productivas como acuicultura, agricultura y ganadería de pequeña escala, generación de energías limpias, manejo de bosque nativo, pesca

recreativa, turismo y recreación (GORE Biobío, 2018). Por ello, resulta importante diversificar estas actividades y compatibilizarlas con la conservación de los ecosistemas claves en la provisión de SE.

A escala comunal, las oportunidades de restauración variaron para cada comuna dependiendo del escenario analizado. Sin embargo, resulta transversal incluir zonas de protección de cursos de agua, cabeceras de cuencas e identificar zonas con alto riesgo de erosión al momento de formular instrumentos de planificación como los Planes de Desarrollo Comunal (PLADECO), que orientan las decisiones en cuanto a planificación territorial y estrategias de desarrollo. Es clave que las políticas de planificación territorial, determinadas por los PLADECO, apunten a limitar y disminuir la actual superficie cubierta con plantaciones forestales en comunas como San Pedro de la Paz, Lota, Santa Juana y Nacimiento, que poseen dominancia de estas coberturas por sobre coberturas de bosque nativo, para evitar presentar a futuro extensas y continuas áreas afectas a tala rasa o susceptibles a grandes incendios forestales, como los acontecidos en la temporada verano 2022-2023 que consumieron más de 181.000 ha la región del Biobío (CONAF, 2023), afectando principalmente a las comunas de Santa Juana y Nacimiento, dada la alta y continua carga de combustible derivada de extensas plantaciones que dominan su superficie.

Este estudio contribuye a generar información útil para que los tomadores de decisión a escala comunal puedan priorizar la recuperación de zonas con baja capacidad de provisión de SE, en base a la identificación de oportunidades de restauración en áreas dominadas por plantaciones forestales, principalmente de *Pinus* para el caso de la cordillera de Nahuelbuta. No obstante, su implementación requerirá una planificación adecuada, recursos suficientes y compromisos políticos sólidos para materializar esta y otras acciones de manera efectiva y sostenible.

IV. CONCLUSIONES

La evaluación integrada de SE en la Cordillera de Nahuelbuta, sustentada en la simulación de escenarios de restauración, se presenta como una herramienta clave para identificar oportunidades de restauración y orientar la planificación territorial hacia la sustentabilidad del paisaje. El análisis reveló que los SE más demandados por los habitantes de Nahuelbuta fueron los SE de regulación: Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos, Control de erosión y Regulación de la temperatura, concluyendo que la baja capacidad de provisión de estos servicios responde a la reducida superficie de ecosistemas naturales que los proveen en el territorio.

La simulación de escenarios de restauración destacó al escenario B como el más efectivo a escala de paisaje, presentando los mayores incrementos para los tres SE más demandados. A escala comunal, los resultados mostraron marcadas diferencias entre las comunas, determinadas por la mayor o menor presencia de ecosistemas naturales que proveen los SE más demandados. San Pedro de la Paz se posicionó como la comuna con mayor incremento en la provisión del servicio de regulación del ciclo hidrológico bajo el escenario C, seguido de Lota y Coronel . Asimismo, comunas como Arauco y Santa Juana destacaron por importantes incrementos en servicios como el Control de erosión y la Regulación de la temperatura bajo los escenarios A y B, dadas sus características de

pendiente y altitud. Estas comunas, con baja presencia de ecosistemas naturales y alta concentración de CUS antrópicas, presentaron en general las mayores oportunidades de restauración a diferencia de comunas como Cañete o Los Álamos, con mayor presencia de ecosistemas naturales.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de integrar la gestión multiescala de SE en los instrumentos de planificación territorial, como el PROT y los PLADECO, mediante estrategias específicas y contexto dependientes. Acciones, como la identificación de oportunidades de restauración, deben priorizar comunas con mayores déficits en la provisión de SE de regulación, como San Pedro de la Paz, y conservar áreas estratégicas en comunas con alta capacidad de regulación, como Los Álamos y Angol.

Se concluye que identificar oportunidades de restauración, tanto a escala de paisaje como comunal, resulta fundamental como medida de acción para mitigar los efectos de la degradación ambiental, mejorar el bienestar humano y avanzar hacia la sustentabilidad del paisaje en la Cordillera de Nahuelbuta.

V. GLOSARIO

-Biodiversidad: Se refiere a la variedad de organismos vivos presentes en un ecosistema, incluyendo su variabilidad genética, las especies y los ecosistemas que forman. La biodiversidad es fundamental para la estabilidad de los ecosistemas y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos.

-Cobertura y uso de suelo: La cobertura de suelo hace referencia a las coberturas biológicas o biofísicas presentes sobre la superficie de la tierra, por ejemplo: Bosque nativo secundario; mientras que uso del suelo se asocia a las actividades que la sociedad realiza sobre la superficie de la tierra para obtener algún beneficio o producto, como Cultivos agrícolas. Para efectos de este estudio se combinaron ambas definiciones.

-Ecosistema antrópico: Son ecosistemas modificados o creados directamente por actividades humanas. Incluyen paisajes agrícolas, plantaciones forestales, zonas urbanas y áreas industriales. Aunque estos ecosistemas suelen tener menor biodiversidad y funcionalidad ecológica en comparación con ecosistemas naturales, pueden proporcionar ciertos servicios ecosistémicos, como provisión de alimentos o materiales, y desempeñar un papel relevante para el manejo sustentable del territorio.

-Multiescala: Es un enfoque de análisis que considera múltiples niveles espaciales o temporales para evaluar procesos ecológicos, sociales o ambientales. En el contexto de la ecología de paisajes, el análisis multiescala

permite identificar patrones y relaciones a diferentes escalas, desde el nivel local (como una comuna o un ecosistema específico) hasta el regional o global, ayudando a entender cómo las dinámicas a distintas escalas se interconectan y afectan entre sí.

-Priorización espacial: Es una herramienta de planificación que identifica áreas geográficas prioritarias para la conservación, restauración o uso sostenible. Este proceso se basa en criterios específicos, como la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos, la vulnerabilidad ambiental o el valor cultural del territorio, para optimizar la gestión de los recursos naturales.

-Restauración ecológica: Es el proceso de asistir la recuperación de ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos. Su objetivo es restablecer la funcionalidad ecológica, la biodiversidad nativa y los servicios ecosistémicos, promoviendo un equilibrio sostenible entre las necesidades humanas y ambientales.

-Servicios ecosistémicos: Son los beneficios directos o indirectos que los ecosistemas proporcionan a las personas. Estos incluyen bienes materiales, como alimentos y agua, y funciones esenciales para la vida, como la regulación del clima, la polinización y la purificación del aire y el agua. Los servicios ecosistémicos se clasifican generalmente en tres categorías: provisión, regulación y culturales.

-Servicios ecosistémicos de regulación: Son aquellos servicios que los ecosistemas proporcionan al regular procesos ecológicos esenciales. Incluyen el control de la calidad del aire, la regulación del ciclo hidrológico, el almacenamiento de carbono, el control de la erosión del suelo y la mitigación de riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra.

-Servicios ecosistémicos de provisión: Son los bienes materiales que los ecosistemas proporcionan a los seres humanos. Incluyen alimentos, agua dulce, madera, fibras y recursos genéticos, entre otros, que son fundamentales para el bienestar humano y las actividades económicas.

-Servicios ecosistémicos culturales: Son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a través de experiencias estéticas, recreativas, educativas, espirituales o culturales. Estos servicios influyen en el bienestar emocional, la identidad cultural y la conexión con la naturaleza.

-Subcuenca: Espacio territorial delimitado por la divisoria de aguas (línea de las altas cumbres o la parte más alta de las montañas) de tamaño más pequeño que una cuenca, donde se concentran todos los escurrimientos de agua (esteros y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común de salida, que puede ser un lago o mar.

-Sustentabilidad del paisaje: Es un enfoque de gestión que busca equilibrar la conservación de la biodiversidad, la provisión de servicios ecosistémicos y el

bienestar humano a largo plazo. Implica integrar prácticas sostenibles en el uso del suelo y considerar las interacciones ecológicas y sociales a escala de paisaje.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., & Rubilar, R. (2020). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-central Chile. *Land Degradation & Development*, 32(1), 453-466. <https://doi.org/10.1002/ldr.3700>

Agbenyega, O., Burgess, P., Cook, M., & Morris, J. (2009). Application of an ecosystem function framework to perceptions of community woodlands. *Land Use Policy*, 26, 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.08.011>

Alaniz, A. J., Abarzúa, A. M., Martel-Cea, A., Jarpa, L., Hernández, M., Aquino-López, M. A., & Smith-Ramírez, C. (2021). Linking sedimentological and spatial analysis to assess the impact of the forestry industry on soil loss: The case of Lanalhue Basin, Chile. *Catena*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105660>

Alvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/f10060473>

Arriagada, K., & Aguayo, M. (2018). Mapeo y caracterización servicio ecosistémico de provisión y recreación Nahuelbuta. *Investigaciones Geográficas*, 55, 69-88.

Assessment, M. E. (2005). Evaluación de los Ecosistemas del Milenio Informe de Síntesis. *Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis*. Island Press.

Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12(12), 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>

Bidegain, I., Cerda, C., Catalán, E., Tironi, A., & López-Santiago, C. (2019). Social preferences for ecosystem services in a biodiversity hotspot in South America. *PLoS ONE*, 14(4), e0215715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215715>

Biobío), G. B. G. R. d. (2018). *Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT)*. Concepción, Chile.

Bonilla, C., Reyes, J., & Magri, A. (2010). Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70, 159-169.

Burkhard, B., Kroll, F., Müller, F., & Windhorst, W. (2009). Landscapes' capacities to provide ecosystem services—A concept for land-cover-based assessments. *Landscape Online*, 15, 1-22. <https://doi.org/10.3097/lo.200915>

Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand, and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>

Chile, G. d. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC)*. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente.

Cingolani, A. M., Poca, M., Giorgis, M. A., Vaieretti, M. V., Gurvich, D. E., Whitworth-Hulse, J. I., & Renison, D. (2015). Water provisioning services in a seasonally dry subtropical mountain: Identifying priority landscapes for conservation. *Journal of Hydrology*, 525, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.041>

CONAF, M. (2016). *Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales 2017-2025*. <https://www.enccrv.cl/estrategia-nacional>

CONAF, M. (2023). *Estadísticas históricas: Resumen regional ocurrencia (número) y daño (superficie afectada) por incendios forestales, 1977-2023*. Retrieved from <https://www.conaf.cl>

Costanza, R. (2008). Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 141(2), 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>

Daily, G. C. (1997). Introduction: What are ecosystem services? In I. Press (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*.

Das, S., & Angadi, D. P. (2020). Land use-land cover (LULC) transformation and its relation with land surface temperature changes: A case study of Barrackpore Subdivision, West Bengal, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100322>

De la Barrera, F., Bachman-Vargas, P., & Tironi, A. (2015). La investigación de servicios ecosistémicos en Chile: una revisión sistemática. *Investigaciones Geográficas*, 50, 3–18.

Di Castri, F., & Hajek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Editorial Universidad Católica de Chile.

Driscoll, D., Appiah-Yeboah, A., Salib, P., & Rupert, D. J. (2007). Merging qualitative and quantitative data in mixed methods research: How to and why not. *Ecological and Environmental Anthropology*, 3(1), 19–28.

Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>

Echeverría, C., Fuentes, R., & Heilmayr, R. (2019). Cambios de uso y cobertura del suelo en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile entre 1986 y 2011. In *Biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*. Editorial Universidad de Los Lagos.

EEA. (2019). *Common international classification of ecosystem services (CICES)*. <https://cices.eu>

Esquivel, J. (2020). *Evaluación integrada de servicios ecosistémicos y biodiversidad para la planificación de paisajes en el marco de la ciencia de la sustentabilidad* [Doctoral dissertation, Universidad de Concepción].

Esquivel, J., Pauchard, A., & Saldaña, A. (2019). Efecto de la diversidad funcional sobre la tasa de evapotranspiración: un análisis anual de tres bosques templados chilenos. *Gayana Botánica*, 76, 156–167.

ESRI. (2023). Calcular porcentaje de variación. <https://doc.arcgis.com/es/insights/latest/analyze/calculate-percent-change.htm>

Esse, C., Valdivia, P., Encina-Montoya, F., Aguayo, C., Guerrero, M., & Figueroa, D. (2014). Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 289–299. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002014000300004>

Figueroa, D., Encina-Montoya, F., Esse, C., Aguayo, C., Valdivia, P., & Guerrero, M. (2013). Evaluación de los servicios ecosistémicos derivados del bosque nativo en la cuenca del río Imperial: Una aproximación desde la norma secundaria. Temuco.

Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.

Frank, S., Fürst, C., Witt, A., Koschke, L., & Makeschin, F. (2014). Making use of the ecosystem services concept in regional planning—trade-offs from reducing water erosion. *Landscape Ecology*, 29(8), 1377–1391. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-9992-3>

Frene, C., & Mariela, N. (2010). Hacia un nuevo modelo forestal en Chile. *Revista Bosque Nativo*, 47, 25–35.

Fürst, C., Volk, M., Pietzsch, K., & Makeschin, F. (2010). Pimp your landscape: A tool for qualitative evaluation of the effects of regional planning measures on

ecosystem services. *Environmental Management*, 46(6), 953–968.
<https://doi.org/10.1007/s00267-010-9570-7>

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27, 101.

Haines-Young, R., Potschin, M., Raffaelli, D. G., & Frid, C. L. J. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In *Ecosystem ecology* (pp. 110–139).

Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>

Hernández-Moreno, Á., Echeverría, C., Sotomayor, B., & Soto, D. P. (2021). Relationship between anthropization and spatial patterns in two contrasting landscapes of Chile. *Applied Geography*, 137, 102599.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102599>

Holl, K. D., Crone, E. E., & Schultz, C. B. (2003). Landscape restoration: Moving from generalities to methodologies. *BioScience*, 53(5), 491–502.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0491:Lrmfgt\]2.0.Co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0491:Lrmfgt]2.0.Co;2)

Hua, F., Bruijnzeel, L. A., Meli, P., Martin, P. A., Zhang, J., Nakagawa, S., ... Balmford, A. (2022). The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 376(6595), eabl4649.
<https://doi.org/10.1126/science.abl4649>

Huber, A., Iroumé, A., & Bathurst, J. (2007). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*, 22(1), 142–148.
<https://doi.org/10.1002/hyp.6582>

Instituto Forestal [INFOR]. (2023). Plataforma de gestión de recursos hídricos. Recuperado de <https://bosquesyagua.infor.cl>

Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 277–289. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002018000200277>

Koschke, L., Fürst, C., Frank, S., & Makeschin, F. (2012). A multi-criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning. *Ecological Indicators*, 21, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.010>

Koschke, L., Van der Meulen, S., Frank, S., Schneidergruber, A., Kruse, M., Fürst, C., ... Bastian, O. (2014). Do you have 5 minutes to spare? The challenges of stakeholder processes in ecosystem services studies. *Landscape Online*, 37, 1–25. <https://doi.org/10.3097/lo.201437>

Krishnaswamy, A. (2004). Participatory research: Strategies and tools. *Practitioner: Newsletter of the National Network of Forest Practitioners*, 22(3), 17–22.

Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., ... Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4), 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004>

Lara, A., Urrutia, R., Little, C., & Martinez, A. (2010). Servicios ecosistémicos y ley del bosque nativo: No basta con definirlos. *Bosque Nativo*, 47, 3–9.

Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*.

Lindenmayer, D. (2016). Interactions between forest resource management and landscape structure. *Current Landscape Ecology Reports*, 1(1), 10–18. <https://doi.org/10.1007/s40823-016-0002-0>

Lindenmayer, D. B., & Fischer, J. (2013). *Habitat fragmentation and landscape change: An ecological and conservation synthesis*. Island Press.

Little, C., Cuevas, J. G., Lara, A., Pino, M., & Schoenholtz, S. (2014). Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecohydrology*, 8(7), 1205–1217. <https://doi.org/10.1002/eco.1575>

Little, C., & Lara, A. (2010). Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31, 175–178.

Little, C., Lara, A., McPhee, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.011>

Martin-Lopez, B., Iniesta-Arandia, I., Garcia-Llorente, M., Palomo, I., Casado-Arzuaga, I., Amo, D. G., ... Montes, C. (2012). Uncovering ecosystem service bundles through social preferences. *PLoS One*, 7(6), e38970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038970>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2014). *Propuesta marco conceptual, definición y clasificación de servicios ecosistémicos*. Santiago, Chile.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2015). *Guía de orientación para incorporar la dimensión ambiental en procesos de ordenamiento territorial sustentable*

Moller, P. (2011). Las franjas de vegetación ribereña y su función de amortiguamiento, una consideración importante para la conservación de humedales. *Gestión Ambiental*, 21.

Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.006>

Nahuelhual, L., Carmona, A., Lozada, P., Jaramillo, A., & Aguayo, M. (2013). Mapping recreation and ecotourism as a cultural ecosystem service: An application at the local level in Southern Chile. *Applied Geography*, 40, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.004>

Nations (FAO), F. A. O. of the U. (1979). *A provisional methodology for soil degradation assessment*. Roma, Italia.

Otavo, S., & Echeverría, C. (2017). Fragmentación progresiva y pérdida de hábitat de bosques naturales en uno de los hotspot mundiales de biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(4), 924-935. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.041>

Oyarzún, C., & Huber, A. (1999). Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *Terra Latinoamericana*, 17, 35-44.

Pagiola, S., Agostini, P., Gobbi, J., De Haan, C., Ibrahim, M., Murgueitio, E., ... Ruíz, J. (2004). Paying for biodiversity conservation services in agricultural landscapes. *Environmental Economics Series*, 96, 49.

Palma Hernández, D. B., De la Barrera, F., & Pineda López, R. (2019). Evaluación de los servicios ecosistémicos provistos por una microcuenca periurbana de Querétaro (México). *Investigaciones Geográficas*(57). <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.53581>

Potschin, M. B., & Haines-Young, R. H. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Ecology*, 35(5), 110-139.

Ramírez de Arellano, P., Carrasco, G., Alarcón, D., Briones, R., & Reyes, B. (2018). Planificación sistemática para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos aplicada a la Cordillera de Nahuelbuta. En J. P.-Q. y P. Rodrigo (Eds.), *Metodologías Aplicadas para la Conservación de la Biodiversidad en Chile* (Vol. 1.0, pp. 552). Santiago, Chile.

Revueltas, J., Zabaleta, A., Mercado, T., & Aguirre, S. (2020). Cambios en el clima local y su efecto en la regulación hídrica en microcuencas del departamento del Magdalena, Norte de Colombia. *Información Tecnológica*, 31, 193-206. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600206>

Rey Benayas, J. M., Newton, A. C., Diaz, A., & Bullock, J. M. (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. *Science*, 325(5944), 1121-1124. <https://doi.org/10.1126/science.1172460>

Rodríguez-Echeverry, J., Echeverría, C., Oyarzún, C., & Morales, L. (2018). Impact of land-use change on biodiversity and ecosystem services in the Chilean temperate forests. *Landscape Ecology*, 33(3), 439-453. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0612-5>

Romero, F. I., Cozano, M. A., Gangas, R. A., & Naulin, P. I. (2014). Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 35(1), 1-2. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002014000100001>

Rozas-Vásquez, D., & Gutiérrez, P. (2018). Advances and challenges in the implementation of strategic environmental assessment in Chile. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 425-428. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1490048>

Sherrouse, B. C., Clement, J. M., & Semmens, D. J. (2011). A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services.

Applied Geography, 31(2), 748-760.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.08.002>

Sukhdev, P., Wittmer, H., & Miller, D. (2014). The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB): Challenges and responses. En *Nature in the Balance* (pp. 135-150).

Syrbe, R.-U., & Walz, U. (2012). Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*, 21, 80-88.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.013>

UICN, & WRI. (2014). *Guía sobre la metodología de evaluación de oportunidades de restauración (ROAM): Evaluación de las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional*. Gland, Suiza.

Villamagna, A. M., Angermeier, P. L., & Bennett, E. M. (2013). Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 15, 114-121.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.07.004>

Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J., & Melillo, J. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 227, 494-499.

Wolff, S., Schulp, C. J. E., & Verburg, P. H. (2015). Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 55, 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.016>

Wu, J. (2013). Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 999-1023.
<https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9>

VII. APÉNDICE

Tabla A 1. Superficie de coberturas y usos de suelo(CUS) en hectáreas(ha) para el año 2017 en la Cordillera de Nahuelbuta.

CUS	Area (ha)
Area urbana	145,8
Bosque esclerofilo adulto	12,15
Bosque deciduo adulto	36269,37
Bosque siempreverde adulto	653,67
Bosque resinoso adulto	6533,46
Bosque esclerofilo secundario	197,64
Bosque deciduo secundario	117413,55
Bosque siempreverde secundario	1743,12
Bosque resinoso secundario	18394,29
Bosque achaparrado	836,73
Matorral arborescente	4125,33
Matorral	54754,38
Plantacion adulta de pino	147955,41
Plantacion joven de pino	90672,21
Plantacion adulta de eucaliptus	31798,17
Plantacion joven de eucaliptus	73296,9
Cosecha forestal	72440,73
Agricultura	14507,1
Pastizales	10031,85
Suelo descubierto	90,72
Humedales	4,05
Total	681876,63

Tabla A 2. Clasificación según CICES, versión 5.1, de los servicios ecosistémicos e indicadores evaluados bajo el proyecto FONDECYT Regular 1181374.

Sección	Clase	Indicador y Unidad	Descripción simple	Código CICES v5.1
Regulación y soporte	Regulación de la temperatura	Disconfort index (°C)	Regular la calidad física del aire para las personas	2.2.6.2
Regulación y soporte	Control de erosión	Pérdida de suelo (Ton/ha y-1)	Controlar o prevenir la pérdida de suelo	2.2.1.1
Regulación y soporte	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	Diferencia volumétrica (%)	Regular los flujos de agua en nuestro entorno	2.2.1.3
Regulación y soporte	Regulación de la condición química del agua	Pérdida de calidad de agua (%)	Control de la calidad química del agua dulce	2.2.5.1
Regulación y soporte	Regulación de la composición química de la atmosfera	Secuestro de carbono (Ton C/ha)	Regular el clima mundial	2.2.6.1
Provisión	Plantas terrestres cultivadas con propósitos nutricionales	Producción de alimento (Kcal/ha)	Todos los cultivos y frutos cultivados por el hombre para la alimentación; cultivos alimentarios	1.1.1.1
Provisión	Madera aserrada	Madera aserrada (M ³ /ha)	Materiales vegetales utilizados como fuente de energía	1.1.1.3
Provisión	Plantas cultivadas como fuente de energía	Biomasa para leña (Ton/ha)	Materiales de plantas silvestres, hongos y algas utilizados para la energía	1.1.5.3
Provisión	Fibras derivadas de plantas cultivadas	Pulpa (Ton/ha)	Material de plantas que podemos utilizar	1.1.1.2
Cultural	Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y experienciales	Potencial de recreación (%)	Elementos del entorno físico que podemos experimentar activa o pasivamente	6.1.1.1

Tabla A 3. Matriz de evaluación.

CUS	Regulación de la temperatura	Control de erosión	Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y experienciales	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	Regulación de la composición química de la atmósfera	Regulación de la condición química del agua	Plantas terrestres cultivadas con propósitos nutricionales	Madera aserrada	Plantas cultivadas como fuente de energía	Fibras derivadas de plantas cultivadas
Area urbana	46	96,6	2,6	0	0	5	0	0	0	0
Bosque esclerófilo adulto	86	95,6	75,6	80,6	56,9	79,7	0	11,1	16,7	0
Bosque deciduo adulto	89	95,1	92,1	95,2	100	93	0	76	68,6	0
Bosque siempreverde adulto	78	96,3	100	100	94,2	100	0	100	100	0
Bosque resinoso adulto	56	98,3	93,3	100	87,6	100	0	49,8	0	0
Bosque esclerófilo secundario	86	93,9	48,6	52,6	44,7	79,7	0	0	10,7	0
Bosque deciduo secundario	100	92,9	84,9	64,8	74,1	85,4	0	40,9	40,9	0
Bosque siempreverde secundario	78	92,4	79,6	87,1	77,8	85,4	0	70,2	70,2	0
Bosque resinoso secundario	67	97,8	84	75,6	57,5	89,7	0	25,5	0	0
Bosque achaparrado	56	96,1	67	46,7	12,9	82,5	0	0	10,7	0
Matorral arborescente	68	72,5	25,2	42,7	8	43,4	0	2,1	6,8	0
Matorral	61	57,5	16,1	35,4	3,7	38,8	0	0	4	0
Plantación adulta de pino	49	62,5	20	40,1	64,5	74,7	0	65,3	55,5	92,7
Plantación joven de pino	49	40,1	15	19,3	53,3	66,9	0	31,4	27,7	46,3
Plantación adulta de eucalipto	56	60,1	21,6	38,2	42,7	61,8	0	41,1	75,9	100

Plantacion joven de eucaliptus	49	37,5	15,8	18,4	33,8	55,3	0	20,3	35	50
Cosecha forestal	38	6,4	10	7,4	0	40,3	0	0	0	0
Agricultura	41,1	33	14,7	9,5	1,5	11,8	57,5	0	0	0
Pastizales	60,8	57,9	21,2	39,2	1	24,8	27,4	0	0	0
Suelo descubierto	71	41,5	14	11,3	0	19,3	0	0	0	0
Cuerpos de agua	100	100	72,5	100	0	100	0	0	0	0

Tabla A4. Superficies de comunas pertenecientes al área de estudio

Región	Provincia	Comuna	Superficie total (ha)	Superficie perteneciente a Nahuelbuta (ha)	% de superficie total de la comuna perteneciente a Nahuelbuta
Biobío	Concepción	San Pedro de la Paz	11749	2361	20,1
Biobío	Concepción	Coronel	28201	7698	27,3
Biobío	Concepción	Lota	11499	8470	73,7
Biobío	Concepción	Santa Juana	77917	42425	54,4
Biobío	Arauco	Arauco	96274	17516	18,2
Biobío	Arauco	Cañete	109185	52064	47,7
Biobío	Arauco	Contulmo	64071	52955	82,6
Biobío	Arauco	Curanilahue	100563	65180	64,8
Biobío	Arauco	Los Alamos	60225	27359	45,4
Biobío	Arauco	Tirúa	62852	34038	54,2
Biobío	Biobío	Nacimiento	90624	45464	50,2
La Araucanía	Malleco	Renaico	26584	3327	12,5
La Araucanía	Malleco	Angol	119951	82086	68,4
La Araucanía	Malleco	Los Sauces	84962	24482	28,8
La Araucanía	Malleco	Purén	46507	29692	63,8
La Araucanía	Malleco	Lumaco	111260	84839	76,3
La Araucanía	Cautín	Galvarino	56887	3786	6,7
La Araucanía	Cautín	Carahue	134062	72547	54,1
La Araucanía	Cautín	Cholchol	42801	13789	32,2
La Araucanía	Cautín	Nueva Imperial	73232	10130	13,8
Total			1409406	680205	

Tabla A5. Variación porcentual de la capacidad de provisión de SE respecto a la condición inicial, a escala comunal.

Comuna	Escenario	Regulación de la temperatura	Control de erosión	Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos
San Pedro de la Paz	Escenario C	34,7	60,7	66,2
Lota	Escenario B	22,8	40,9	51,4
Arauco	Escenario B	22,5	33,8	44,5
San Pedro de la Paz	Escenario B	21,5	33,4	44,2
Coronel	Escenario C	17,8	24,0	26,1
Lota	Escenario C	17,6	30,7	32,2
Arauco	Escenario C	17,3	26,4	28,8
Contulmo	Escenario B	17,1	18,4	28,1
Carahue	Escenario B	17,0	21,0	23,8
Arauco	Escenario A	14,8	23,2	33,1
Coronel	Escenario B	13,1	14,9	22,2
Nueva Imperial	Escenario B	12,0	18,6	24,8
Lumaco	Escenario C	11,9	18,1	18,8
Santa Juana	Escenario B	11,7	17,6	28,4
Renaico	Escenario B	11,6	16,2	31,0
Curanilahue	Escenario A	11,6	13,3	19,5
Angol	Escenario A	11,4	12,0	17,8
Nacimiento	Escenario A	11,3	15,0	24,5
Renaico	Escenario C	10,4	15,6	19,5
Lumaco	Escenario B	10,1	14,8	20,9
Santa Juana	Escenario A	9,8	15,4	25,9
Santa Juana	Escenario C	9,7	13,9	15,9
Los Sauces	Escenario A	9,4	14,0	25,5
Cholchol	Escenario C	9,4	15,5	16,6
Tirúa	Escenario C	8,5	13,1	13,0
Galvarino	Escenario C	8,2	13,1	13,8
Contulmo	Escenario A	7,6	9,5	17,1
Lota	Escenario A	6,6	14,8	25,0
Curanilahue	Escenario C	6,6	8,5	9,3
Carahue	Escenario C	6,5	9,5	9,2
Purén	Escenario A	6,5	10,0	20,5
Tirúa	Escenario B	6,4	10,2	14,2
Los Sauces	Escenario B	5,8	10,2	20,3
Contulmo	Escenario C	5,7	7,1	8,5
Cholchol	Escenario B	5,6	10,2	16,0
Carahue	Escenario A	5,4	7,5	10,5
Los Alamos	Escenario A	5,4	5,4	8,2
Purén	Escenario B	5,3	9,0	19,0

Renaico	Escenario A	5,3	10,1	22,4
Curanilahue	Escenario B	5,3	7,5	12,8
Los Sauces	Escenario C	5,3	6,7	9,3
Cañete	Escenario C	5,0	5,9	6,1
Angol	Escenario B	4,9	6,4	11,2
Nueva Imperial	Escenario C	4,7	7,7	8,0
Lumaco	Escenario A	4,3	8,3	13,8
Cholchol	Escenario A	3,6	7,7	13,2
Nueva Imperial	Escenario A	3,6	7,5	12,6
Coronel	Escenario A	3,6	5,7	11,5
Angol	Escenario C	3,4	4,1	4,7
Purén	Escenario C	3,4	4,0	5,9
Nacimiento	Escenario C	3,2	4,3	5,4
San Pedro de la Paz	Escenario A	3,2	5,7	12,4
Cañete	Escenario A	3,2	5,3	8,2
Tirúa	Escenario A	3,1	6,2	10,0
Galvarino	Escenario B	1,8	4,9	7,7
Galvarino	Escenario A	1,8	4,9	7,7
Los Alamos	Escenario C	1,7	1,8	1,9
Los Alamos	Escenario B	-1,5	0,4	2,9
Nacimiento	Escenario B	-3,0	-0,1	5,3
Cañete	Escenario B	-7,4	3,5	17,8

Estimados y estimadas

La siguiente encuesta busca obtener información de los beneficios que reciben las personas de los diferentes ecosistemas que existen en la Cordillera de Nahuelbuta, a modo de conocer las principales demandas de sus habitantes, está orientada a personas que vivan o que desarrollen actividades en esta zona geográfica.

Agradezco desde ya su participación

Carlos Varela Ávila
Estudiante tesista de Ingeniería en Conservación de Recursos Naturales
Universidad de Concepción

- Obligatoria

1. Nombre y apellido (Respuesta opcional, no serán publicados en los resultados)

2. ¿En cuál de las siguientes opciones usted tiene mayor participación o se siente representado(a) en mayor medida? *

- ☐ Persona natural habitante de la Cordillera de Nahuelbuta
- ☐ Funcionario(a) de organismo público (Municipalidad, Gobierno Regional, CONAF, Ministerio del Medio Ambiente, etc.)
- ☐ Integrante de ONG, Fundación u otra organización registrada
- ☐ Representante o integrante de alguna empresa (cuyas actividades se desarrollan en la Cordillera de Nahuelbuta)
- ☐ Docente o integrante de la academia (Universidad, Instituto, Centro de Investigación, etc.)
- ☐ Otras

3. La Cordillera de Nahuelbuta está compuesta por parte del territorio de las siguientes 20 comunas, ¿En cuál de ellas reside actualmente? (Si no reside en alguna de estas comunas marque la opción "Otras") *

- ☐ San Pedro de la Paz
- ☐ Coronel
- ☐ Lota
- ☐ Arauco
- ☐ Curanilahue
- ☐ Los Álamos
- ☐ Cañete
- ☐ Contulmo
- ☐ Tñúa
- ☐ Santa Juana
- ☐ Nacimiento
- ☐ Renaco
- ☐ Angol
- ☐ Los Sauces
- ☐ Purén
- ☐ Lumaco
- ☐ Galvarino
- ☐ Cholchol
- ☐ Nueva Imperial
- ☐ Carahue
- ☐ Otras

4. Un ecosistema se define como el conjunto de seres vivos (animales, vegetales, hongos, entre otros) que interactúan con el medio físico (agua, aire, suelo, entre otros) en un lugar determinado. Los ecosistemas proporcionan una serie de beneficios a las personas que los habitan e interactúan con ellos, estos se denominan servicios ecosistémicos.

A continuación se presenta una lista, más una breve descripción y/o ejemplo asociado a 10 servicios ecosistémicos que proporcionan los diversos ecosistemas de la Cordillera de Nahuelbuta.

- **Regulación de la temperatura:** Regulación de la temperatura del ambiente gracias a la presencia de vegetación, especialmente en días calurosos.
- **Control de erosión:** Control o prevención de la pérdida de suelo, especialmente para evitar deslizamientos ante lluvias.
- **Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos:** Regulación de la cantidad de agua que llegan ríos y esteros a raíz de la presencia de vegetación, especialmente vegetación nativa.
- **Regulación de la condición química del agua:** Control de la calidad química del agua de los ríos y esteros, especialmente mediante la extracción de contaminantes por parte de la vegetación.
- **Regulación de la composición química de la atmósfera:** Regulación del clima mundial mediante la captura de carbono por parte de la vegetación y el suelo.
- **Los beneficios de la biodiversidad y los recursos nutricionales:** Todos los cultivos y frutos cosechados por el hombre para la alimentación.
- **Madera aserrada:** Madera, tablonés, astillas entre otros productos forestales maderables provenientes de la tala.
- **Plantas cultivadas como fuente de energía:** Materiales vegetales utilizados para obtener energía, especialmente a través de la biomasa para leña.
- **Fibra derivada de plantas cultivadas:** Materiales vegetales procesados, especialmente pulpa para celulosa.
- **Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y químicas:** Los elementos del paisaje que podemos visualizar, apreciar o observar, como prados recreativos o turísticos, como cuevas, miradores naturales, entre otros.

De estos 10 servicios ecosistémicos que proveen los ecosistemas de la Cordillera de Nahuelbuta seleccione el nivel de importancia que cada uno tiene para usted en una escala que va desde "No es importante" hasta "Muy importante". *

	No es importante	Poco importante	Mediana: entre importante	Importante	Muy importante
Regulación de la temperatura	☐	☐	☐	☐	☐
Control de erosión	☐	☐	☐	☐	☐
Regulación del ciclo hidrológico y flujos hídricos	☐	☐	☐	☐	☐
Regulación de la condición química del agua	☐	☐	☐	☐	☐
Regulación de la composición química de la atmósfera	☐	☐	☐	☐	☐
Plantas terrestres cultivadas con propósitos nutricionales	☐	☐	☐	☐	☐
Madera aserrada	☐	☐	☐	☐	☐
Plantas cultivadas como fuente de energía	☐	☐	☐	☐	☐
Fibras derivadas de plantas cultivadas	☐	☐	☐	☐	☐
Características abióticas de la naturaleza que permiten interacciones físicas y experienciales	☐	☐	☐	☐	☐

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

 Microsoft Forms

90