Soluciones basadas en la naturaleza

COMITÉ CIENTÍFICO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación
Gobierno de Chile

Euroclima+

Financiado por la Unión Europea

NACIONES UNIDAS

CEPAL

Soluciones basadas en la naturaleza

Coordinación
Pablo A. Marquet[1,3] y Maisa Rojas[1,6].

Autores principales
Alejandra Stehr[1], Laura Farías[1], Humberto González[1], Juan Carlos Muñoz[1], Elizabeth Wagemann[2] y Carolina Rojas[3] (Ciudades), Ignacio Rodríguez[4] y Jorge Hoyos[5] (Humedales).

Colaboradores
Paulina Aldunce[1,6], Sebastián Vicuña[1,3], Andrés Rivera[6], Rodrigo Hucke-Gaete[7], Loretto Contreras Porcia[8], Mauricio Palacios[7], Sylvain Faugeron[3], Alejandro Perez Matus[3], Stefan Gelcich[3], Jorge Francisco Pérez Quezada[6], Christian Little[9].

Participación en taller (Anexo 2).

1 Comité Científico Asesor de Cambio Climático
2 Universidad Diego Portales
3 Pontificia Universidad Católica de Chile
4 Centro de Humedales Río Cruces
5 Universidad de Magallanes
6 Universidad de Chile
7 Universidad Austral de Chile
8 Universidad Andrés Bello
9 Instituto Forestal

Esta iniciativa se desarrolla como parte del aporte entregado por la Unión Europea, a través de su programa EUROCLIMA+ a Chile en su rol de Presidencia de la 25.ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para impulsar la acción climática, tanto en Chile como en América Latina y el Caribe.

La UE es un socio estratégico clave en la acción climática y para conectar los puntos entre la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en apoyo del logro de los objetivos del Acuerdo de París. En esa línea, Chile acordó trabajar conjuntamente con la UE en la preparación y organización de la COP 25.

Citar como:
Marquet, Pablo A., Maisa Rojas, Alejandra Stehr, Laura Farías, Humberto González, Juan Carlos Muñoz, Elizabeth Wagemann, Carolina Rojas, Ignacio Rodriguez y Jorge Hoyos (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Coordinado por Pablo A. Marquet y Maisa Rojas. Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. doi: 10.5281/zenodo.5736938

—

Secretaría técnica Comité Científico Asesor de Cambio Climático:
Soledad Quiroz y Javier Vargas.
Edición: Miguelángel Sánchez
Edición de referencias: Valentina Álvarez Cataldo
Diseño: www.negro.cl
Foto portada: www.istockphoto.com

COMITÉ CIENTÍFICO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación
Gobierno de Chile

Índice de contenidos

Resumen ejecutivo 4
1. Introducción 10
2. Bosques 13
3. Agricultura 21
4. Humedales 29
5. Ecosistemas marinos 36
6. Ciudades 48
7. Criósfera andina 54
8. Relación con instrumentos de política pública 56
9. Brechas 57
10. Recomendaciones 58
Anexos 60
Referencias 71

Soluciones basadas en la naturaleza

Resumen ejecutivo

Las *soluciones basadas en la naturaleza* (SBN) representan acciones tendientes a la mitigación y adaptación al cambio climático que poseen un enfoque ecosistémico basado en la comprensión científica del ciclo del carbono y la sustentabilidad de los recursos naturales. Por definición, las SBN poseen cobeneficios para la biodiversidad e impactan positivamente la calidad de los suelos, el aire y el agua. Las SBN proporcionan opciones de mitigación costoefectivas y proveen de opciones de adaptación. De las muchas definiciones existentes, el Comité Científico de Cambio Climático ha adoptado la siguiente definición de *soluciones basadas en la naturaleza*:

> *Acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, que abordan desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria e hídrica o el riesgo de desastres de manera eficaz y adaptativa, al mismo tiempo que aportan al bienestar humano y proporcionan beneficios para la biodiversidad.*

Por tanto, una solución al cambio climático que no genere beneficios para la biodiversidad no califica como soluciones basadas en la naturaleza. Es importante enfatizar que las SBN permiten abordar al mismo tiempo los desafíos de la crisis climática y la grave crisis de biodiversidad por la que atravesamos. En este contexto, las acciones que involucren actividades de aforestación —es decir, la acción de plantar árboles en áreas donde no estaban históricamente presentes— no son consideradas SBN, pues tienen costos importantes para la biodiversidad local y el ciclo del agua.

Entre las soluciones más importantes están aquellas relacionadas con la protección, restauración y manejo de ecosistemas de bosques; el manejo del fuego; el uso del biocarbón como fertilizante a partir de desechos de la agricultura; el manejo de nutrientes para limitar las emisiones producidas por la adición de fertilizantes nitrogenados; propender hacia una ganadería que potencie el carbón en el suelo; restaurar y proteger los humedales; la utilización de infraestructura verde; la reutilización de aguas lluvias y la reforestación en ciudades; e incorporar con fuerza a los océanos como parte de las soluciones, para lo cual es fundamental el rol de los bosques de macroalgas, los fondos marinos y la captura y enterramiento de carbono asociada a la «bomba biológica de carbono», que incluye a macroalgas, krill y ballenas, entre otros. En este informe se analizan estas soluciones y se resumen propuestas de recomendaciones.

Bosques

Para el caso de los bosques, las SBN analizadas en este informe son *restauración y reforestación de ecosistemas forestales* y el *manejo del fuego*.

De acuerdo con las directrices del IPCC de 2006, solo se consideran en los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) los bosques gestionados, que han permanecido en mismo tipo de uso de la tierra por al menos veinte años. En el caso de Chile, estos bosques corresponden a los que son manejados bajo la figura de *planes de manejo* que considera la Ley de Bosques y aquellos bosques nativos dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). A este respecto, es importante revisar la Ley de Bosques para incrementar los incentivos al manejo y restauración de bosques nativos y generar mayores superficies que entren en la contabilidad. Por otro lado, también es importante llevar a cabo una labor estratégica de conservación que permita aumentar la actual red de áreas protegidas, para proteger aquellos ecosistemas que aún están subrepresentados en el SNASPE, y dotar a cada uno con un plan de manejo efectivo que considere el cambio climático y la protección de los *stocks* de carbono que poseen tanto sobre como bajo el suelo.

Es necesario apurar la implementación de acciones de reforestación y restauración, ya que pueden estar sujetas a diversos obstáculos, desde la disponibilidad de semillas o la capacidad de generar un número adecuado de plántulas en viveros, hasta la disponibilidad de mano de obra para labores de despeje, remoción de especies exóticas, protección de las plántulas de herbívoros introducidos, disponibilidad de agua, plantado y posterior monitoreo. Por último, está la necesidad de identificar sitios adecuados para labores de reforestación y su disponibilidad. Una vez que estas barreras han sido superadas —lo cual probablemente afectará el tiempo de implementación en al menos un par de años—, la reforestación se puede iniciar. La reforestación y restauración de ecosistemas boscosos y los cuerpos legales y otras iniciativas que los promueven chocan con otros instrumentos de política pública, como el Programa de Suelos Degradados (SIRSD), que es un instrumento de fomento del Ministerio de Agricultura establecido por la Ley 20.412 de 2010, con el objetivo de recuperar el potencial productivo de los suelos agropecuarios degradados, y que desincentiva las actividades de restauración de suelos agropecuarios que poseían cubierta forestal nativa en el pasado. A este respecto, es importante alinear los beneficios de la Ley del Bosque Nativo con los del programa SIRSD para dar mayores opciones a la reforestación y restauración del bosque nativo.

Por otro lado, es de suma importancia enfrentar el problema del uso de la leña como principal combustible en las viviendas, sobre todo en la zona centro sur de Chile. Esto requiere implementar medidas como subsidios y cambios tecnológicos, pero más ampliamente abordar las barreras socioculturales para la conversión de uso de leña a otros combustibles menos contaminantes. Lo anterior debe ir asociado a un programa de mejoramiento en el aislamiento energético de las viviendas. Reducir el uso de leña no solo tiene un impacto positivo en la biodiversidad y en la captura de carbono en los bosques, sino que además entrega enormes beneficios sociales y a la salud de las personas.

Es importante considerar metas y objetivos de reducción de emisiones provenientes de los incendios forestales. Esto requiere avanzar en una institucionalidad que asuma y coordine la prevención de incendios mediante el diseño de paisajes resilientes, con una planificación y ordenamiento territorial que permita abordar riesgos de un modo adaptativo, favoreciendo la heterogeneidad del paisaje; e implementar acciones integrales que involucren la capacitación y educación, además del financiamiento de tecnologías de monitoreo, prevención y mitigación de incendios forestales.

Agricultura

Para este sector se analizan cuatro SBN: *biocarbón*, *manejo de nutrientes*, *árboles en tierras de cultivo* y la *mejora del carbono en el suelo en tierras de pastoreo*.

Las iniciativas basadas en el *biocarbón* promueven un aumento del secuestro de CO_2 en el suelo mediante la modificación de los suelos agrícolas con biocarbón producido por la conversión de residuos de cultivos en carbono recalcitrante a través de la pirólisis. Para el caso de Chile, se recomienda una evaluación de la capacidad de captura neta de carbono por medio de esta tecnología para despejar potenciales dudas respecto de su uso. También es posible instalar la solución de biocarbón dentro del ámbito de manejo de residuos, en vista de las incertidumbres actuales asociadas a brechas tecnológicas y de conocimiento, como, por ejemplo, respecto de las huellas energética e hídrica de la generación de biocarbón. Al incorporarlo dentro de una meta más amplia, se incentivaría que los productores no quemen residuos y puedan transitar a un manejo sostenible. Por ejemplo, podría haber incentivos para que los agricultores, en vez de quemar los rastrojos, los envíen a una planta de pirólisis o compostaje cercana. Todo lo anterior pasa por cuantificar la materia prima disponible para generar biocarbón y, sobre eso, ajustar una meta para su utilización.

El *manejo de nutrientes* es reconocido como inadecuado, ya que contribuye a la generación de GEI y la contaminación del agua. Respecto de este punto, se recomienda: i) condicionar los subsidios en programas de fertilización a la presentación de un programa de manejo; ii) generar un mapa de zonificación regional que permita declarar zonas saturadas por nitrógeno y poder regular y establecer zonas sensitivas; iii) se recomienda avanzar hacia un registro de compra y aplicación de productos para generar mapas de cuencas o microcuencas gestionado por un regulador, ya que es importante saber lo que se aplica, cuánto y dónde;

iv) dado el impacto de los fertilizantes sobre cuerpos de agua asociados, es importante generar monitoreos no solo de fertilizantes, sino que se deberían incluir las aguas adyacentes a las cuencas y predios evaluados, ya que el nitrógeno es móvil y llega al agua (es decir, agua con alto contenido de nitrato). La generación de normas secundarias de calidad del agua que impidan el uso excesivo de fertilizantes puede ser una alternativa. A partir de ese diagnóstico, se debe avanzar en medidas para hacer el uso racional de fertilizantes, incorporando el clima como una variable importante, ya que la condición de temperatura y pluviometría puede tener un gran impacto en la forma en que el nitrógeno se volatiliza o lixivia. Por último, el programa de recuperación de suelos degradados debiera incentivar el uso de fertilizantes ambientalmente amigables, en particular mejorando la transferencia tecnológica y capacitación de productores en el correcto uso de fertilizantes. Además, es importante educar a los agricultores de los efectos negativos de la sobrefertilización, la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero.

La solución de *árboles en tierras de cultivo* se relaciona con el secuestro adicional de carbono en la biomasa arbórea por encima y por debajo del suelo, además del aumento del carbono en el suelo, gracias a la integración de árboles en las tierras de cultivo a niveles que no reduzcan su rendimiento. Esto incluye cortinas rompevientos, cinturones de protección y cultivos en callejones. Para el caso de Chile, lo más urgente respecto de esta SBN es generar incentivos a nivel local para su adopción, lo cual pasa por generar subsidios que consideren en forma holística bosques y agricultura, además de sistemas de certificación que promuevan la integración de los árboles en los campos agrícolas.

Humedales

La conservación o restauración de los sistemas de humedales es una SBN con multitud de servicios de gran valor social, económico y ambiental, como la mitigación de impactos por inundaciones, absorción de contaminantes, retención de sedimentos, recarga de acuíferos, hábitats para animales, aves y plantas y captura de CO_2, almacenamiento de biomasa y enterramiento de carbono entre muchos otros. Dentro de estos servicios destacan los asociados a la provisión de agua, y por lo tanto, medidas de protección para conservar los humedales y sus servicios tendrán beneficios, en particular para asegurar la no interrupción del ciclo del agua y por ende su disponibilidad, aportando especialmente a la adaptación al cambio climático. En este contexto, es importante incluir dentro de los inventarios de emisiones chilenas, las emisiones y capturas asociadas a ecosistemas de humedales, incluidas las marismas y praderas. Estos actualmente no se contabilizan, solo se consideran las transformaciones de humedales a otro uso de la tierra.

Una propuesta de SBN de humedales en el marco del cambio climático debería incluir una visión ecosistémica integrada (cuenca), en un contexto de ciclos naturales como los del agua y carbono y que considere las diferentes realidades de Chile. En particular, para el caso de los humedales se recomiendan las siguientes acciones prioritarias:

- Definir una metodología estandarizada para mantener y actualizar un inventario nacional de humedales. El inventario se debe actualizar periódicamente (cada cinco años, por ejemplo).
- El inventario nacional se realiza con datos satelitales, que tiene una resolución espacial limitada. Por lo tanto, se requiere validar en terreno a nivel comunal lo que realmente son humedales y sus bordes.
- Algunas de las variables biofísicas de los humedales se pueden medir remotamente. Se recomienda realizar estas mediciones de manera sistemática para los humedales en el inventario nacional y dejarlas disponible en alguna plataforma tal como el Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad (SIMBIO) o el Observatorio de Cambio Climático.
- Para cada tipo de humedales (marismas, bofedales, turberas, etcétera), se recomienda escoger un número pequeño para servir de piloto para medición *in situ* de los flujos de carbono y así poder evaluar potencial de mitigación. Adicionalmente se debe medir *in situ* el nivel del agua para ver si se están secando o no.
- Ciencia ciudadana: Para algunos humedales (urbanos sobre todo) las mediciones *in situ* se pueden realizar con ayuda de la comunidades aledañas, como colegios o vecinos.

Por último, es importante mencionar que, dada la urgente necesidad de abordar la grave sequía que afecta al país desde 2010, la conservación de humedales, protección de cabeceras de cuencas y ambientes de ribera, entre otros, pueden ser la clave para una solución sostenible a 2050 que asegure el caudal ecológico necesario para proveer de agua a la naturaleza y las personas.

Ecosistemas marinos

La incorporación del océano en las SBN se traduce en una posibilidad concreta para el país de avanzar hacia un desarrollo más sustentable, reflejado en las localidades costeras que utilizan los recursos naturales marinos.

El océano captura, almacena y secuestra una gran cantidad de carbono en diferentes reservorios. Más aún, es el único sistema capaz de enterrar carbono como resultado del funcionamiento a largo plazo de una compleja red de procesos biogeoquímicos y tróficos asociados al ciclo del carbono, el cual queda enterrando en forma permanente en los sedimentos marinos que se constituyen como el mayor reservorio de largo plazo de carbono, tanto orgánico como inorgánico, en el planeta. En este contexto, en

este informe se discuten las siguientes SBN relacionadas con el océano: *conservación y protección de bosques de algas pardas*, *restauración y manejo de bosques de algas pardas*, *protección y reducción de la degradación de la bomba de carbono* y *protección del fondo marino*.

Es muy relevante destacar el aporte de los ecosistemas marinos en acciones de mitigación y de adaptación, al modular el aumento de temperatura atmosférica en zonas costeras; proveer refugios o hábitats para el aseguramiento de cuotas pesqueras y la producción de bienes y servicios para pescadores artesanales y pequeños empresarios del turismo; y, en particular, reducir el riesgo de desastres como marejadas y tsunamis.

Respecto de las SBN en el oceáno, este informe recomienda:

- Ampliar las *áreas marinas protegidas* a otras ecorregiones, ya que —debido al gradiente latitudinal de condiciones ambientales frente a las costas de Chile—, cada región tiene condiciones únicas y, por lo tanto, especies que son exclusivas de cada región.
- Proteger las áreas costeras que albergan áreas importantes para la reproducción, el reclutamiento y el crecimiento, y que por lo tanto son también altamente productivas y ricas en áreas de captura de peces y recursos bentónicos.
- Proteger un mayor porcentaje de áreas donde las macroalgas forman parte importante del ecosistema, para su conservación y beneficios para la pesca.
- Aumentar la fiscalización y la extensión de los comités de manejo de macroalgas pardas en gran parte del territorio nacional con algún tipo de actividad extractiva, sobre todo en la macrozona norte, para garantizar una adecuada gestión y seguimiento de la actividad.
- Se debe reforzar el co-manejo de los recursos de grandes algas pardas mediante la adopción de planes de manejo de estos recursos en áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB), además del incentivo a la generación de nuevas áreas y la extensión de las existentes.
- Definir un reglamento asociado a la Ley de Repoblamiento de Algas (Ley 20.925), que tiene por objeto aumentar la biomasa disponible de recursos algales de importancia ecológica y económica existentes en el territorio nacional mediante el establecimiento de un sistema de bonificación, el cual permite cambiar la matriz productiva actual del sector alguero de extracción, por medio del cultivo o repoblamiento.
- Establecer el área marina protegida en la península Antártica y el sur del mar de Scotia (AMP Dominio 1) liderada por el Instituto Antártico Chileno (Inach) y el Instituto Antártico Argentino (IAA). Esta área otorga protección a gran parte del área 48, zona donde se concentra la mayor población de krill y el 70% de la pesquería de krill antártico. Además, es donde se han registrado importantes hábitats bentónicos. Un área marina protegida contribuiría a proteger la bomba biológica de carbono en la zona.
- Avanzar en la creación de nuevos sistemas de monitoreo con una red de estaciones *in situ* para medir variables atmosféricas y oceanográficas.
- Financiar estudios que consideren la sensibilidad y respuesta del flujo de carbono secuestrado por la bomba biológica de carbono a cambios en la temperatura del océano y los volúmenes de pesca.
- Caracterizar e identificar refugios climáticos marinos y elaborar un mapa con potenciales puntos de interés para la ciencia, con especial énfasis en la Patagonia chilena.
- Establecer figuras de protección marina o ampliar las existentes en aquellos sectores identificados con características de refugios climáticos para la biodiversidad marina.
- Generar líneas de investigación para evaluar los cambios que permitan mantener y fortalecer la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de los océanos ante el cambio climático.
- Propender a la valoración de la función ecosistémica de los vertebrados marinos (*oceanic blue carbon*) y su rol ecológico como sumideros de carbono del océano.
- Promover un aumento del conocimiento de los cobeneficios que tiene el rol de los vertebrados marinos a través de diversos procesos ecológicos, a nivel de políticas públicas y sus implicancias en la población.
- Asegurar la protección del suelo marino de las amenazas de la actividad de minería submarina en la zona económica exclusiva (ZEE) chilena. Se trataría de una medida precautoria fundada en el principio *in dubio pro natura*, en virtud del cual, ante la duda de si una acción u omisión pueda o no pueda afectar al ambiente o los recursos naturales, las decisiones que se tomen deben ser en el sentido de protegerlos.

Ciudades

Más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas, y en Chile más del 87% de sus habitantes vive en ciudades. El rol de las ciudades en el cambio climático ha sido un tema central en las discusiones en la última década, debido a que son una de las fuentes principales de emisión de carbono y, al mismo tiempo, están muy expuestas a sus consecuencias. Tradicionalmente, la inversión pública ha expandido la denominada *infraestructura gris*, que instala carpetas de hormigón donde antes había ecosistemas naturales, con lo cual se han expandido las ciudades y se han deteriorado irreversiblemente los ecosistemas afectados. Cuando esta urbanización se ha ejecutado sin una planificación adecuada, ha exacerbado algunos riesgos asociados a este deterioro, como la construcción en humedales, en zonas aluvionales, en ribera de ríos o en zonas con pendientes pronunciadas.

La geografía en que están enclavadas muchas de nuestras ciudades las hace especialmente vulnerables ante estas problemáticas, como el relleno y la fragmentación de humedales costeros en ciudades. En este contexto, las SBN han sido identificadas como posibles alternativas tanto para abordar una variedad de problemas urbanos como por su potencial para lograr ciudades vibrantes, saludables, resilientes y sostenibles. Por ello, algunas estrategias de SBN para incorporar en el diseño y planificación de las ciudades que se abordan en este informe son: *corredores verdes*, *reforestación en zonas urbanas*, *manejo de aguas*, *restauración de cerros isla urbanos y piedemontes*, y *superficies verdes en zonas edificadas* (techos verdes, patios, y jardines).

Respecto de estas soluciones, se recomienda que, además de cubrir los vacíos de conocimiento que se identifican en este informe, es importante generar un plan maestro de corredores verdes que incorpore movilidad activa (caminata y bicicleta) y aumento de cobertura verde en las ciudades chilenas; definir una estrategia de manejo de aguas y drenaje en zonas urbanas para controlar la calidad de estos ecosistemas (aguas servidas y aguas lluvias) a escala urbana y a escala domiciliaria; desarrollar un plan de restauración de cerros isla urbanos y piedemontes; y definir una estrategia que promueva el uso de superficies verdes en ciudades, de acuerdo a las características de cada comuna.

Es crucial que en la adopción de SBN se potencie simultáneamente la resiliencia de las sociedades y la de los ecosistemas, de forma transversal entre sectores y a distintas escalas de manejo, priorizando las soluciones locales. Estas medidas deben desarrollarse en los territorios en conjunto con las comunidades locales y pueblos indígenas, de manera de respetar sus derechos y asegurar la justa distribución de costos y beneficios en la protección del medio ambiente. Las SBN pueden transformarse en un instrumento que aumente el orgullo y sentido de pertenencia de las comunidades locales a los territorios que habitan.

Criósfera andina

En el contexto de la criósfera, hemos identificados dos SBN: *protección de glaciares y cubierta nival* y *protección del permafrost*.

Los ecosistemas de la criósfera andina son de gran importancia por los servicios ecosistémicos que proveen y su rol clave en la gestión y manejo hídrico. Es de amplio conocimiento que los glaciares son muy vulnerables al cambio climático y su protección es fundamental desde la perspectiva de las SBN, así como lo es el mantener y proteger la capacidad de reflexión o albedo de los glaciares y la nieve andina. La reflexión de la radiación por la criósfera es clave en el balance energético del planeta. Las superficies nevadas pueden reflejar a la atmósfera mucha de la radiación (más del 80%) incidente (al contrario del océano, que refleja ~10% y absorbe ~90% de la radiación solar incidente). Esta capacidad disminuye cuando el hielo o la nieve están parcial o totalmente cubiertos por carbono negro por hollín u otras partículas asociadas a la quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y más en presencia de llamas y, por lo tanto, contaminación local.

El permafrost, definido como el suelo congelado por períodos de más de dos años, contiene altas concentraciones de carbono orgánico que podrían, a nivel global, duplicar las concentraciones de carbono atmosférico en caso de derretirse, lo que lo posiciona como un elemento vulnerable que puede retroalimentar el cambio climático. El retroceso de glaciares y las actividades antrópicas tienen el riesgo de dejar expuesto este permafrost, el que, por actividad microbiana, podría liberar gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) a la atmósfera. En este contexto, se recomienda:

- Impedir toda intervención directa en glaciares y minimizar posibles impactos indirectos de actividades humanas en glaciares, para proteger su rol en la provisión de varios servicios ecosistémicos, incluido el suministro de agua.
- Regular actividades que contribuyan a generar material particulado (MP), incluido el polvo que, al depositarse sobre la nieve o el hielo, pueden contribuir a acelerar su derretimiento. Controlar la emisión de material particulado contribuirá a moderar la reducción del albedo y evitará retroalimentar el derretimiento de la nieve y hielo, asegurando una provisión más estable de agua dulce a la población y las actividades productivas.
- Potenciar los sistemas de monitoreo, como el sistema de monitoreo glacial, así como el sistema de alerta de riesgos hidrogeológicos de origen glaciar. Estos riesgos se están incrementando en la medida que se acelera el actual proceso de desglaciación. Los países que poseen extensos ambientes criosféricos son vulnerables a las avalanchas, vaciamientos repentinos de lagos proglaciares (GLOF, por sus siglas en inglés) (Wilson et al., 2018), avalanchas de hielo, inundaciones, inestabilidad de laderas, etcétera. Estos desastres se están haciendo más frecuentes en el marco del cambio climático.

- Avanzar en la creación de nuevos sistemas de monitoreo. Se requiere una red de estaciones *in situ* para monitorear la deposición de material particulado (incluido polvo) sobre superficies de nieve y hielo. Se requiere, además, un sistema de monitoreo de la cobertura de nieve que combine productos satelitales con estaciones de validación en superficie.
- Financiar estudios para determinar la cantidad y características del permafrost y de las áreas periglaciares en el país.

Es importante tener presente que la adopción del marco que proveen las soluciones basadas en la naturaleza implican varios desafíos, como el medir su potencial de mitigación, adaptación y cobeneficios; evaluar su costo-efectividad; y luego, en la fase de implementación, diseñar métricas verificables y monitoreables para medir si las soluciones están cumpliendo con sus objetivos y metas en todas sus dimensiones. En este contexto, es importante que cada SBN cuente con una línea base de biodiversidad y servicios ecosistémicos asociados, en el contexto de una evaluación nacional sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos que incluya aspectos sociales.

1. Introducción

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al sector energía, que representa casi el 80% de las emisiones del país, es sin duda la principal medida para mitigar el cambio climático y alcanzar el objetivo del Acuerdo de París y el compromiso asumido por el país de carbono neutralidad al 2050. Sin embargo, recientemente han tomado relevancia algunas acciones complementarias, basadas en reducir emisiones y potenciar la captura y secuestro de carbono en los ecosistemas. Esta relevancia se explica porque son transversales a una variedad de sectores, como la agricultura, la ganadería, el sector forestal y la pesquería, entre otros; porque generan múltiples cobeneficios para la biodiversidad —incluidos los seres humanos— y los servicios que proveen los ecosistemas; y porque potencian la adaptación al cambio climático.

Estas acciones complementarias son las llamadas soluciones basadas en la naturaleza (SBN), también conocidas como soluciones naturales al clima o soluciones basadas en la biodiversidad (Cohen-Shacham et al., 2016; Griscom et al., 2017; Marquet et al., 2019a, 2021). Estas enfatizan un enfoque sistémico, el cual apunta a utilizar la estrecha interacción que existe entre clima y biodiversidad para mitigar las emisiones, y potenciar la captura y la adaptación de las poblaciones locales a sus efectos (Hou-Jones, Roe & Holland, 2021). Por otra parte, ponen en relieve que la solución a la crisis climática pasa por acciones que tengan sinergias positivas, en vez de compromisos con otros elementos del sistema terrestre que anulen o disminuyan su efectividad, como, por ejemplo, cambiar el uso de suelo para el cultivo de biocombustibles, lo cual genera impactos adversos en la biodiversidad y en la capacidad de los ecosistemas de capturar carbono (Pörtner et al., 2021).

Las SBN se apoyan en un enfoque ecosistémico consagrado en nuestra comprensión científica del ciclo del carbono y otros bioelementos, la cual sustenta tanto las propuestas de mitigación emanadas del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD, 2009) y las propuestas por el Grupo de Trabajo III del IPCC (IPCC, 2014). Sin embargo, trascienden el contexto de mitigación de emisiones y captura, al generar externalidades positivas (cobeneficios) en otros componentes del sistema terrestre, como la biodiversidad y la calidad de los suelos, el aire o el agua, que son fundamentales para la adaptación y la salud de las personas (Griscom et al., 2017; Bikomeye et al., 2021). Es importante enfatizar que las SBN permiten abordar al mismo tiempo tanto los desafíos de la crisis climática como la grave crisis de biodiversidad por la que atravesamos. Las SBN proporcionan opciones de mitigación costo-efectivas, haciendo hincapié en la intensificación de los sumideros de carbono y sus cobeneficios para las personas (mayor seguridad alimentaria, aminoración de desastres naturales y olas de calor), así como para la biodiversidad y la calidad del agua, suelo y aire (Griscom et al., 2017; Cohen-Shacham et al., 2019). Debido a estos cobeneficios, las SBN también dan sustento a la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, aportando directamente a los objetivos de servicios vitales del ecosistema, la biodiversidad, el acceso a agua dulce, las mejoras en medios de vida, las dietas saludables y una seguridad alimentaria basada en sistemas alimentarios sostenibles (NBS Coalition, 2019).

No obstante, es importante tener en cuenta que, a una escala global, la capacidad de las SBN de mitigar emisiones y secuestrar carbono se verá mermada por el cambio climático, por lo que es importante no perder de vista que lo primero es descarbonizar la economía y así usar todo el potencial de las SBN para sustentar la carbono neutralidad (Seddon et al., 2020). En particular, porque existe una asimetría en la respuesta del ciclo del carbono a emisiones positivas y negativas de CO_2, a tal nivel que se requiere secuestrar más CO_2 de lo que se emite para compensar el calentamiento (IPCC, 2021; Zickfeld et al., 2021).

Si bien existen varias definiciones de *soluciones basadas en la naturaleza*, las que ponen énfasis en diferentes aspectos, todas comparten la noción de usar la biodiversidad, en forma directa o indirecta, para generar beneficios y aliviar problemas socioambientales. Griscom et al. (2017: 11.645; traducción propia) las definen como «acciones de conservación, restauración y mejoramiento del manejo territorial, que aumenten el almacenamiento de carbono y/o eviten emisiones de GEI en los bosques, humedales, pastizales y tierras agrícolas del mundo». Por otro lado, la Comunidad Europea, que las ha incorporado en su programa marco Horizonte 2020, enfatiza un contexto que incluye —pero va más allá de— la captura de carbono (European Comission, 2015: 5; traducción propia):

> *Las soluciones basadas en la naturaleza apuntan a ayudar a las sociedades a enfrentarse a una variedad de desafíos ambientales, sociales y económicos de forma sustentable. Son acciones que están inspiradas por, basadas en o copiadas de la naturaleza. Algunas involucran el uso y el mejoramiento de las soluciones existentes a los desafíos, mientras que otras exploran soluciones novedosas, por ejemplo, imitando cómo los organismos no humanos y comunidades sobreviven a extremos ambientales. Las soluciones basadas en la naturaleza usan las características y los complejos sistemas de la naturaleza, como su habilidad para almacenar carbono y regular el escurrimiento del agua, con el objetivo de lograr resultados deseados, como reducir el riesgo de desastres, el mejoramiento del bienestar humano y el crecimiento verde socialmente inclusivo. Mantener y mejorar el capital natural, por lo tanto, es de crucial importancia, ya que forma la base para implementar las soluciones. Estas soluciones basadas en la naturaleza son idealmente eficientes en el uso de energía y recursos, y resilientes al cambio, pero para ser exitosas deben adaptarse a las condiciones locales.*

Por último, la IUCN propone la siguiente definición:

> *Acciones para proteger, manejar sustentablemente y restaurar ecosistemas naturales o modificados que enfrentan a los desafíos sociales efectivamente y adaptativamente, simultáneamente proveyendo beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad* (*Cohen-Shacham et al., 2016; traducción propia*).

En este contexto, el Comité adopta la siguiente definición:

> *Acciones para proteger gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, que abordan desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria e hídrica o el riesgo de desastres de manera eficaz y adaptativa, al mismo tiempo que aportan al bienestar humano y proporcionan beneficios para la biodiversidad.*

Esta definición requiere que las SBN aborden la crisis climática fortaleciendo a la mitigación y la adaptación, pero de forma sostenible y que genere beneficios para la biodiversidad y el bienestar humano. Si ambas condiciones no se cumplen, no estaríamos en presencia de una SBN. El énfasis está en solucionar una amplia gama de desafíos sociales, desde el riesgo de desastres naturales a la seguridad alimentaria, siempre tomando en cuenta el cambio climático.

Por otro lado, las soluciones que poseen mayor énfasis en la mitigación de emisiones de GEI son comúnmente llamadas *soluciones naturales al clima* (SNC). Por ejemplo, las plantaciones de especies arbóreas exóticas proveen de servicios de captura de carbono y beneficios sociales, gracias a la utilidad económica de la cosecha y empleo (pero véase Hofflinger et al., 2021). Sin embargo, las plantaciones no pueden ser consideradas SBN, ya que generan impactos negativos para la biodiversidad, el suelo, el ciclo del agua y las personas (Marquet et al., 2019b; Álvarez-Garretón et al., 2019; Hofflinger et al., 2021; Carte, Hofflinger & Polk, 2021).

En la actualidad, existen evaluaciones del potencial de las SBN a nivel de países como Estados Unidos y Canadá (Fargione et al., 2018; Drever et al., 2021) y que están en desarrollo —por ejemplo, en Colombia—, mientras que para Chile existe una propuesta preliminar de SBN que discutiremos en el cuerpo del informe (Marquet et al., 2021). Una de las evaluaciones del potencial de la SBN a nivel de país es la llevada a cabo recientemente por Fargione et al. (2018), quienes cuantifican el potencial máximo de 21 soluciones analizadas a nivel global por Griscom et al. (2017), relacionadas con la conservación, restauración y mejora de la gestión de la tierra y los ecosistemas para aumentar la captura y almacenamiento de carbono y reducir la emisión de gases de efecto invernadero en Estados Unidos. Ejemplos de estas medidas son la restauración de tierras de cultivo en pastizales, bosques y humedales; la disminución de la producción maderera; y la reforestación en áreas urbanas y bosques nativos degradados, entre otras. De acuerdo con estos autores, dichas medidas pueden proporcionar una reducción máxima del 21% de las emisiones de Estados Unidos —esto equivale a 1.100 $TgCO_2e$ $año^{-1}$, utilizando el año 2016 como base de referencia y un costo de USD 100 por $MgCO_2e$—, proveniente principalmente del aumento de la retención de carbono en la biomasa vegetal y en los suelos. Además, podrían proporcionar importantes beneficios colaterales, como el suministro de agua, el control de la erosión, la prevención de la proliferación de algas tóxicas y los fenómenos de hipoxia o «zonas muertas» en las zonas costeras asociados a la escorrentía de nutrientes procedentes de la agricultura, entre otros. Para el caso de Chile, Griscom et al. (2017) señalan un potencial máximo de 41,56 $TgCO_2e$ $año^{-1}$, en que la mayor contribución proviene de acciones de reforestación (36,32 $TgCO_2e$ $año^{-1}$). Este análisis sugiere que las SBN podrían ser un gran apoyo a la meta de carbono neutralidad al 2050, cuya brecha es alrededor de 46 $TgCO_2e$ $año^{-1}$, y sin duda ameritan estudios específicos a escala del país.

El almacenamiento y secuestro de carbono se extiende mucho más allá de los bosques y es especialmente importante en las turberas, praderas naturales, manglares y humedales y en sedimentos marinos costeros, donde subyacen ecosistemas como pastos marinos, manglares y bosques de macroalgas, entre otros. Por ello, la protección, restauración y manejo de estos ecosistemas es una prioridad mundial. De hecho, Naciones Unidas declaró en marzo de 2021 a la década del 2021-2030 como la «Década de la

Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas», mientras que el Bonn Challenge se ha propuesto la meta de restaurar 150 millones de hectáreas al 2020 y 350 millones al 2030, con el objetivo de «restaurar la integridad ecológica y al mismo tiempo mejorar el bienestar humano a través de paisajes multifuncionales».[1]

Idealmente, las SBN debieran llegar a ser la manera común de accionar de los distintos sectores productivos y del habitar humano, a fin de asegurar la recuperación de la estructura, composición y función de los ecosistemas y, por lo tanto, su biodiversidad en todas las escalas, e integrando paisajes en los que los distintos usos de suelo se conectan y coexisten, para potenciar la resiliencia de los ecosistemas y los beneficios de la naturaleza hacia las personas frente al cambio climático. Esta visión integra la restauración de ecosistemas naturales y suelos degradados; la protección de cuencas para proveer de agua a las comunidades y los ecosistemas; y la conservación de turberas, entre otros, lo que generará mayores y mejores beneficios sociales en los contextos de mitigación y adaptación al cambio climático. Es importante integrar dentro de estos paisajes a las zonas protegidas, que representan una SBN y entregan variadas contribuciones a las comunidades, como la reducción de riesgos de desastres, beneficios económicos del turismo, el aseguramiento de la calidad y el aprovechamiento del agua, y el secuestro y almacenamiento efectivo del CO_2 en árboles y suelos.

En la evaluación acerca del potencial de las SBN en Chile (Marquet et al., 2021a) se analizan los humedales artificiales, para concluir que, bien manejados, pueden efectivamente capturar carbono en sedimentos, proveer hábitat para la flora y fauna nativa y sobre todo pueden afectar positivamente el bienestar de las personas para proveer de una manera eficaz métodos de tratamiento de aguas grises. A pesar de la necesidad de ciertas disposiciones legales que impiden su utilización en algunas actividades, estos humedales son de gran importancia para hacer frente a la crisis hídrica que enfrenta el país, y muestran que las SBN son complementarias a soluciones grises como la construcción de embalses, entre otras.

La adopción de SBN implican varios desafíos, como el medir su potencial de mitigación, adaptación y cobeneficios; evaluar su costo-efectividad; y luego, en la fase de implementación, diseñar métricas verificables y monitoreables para medir si las SBN están cumpliendo con sus objetivos y metas en todas sus dimensiones. En este contexto, es importante que cada SBN cuente con una línea base de biodiversidad y servicios ecosistémicos asociados, en el contexto de una evaluación nacional sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos, la que debe incluir también aspectos sociales.

Tradicionalmente, las SBN se han evaluado en sectores asociados a bosques, la agricultura, la ganadería y los pastizales, las ciudades y los humedales, y con menor énfasis en el ambiente marino y la criósfera. En lo que sigue, analizaremos en general las SBN en estos seis sectores, con énfasis en aquellas SBN con mayor potencial de mitigación y adaptación para el país, donde Chile tiene una ventaja comparativa.

El análisis se ha estructurado, cuando se tiene la información, partiendo por una breve descripción de antecedentes de la SBN, seguido de su potencial de mitigación, cobeneficios, brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología, propuestas de metas o indicadores, vinculaciones con sectores productivos y políticas y evaluación económica, para terminar con recomendaciones y próximos pasos.

1 Véase «About the Challenge», Restore our Future Foundation, www.bonnchallenge.org/about.

2. Bosques

2.1. Antecedentes

Entre las SBN más importantes a nivel mundial están aquellas relacionadas con la protección, la restauración y el manejo de ecosistemas boscosos. Es importante recalcar que las SBN por definición no deben limitarse solo a la captura y secuestro de carbono, sino que deben tener *cobeneficios para la biodiversidad* (**tabla 1**).

En general, la captura en ecosistemas forestales se puede potenciar por distintos mecanismos, como la aforestación, la reforestación y la restauración. Por *aforestación* se entiende, de acuerdo con los lineamientos del IPCC, a la acción de plantar árboles en áreas donde no estaban históricamente presentes. Como práctica no es considerada una SBN, pues tiene impactos negativos importantes sobre la biodiversidad local y el ciclo del agua (véase Griscom et al., 2017; Fargione et al., 2018, IPBES, 2019; Seddon, 2020). Siguiendo nuevamente los lineamientos del IPCC (2019a), por *reforestación* se entiende el recuperar la cobertura de bosques nativos degradados (Vergara Asenjo et al., 2019) en zonas originalmente con bosques que han sido deforestadas.

Por último, la *restauración* es un concepto más amplio e implica recuperar un ecosistema y sus funciones asociadas, con el fin de que este sea autosustentable en el largo plazo. De acuerdo con la Sociedad para la Ecología de la Restauración, la restauración ecológica se define como «el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema natural que ha sido degradado, dañado o destruido».[2] Se entiende que un ecosistema ha sido restaurado cuando es capaz de sostenerse tanto funcional como estructuralmente, esto es, cuando posee tanto los componentes como las funciones esenciales para mantenerse en el tiempo, además de la resiliencia ante los rangos naturales de variación en el medio biótico y abiótico —es decir, soportar condiciones naturales de estrés y perturbaciones—; por ejemplo, la capacidad de proveer agua a pesar de una sequía moderada. La restauración requiere de acciones como remoción de especies exóticas y reintroducción de especies nativas, así como de acciones de reforestación, para recuperar cobertura vegetal y promover la recuperación y formación de suelo, entre otras. La restauración es quizá la opción más completa, por cuanto va más allá de plantar especies vegetales para potenciar la captura y el secuestro de carbono, incluyendo restaurar las funciones del ecosistema, su biodiversidad y ciclos biogeoquímicos asociados. En particular, la restauración de los suelos es fundamental, en especial si consideramos que el reservorio de carbono en los primeros dos metros de suelo puede llegar a ser el triple del que está presente en la atmósfera (~3.000 Gt C frente a ~830 Gt C). Proteger los suelos contra la erosión y potenciar el almacenamiento de carbono son estrategias claves para mitigar el calentamiento global (Paustian et al., 2016).

2 «What is Ecological Restoration?», Society for Ecological Restoration, https://www.ser-rrc.org/what-is-ecological-restoration/.

Tabla 1.
Cobeneficios de las SBN basadas en bosques

Soluciones	Biodiversidad (alfa, beta, gamma)	Agua (filtración, control de inundaciones)	Suelo (enriquecimiento)	Aire (filtración)
Bosques				
Evitar la conversión forestal	Los resultados indican el valor irreemplazable de los bosques primarios continuos para la conservación de la biodiversidad.	Mejora de la disponibilidad de agua para el riego de los cultivos, y la mitigación de la sequía, la prevención de la sedimentación y la regulación del agua para las represas hidroeléctricas.	Retención de agua y regulación del flujo. Mantiene las propiedades biológicas y físicas del suelo asegurando la salud y la productividad de los bosques.	Beneficios de la reforestación para la disminución del ozono. Múltiples estudios de modelización describen los beneficios para la salud de la filtración del aire por los bosques.
Reforestación	Las plantaciones de árboles pueden crear corredores de vida silvestre y zonas de amortiguación que mejoren la conservación biológica.	Mejora de la disponibilidad de agua para el riego de los cultivos, la mitigación de la sequía, la prevención de la sedimentación y la regulación del agua para las represas hidroeléctricas.	Aumento medido de la fauna del suelo en los sitios reforestados. Durante las condiciones de sequía, las lombrices de tierra solo sobrevivieron en las zonas reforestadas.	Beneficios de la reforestación para la reducción de la capa de ozono. Múltiples estudios de modelización describen los beneficios para la salud de la filtración del aire por los bosques.
Manejo de bosques naturales	La riqueza de especies de invertebrados, anfibios y mamíferos disminuye a medida que aumenta la intensidad de la tala.	La cosecha que elimina grandes proporciones de biomasa aumenta los flujos de agua y las inundaciones, alterando así la integridad de los ecosistemas de agua dulce.	La recolección de madera que elimina grandes cantidades de desechos leñosos reduce las propiedades biológicas y físicas del suelo, con lo que disminuye la salud y la productividad.	
Mejoras a las plantaciones	Las plantaciones forestales que consideran el tipo de comunidad, como policultivos sobre monocultivos, nativos sobre exóticos, replicación de patrones de perturbación, rotaciones más largas y raleo temprano, pueden reducir su impacto e incluso mejorar la biodiversidad.			

Manejo del fuego	Un manejo de los incendios que imite los regímenes históricos naturales de los incendios puede mejorar la biodiversidad forestal. En el caso de Chile, no existe un régimen natural de incendios, sino que la mayoría son provocados por acción humana.	Los bosques que sobreviven a los incendios (es decir, la reducción de los incendios catastróficos) contienen más materia orgánica, las propiedades del suelo mejoran y los períodos de recuperación más cortos mejoran la infiltración y la retención del agua.	Los bosques que sobreviven a los incendios (es decir, la reducción de los incendios catastróficos) contienen más materia orgánica, las propiedades del suelo mejoran y los períodos de recuperación más cortos mejoran la infiltración y la retención del agua.	Posibilidad de pequeños aumentos de la mortalidad debido a aumentos abruptos y drásticos de las concentraciones de materia particulada procedentes del humo de los incendios forestales.
Evitar la recolección de leña	La recolección de leña reduce el material saproxílico utilizado como alimento y hábitat para los organismos y la fauna de los bosques.	Limitar la compactación del suelo durante la recolección de leña reduce la erosión y aumenta la retención de agua en los bosques.	La cosecha de madera para combustible causa la compactación del suelo y una perturbación que puede cambiar las propiedades químicas del suelo.	Las cocinas más eficientes mejoran la calidad del aire interior y reducen la tasas de mortalidad y las enfermedades.

Fuente: Griscom et al. (2017). Las celdas en blanco indican casos en los que no identificamos pruebas claras de servicios de los ecosistemas mejorados.

2.2. Restauración y reforestación de ecosistemas forestales

Definición

De acuerdo con Griscom et al. (2017) y en el contexto de las SBN, podemos entender por *reforestación* la captura adicional de carbono generada a través del manejo que permita recuperar bosques degradados (*sensu* Vergara et al., 2019), además de la conversión de zonas no forestadas en zonas forestadas en áreas donde el bosque nativo es el tipo de cobertura original.

Potencial de mitigación

Los bosques son el sector con mayor potencial de mitigación en Chile, ya que es el único que captura continuamente CO_2, representando el –37% del balance de emisiones de GEI en 2016 (–65.492 TgCO2e), y porque es posible potenciar aún más esta capacidad. Cabe destacar que –69.646 TgCO2e corresponden a lo que los lineamientos del IPCC denominan tierra forestal (4.A) que incluye «las emisiones y absorciones de GEI generadas como resultado de cambios en la biomasa, materia orgánica muerta y carbono del suelo en tierras forestales que permanecen como tales y en tierras convertidas en tierras forestales» (MMA, 2018: 79). De este total de balance, –81.194 TgCO2e corresponden a aportes del bosque nativo en forma de biomasa nueva, de los cuales cerca del 60% corresponden a la biomasa de bosques secundarios (renovales) (**tabla 2**), 15% a bosque nativo bajo planes de manejo, como se define en la ley de bosque nativo, y 25% a biomasa generada en bosques dentro de parques nacionales y reservas.

Tabla 2.
Emisiones y capturas asociadas al sector de bosque nativo relacionadas con las SBN

Origen	$TgCO_2$
Crecimiento secundario (renovales)	−48.536
Parques nacionales y reservas	−20.189
Bosques nativos bajo plan de manejo	−12.47
Total bosque nativo	**−81.19**
Leña	9.4
Fuego	1.4
Restauración del bosque	−1.1487
Humedales	0
Conversión de humedales	−0.0126

Fuente: INGEI (2018).

El informe de Odepa & Infor (2010) señala que de las 4,3 Mha de bosque nativo entre las regiones del Maule y Magallanes, 3,076 Mha podrían ser utilizadas para actividades de manejo, según lo considerado en la ley de bosque nativo. De esta cifra, 762.611 ha cumplen con los criterios de altura para asegurar las intervenciones (>20 m); de ellas, 533.214 ha podrían ser intervenidas sustentablemente en un horizonte de 20 años, y si 464.609 ha se destinan a la reforestación en lugar de la producción de bioenergía —a través del enriquecimiento y el cercado del ganado—, entonces el secuestro máximo previsto en un período de 20 años sería de 39,91 $MtCO_2e$ (a una tasa promedio de 4,3 tCO_2 ha^{-1} $año^{-1}$, o 2 $TgCO_2$ $año^{-1}$), aumentando a 124,98 $MtCO_2e$ en 30 años (a una tasa media de 8,97 tCO2 ha^{-1} $año^{-1}$ o 4,2 $TgCO_2$ $año^{-1}$). La diferencia se atribuye al hecho de que las especies forestales nativas evaluadas crecen a un ritmo mayor después de 20 años. Si bien este estudio debe actualizarse, por el momento proporciona un buen punto de referencia para esta vía.

Por otro lado, el Núcleo Transdisciplinario en Estrategias Socio-Ecológicas para la Sostenibilidad de los Bosques Australes (TESES) de la Universidad Austral (TESES, 2020) identifica superficies potenciales de bosque nativo para el incremento del secuestro de carbono entre las regiones del Maule y Los Lagos. En este territorio de identifican 1.718.867 ha susceptibles de ser reforestadas y que en su conjunto capturarían 20.651.574 toneladas de CO_2 al año; 1.231.439 hectáreas de bosques degradados, que capturarían 18.914.953 toneladas de CO_2 al año, y otras 653.726 hectáreas de bosques manejables, que capturarían 10.585.885 toneladas de CO_2 al año. Sin embargo, estas estimaciones incluyen actividades de aforestación que no se consideran como SBN, por lo que debieran ser ajustadas.

En total, el trabajo de Marquet et al. (2021a) estima que las SBN del sector forestal —lo que incluye un mejoramiento en la gestión de las plantaciones a través de un incremento en la longitud de las rotaciones forestales ya existentes— podría llegar a aproximadamente 36 $TgCO_2$ adicionales a los que ya captura, principalmente a través del manejo del fuego, recolección de leña, evitar la degradación y la deforestación y potenciar la reforestación.

Cobeneficios

Por *cobeneficios* se entienden aquellos impactos positivos sobre la biodiversidad, los suelos, la calidad del aire y el agua y las personas que puede brindar una SBN, además de promover la mitigación y adaptación ante el cambio climático. Evitar la deforestación y promover la conservación y restauración de los bosques nativos en zonas donde esto sea posible —incluso en zonas urbanas— son acciones críticas para combatir el calentamiento global y aminorar la crisis de extinción que afecta a la biodiversidad mundial (por ejemplo, IPBES, 2019), ya que proveen hábitats y recursos para una gran variedad de especies. De la misma manera, los bosques nativos adecuadamente conservados son fundamentales para el ciclo del agua, al potenciar la recarga y asegurar la sustentabilidad del servicio de provisión de agua. Su reemplazo por otros usos de la tierra (agrícola, forestal o praderas) puede generar grandes alteraciones (por ejemplo, Jones et al., 2016; Becerra-Rodas et al., 2019; Lara et al., 2019; Marquet et al., 2019b). De manera similar, los bosques proveen una serie de beneficios para las personas, como la provisión de agua y alimento, la contención de inundaciones y la mejora la calidad de aire, además de potenciar la captura de carbono en el suelo, aminorar las temperaturas extremas y entregar una serie de beneficios culturales.

Brechas de conocimiento, tecnología y gobernanza

Existen importantes brechas de conocimiento respecto de la restauración de especies y ecosistemas forestales en Chile. Estas tienen que ver con condiciones de regeneración de especies y su rol en procesos ecosistémicos, debido a la falta de estudios de largo plazo (véase Marquet et al., 2019b). Por otro lado, existen importantes brechas en relación con la capacidad de los bosques

nativos de capturar carbono durante el ciclo anual y a través de estados sucesionales, por lo que se hace necesario contar con una red de torres de flujo (*eddy flux towers*) para medir el ciclo del carbono en los bosques (por ejemplo, Perez-Quezada et al. 2018). Finalmente, es necesario potenciar la investigación en los impactos que tendrá el cambio climático sobre la dinámica de los ecosistemas de bosques y su capacidad para capturar carbono, entre otros servicios.

El principal marco regulatorio de actividades de manejo, reforestación y restauración de bosques nativos es la Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal (Ley 20.283), la que presenta una serie de deficiencias. Por un lado, es importante incluir definiciones conceptuales y métricas asociadas a la degradación forestal, la reforestación y la restauración, y tratar ambos temas en los reglamentos. La falta de definición y métricas no permite avanzar y aplicar la ley. Por otro lado, esta ley contempla incentivos para los pequeños y medianos propietarios. Sin embargo, como se señala en Marquet et al. (2019b, 2021a), los mecanismos de financiamiento para que los pequeños propietarios realmente manejen, restauren y conserven sus bosques nativos son complicados, y los montos no cubren los costos reales y de oportunidad de la conservación, lo que explica la falta de éxito. De hecho, en 2013, esta ley fue evaluada por el Gobierno chileno (Dipres, 2013) con resultados poco alentadores, pues, según el informe,

> *el programa ha logrado resultados marginales considerando las metas, ya que en el período 2009-2012 las áreas de bosque nativo bajo manejo han aumentado desde 0,13% hasta 0,25% de las áreas potenciales* (*9,5 millones de hectáreas*). *Esto no es un indicio de que el programa no esté funcionando, ya que, como resultado de los esfuerzos institucionales, el área de bosques manejados aumentó de 11.984 hectáreas en 2009 a 23.555 hectáreas en 2012.*

Hasta la fecha no se ha publicado ninguna otra evaluación de este programa, que sigue en marcha.

Por otro lado, Manuschevich & Bier (2016) simularon las implicaciones de uso de la tierra de diferentes propuestas de política que surgieron en el debate de la ley de bosque nativo de Chile, con el fin de evaluar qué tan efectivas serían las políticas de la ley en términos de «proteger, recuperar y mejorar los bosques nativos, con el fin de asegurar la sostenibilidad forestal y la política ambiental». Estos autores llegaron a la conclusión de que es necesario aumentar los pagos de incentivos y reducir los costos de transacción para mejorar la conservación y la restauración de los bosques en Chile. El mejoramiento de esta ley es urgente si queremos alcanzar los compromisos de mitigación que ha asumido el país; lo mismo con el establecimiento de programas de investigación centrados en una caracterización profunda del ciclo del carbono y del agua en los bosques nativos del país, para cerrar una brecha de conocimiento que es fundamental para la toma de decisiones.

Por otro lado, en 2015 se formó el Consejo Forestal, el cual propuso la Política Forestal 2015-2035. Entre los ejes estratégicos de esta propuesta de política está la protección y restauración del patrimonio forestal, y en particular el objetivo de restaurar el patrimonio forestal afectado por catástrofes e intervenciones antrópicas, sobre todo asociadas a incendios, erupciones volcánicas y aluviones. En este contexto, se propuso como meta al 2025 haber restaurado «200.000 ha con nueva cobertura arbórea y arbustiva, principalmente con especies nativas, en áreas prioritarias determinadas por el Servicio Forestal del Estado». También está el objetivo de manejar el bosque nativo con fines de protección y conservación con la meta de que, al 2025, «una superficie del orden de 450.000 ha de bosques nativos se encuentra incorporada a manejo con fines de protección y conservación, bajo los criterios descritos en el objetivo de impacto», y que «al menos 200.000 ha de bosques nativos se han incorporado plenamente a manejo con fines de protección y conservación».

Las acciones de reforestación y restauración requieren contar con invernaderos, adecuada provisión de semillas y el conocimiento para potenciar su germinación y establecimiento en condiciones de terreno (por ejemplo, Bannister et al., 2018; León-Lobos et al., 2020). Estos y otros cuellos de botella asociados a la disponibilidad de recursos humanos calificados representan importantes desafíos tecnológicos que pueden alargar los tiempos de implementación de estas acciones.

Indicadores y metas propuestas

Los indicadores para esta SBN tienen que ver con la extensión en superficie donde se aplicará cada una de las soluciones del sector forestal. Por ejemplo, para el caso de la reforestación y restauración, se sugiere duplicar en los próximos diez años la superficie a reforestar con bosque nativo bajo la actual NDC, hasta llegar a una meta de 500.000 ha, con la meta de que al menos el 30% se logre en zonas asociadas a cursos de agua, aumentando el cinturón de vegetación a un mínimo de 30 m (Becerra-Rodas et al., 2019). Para lograr estos objetivos, también se deben considerar metas intermedias o habilitantes, como la necesidad de contar con un análisis sobre dónde restaurar, por lo que la cantidad de hectáreas priorizadas y zonificadas para fomentar la restauración podría ser un indicador importante, lo mismo que la cantidad de recursos entregados por el Ministerio de Agricultura a través de fondos concursables para la producción de especies nativas necesarias para restaurar.

Por otro lado, los beneficios a la biodiversidad se pueden medir a través de un registro del número y cantidad de hábitats restaurados y las especies que viven en ellos (véase Marquet et al., 2021b). Los beneficios a la seguridad hídrica se pueden medir a través de la escorrentía de los suelos boscosos recuperados, de acuerdo con los cálculos de Álvarez-Garretón et al. (2019), en tanto que los beneficios a la seguridad alimentaria se pueden medir a través de la contabilización de las hectáreas de bosques nativos que proveen alimentos cerca de asentamientos humanos.

Horizonte temporal de implementación de metas

Esta es una SBN cuya implementación puede ser compleja. Por ejemplo, las acciones de reforestación y restauración pueden estar sujetas a diversos obstáculos, desde la disponibilidad de semillas, o la capacidad de generar un número adecuado de plántulas en viveros, hasta la disponibilidad de mano de obra para labores de despeje, la remoción de especies exóticas, la protección de las plántulas de herbívoros introducidos, la disponibilidad de agua, el plantado y posterior monitoreo, además de necesidad de identificar sitios adecuados para labores de reforestación y su disponibilidad. Una vez que estas barreras hayan sido superadas —lo cual afecta el tiempo de implementación probablemente en al menos un par de años—, la reforestación se puede iniciar; pero sus efectos no son inmediatos, sino que acumulativos en un horizonte de al menos 20 a 30 años, a lo largo de los cuales se potenciará la captura en forma acumulativa. Al respecto, existe un trabajo pionero publicado por Odepa & Infor (2010), el cual evalúa el potencial de captura de acciones de mitigación a horizontes de veinte y treinta años. Para el caso de acciones asociadas, por ejemplo, a evitar la degradación y el manejo del fuego, el horizonte de implementación puede ser significativamente más corto y su impacto casi instantáneo.

Evaluación económica

Odepa & Infor (2010) fue un primer intento de estimar el costo de la implementación de las actividades de gestión y manejo para fomentar la captura de CO_2, incluidas las plantaciones suplementarias con especies nativas, la remoción de la biomasa muerta y la colocación de cercas para evitar la herbivoría del ganado: el coste estimado fue de USD 620,88 ha^{-1}. Esta estimación podría ser actualizada por Infor, ya que esta institución dispone de datos para estimar los costes de implementación, los costes de oportunidad y la cantidad de carbono secuestrado por las diferentes actividades de gestión forestal.

Del mismo modo, Birch et al. (2010) exploraron el potencial económico de un cambio en el uso de la tierra de pastoreo de ganado a bosque nativo restaurado utilizando diferentes tasas de descuento, y llevaron a cabo un análisis de costo-beneficio considerando la provisión de diferentes servicios ecosistémicos, incluyendo el secuestro de carbono, mediante el uso de un simulador forestal espacialmente explícito. Estos autores evalúan la rentabilidad de actividades de restauración activa en la zona de Valparaíso, y estiman el «beneficio social neto» de la restauración o el cambio neto en el valor de los servicios ecosistémicos asociados al cambio en la cobertura del suelo, menos los costes asociados a la reforestación, para llegar a un valor de USD 725 ha^{-1} $año^{-1}$.

Más recientemente, Schlegel et al. (2020) evaluó costos asociados a las actividades de restauración. El cálculo indica que, para el caso de bosques jóvenes del tipo forestal siempreverde, los costos alcanzan USD 3.776 ha^{-1}, de los cuales alrededor de 3.500 son por una sola vez, mientras que USD 196 ha^{-1} corresponden a costos de mantención anuales.

Relación con instrumentos de política pública

Tal como se mencionó en la sección asociada a brechas de gobernanza, las actividades de reforestación y restauración se consideran en distintas iniciativas y cuerpos legales, como la Ley 20.283 de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, la Política Forestal 2015-2035 y otros instrumentos más sectoriales, como la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales 2017-2025 (ENCCRV), todos los cuales consideran acciones de reforestación y restauración de ecosistemas forestales con bosques nativos y con los cuales se pueden generar importantes sinergias.

La reforestación y restauración de ecosistemas boscosos, y los cuerpos legales y otras iniciativas que los promueven, chocan con otros instrumentos de política pública, como el Programa de Suelos Degradados (SIRSD), que es un instrumento de fomento del Ministerio de Agricultura establecido por la Ley 20.412 de 2010 y cuyo objetivo es recuperar el potencial productivo de los suelos agropecuarios degradados y que desincentiva actividades de restauración de suelos agropecuarios que poseían cubierta forestal nativa en el pasado. A este respecto, es importante alinear los beneficios de la ley del bosque nativo con los del programa SIRSD, para dar opciones a la reforestación y restauración del bosque nativo.

Próximos pasos y recomendaciones

Existe una serie de acciones de orden legislativo que es importante impulsar. Por ejemplo, una modificación de la Ley 20.283 y la Ley 20.412. Otra acción importante es fomentar la investigación sobre el ciclo del carbono en los bosques y el impacto del cambio climático en su capacidad de captura y secuestro de carbono. Por último, las brechas tecnológicas pueden generar un retraso importante en la reforestación, por lo que es una prioridad el contar con un suministro adecuado de semillas y plántulas, así como invernaderos certificados para la restauración y reforestación del bosque nativo.

2.3. Manejo del fuego

Definición

Conjunto de estrategias transversales de prevención y control de incendios, que incluya al Estado, empresas y organizaciones ciudadanas.

Antecedentes

El fuego exige una mención especial, ya que solo en 2017 se quemaron más de 570.000 ha, incluidas tierras forestales, tierras de cultivo y pastizales, y su control demandó un gasto de más de USD 350 millones, además de producir emisiones de CO_2e muy significativas (González et al., 2020) estimadas en 57.406 kt CO_2e, más de lo que emitieron el sector transporte terrestre y la generación eléctrica en conjunto el mismo año.

Los incendios forestales son capaces de alterar cualquier tendencia en emisiones, sobre todo si se presentan eventos extremos como el del 2017 —pero también, aunque con menor intensidad, en 1998, 1999, 2002, 2014 y 2015—. Como señala Marquet et al. (2021a), estas cifras sitúan al control del fuego como una de las SBN más importantes. De hecho, según Astorga y Burschel (2019), entre 2003 y 2017 se quemó una superficie total de 1.427.000 ha, con un promedio de 95.000 ha por año, de las cuales cerca de 50.000 ha eran de bosque nativo.

Potencial de mitigación

En general, una hectárea quemada genera en promedio 181,05 tCO_2e, por lo que si se logra ejercer un manejo efectivo de los incendios que permita reducir el número de hectáreas al promedio entre 2003 y 2017 (50.000 ha de bosque nativo), y asumiendo que este pudiera duplicarse, se mitigarían en promedio unas 9,05 $TgCO_2e$ (Marquet et al., 2021a). En este contexto, es fundamental el desarrollo y fortalecimiento de estrategias transversales de control y prevención de incendios que incluyan al Estado, a las empresas y a las organizaciones ciudadanas.

Cobeneficios

Al igual que la SBN asociada a restauración y reforestación, el manejo del fuego provee una amplia gama de cobeneficios.

En primer lugar, beneficios a la biodiversidad, ya que la reducción en el número de hectáreas de bosque nativo quemadas implica la mantención de ecosistemas que en muchos casos son únicos. Por ejemplo, Carvajal y Alaniz (2019) señalan que durante los últimos 18 años, más del 50% de los fuegos han ocurrido en fragmentos remanentes del bosque costero y otros ecosistemas amenazados y con bajo nivel de representatividad en el Sistema Nacional Áreas Protegidas del Estado. Estas pérdidas directas de biodiversidad y hábitats se suman a la pérdida en la productividad de los suelos y sus contenidos de carbono y nitrógeno.

Por otro lado, los fuegos afectan negativamente la calidad del agua y el aire, generando material particulado que puede tener impactos negativos en la salud de las personas y de especies que vivan en esos ecosistemas forestales.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Existe una serie de brechas de conocimiento, empezando por los cambios que induce el fuego en la densidad y área basal de los bosques, o cómo el fuego afecta el ciclo de vida de la descomposición de la madera (es decir, emisión de gases). Desconocemos también las respuestas de la vegetación y del combustible tras los incendios, y los procesos de retroalimentación que podrían existir. Finalmente desconocemos las variables socioecológicas que se asocian a la existencia de focos de incendios y que podrían ayudar en su prevención.

En el contexto de la gobernanza, se pueden identificar brechas como la necesidad de fortalecer la institucionalidad existente en la prevención de incendios, el financiamiento adecuado de brigadas y su apoyo tecnológico; apresurar la ley que crea el Servicio Forestal y potencia la dedicación de Conaf a la prevención de incendios; generar acciones que permitan una mayor articulación de esfuerzos públicos y privados; impedir, por medio de una ley, el cambio de uso de suelo después de los incendios, ya que esto incentiva el reemplazo del bosque nativo por otros usos; y potenciar la «silvicultura preventiva» en los planes de manejo, en relación a la capacidad de fiscalización y seguimiento. También se debe incluir la prevención y el control de los incendios en una futura ley de suelos.

Es importante avanzar en la adopción o generación de tecnologías que permitan monitorear en tiempo real la ocurrencia de incendios. Por otro lado, se deben generar buenos modelos que permitan identificar zonas de riesgo, a fin de focalizar la prevención y generar modelos que permitan entender el comportamiento del fuego en los bosques de Chile bajo distintas condiciones meteorológicas, de modo de poder predecir su severidad y comportamiento. También hay que avanzar en tecnologías que permitan cortar el suministro de electricidad en las líneas de tendidos eléctricos durante eventos de incendios, junto con la fiscalización de su aplicación.

Indicadores y metas propuestas

Los indicadores asociados a esta SBN pueden ser muy variados. Por ejemplo: i) superficie (hectáreas) quemadas; ii) número de incendios; iii) superficie de bosques afectada por incendios; iv) superficie con recurrencia (requema o incendios con solape espacial) por año; o v) severidad o intensidad, lo que se correlaciona con el efecto ecológico de un incendio. Para el caso del manejo del fuego, se sugiere como meta el mantener la cantidad de hectáreas de bosque nativo afectadas por debajo del promedio histórico (2003-2017) de 50.000 ha. Si se evitara que este promedio se duplique, se estaría mitigando alrededor de 9 $TgCO_2e$ (Marquet et al., 2021). Otro indicador importante es contar dentro de los próximos 3 a 5 años con un buen modelo predictor de riesgo de incendios, y con tecnologías de detección y logística que permitan una respuesta temprana, así como la confección de un diagnóstico multisectorial de los impactos de los incendios en la salud, el sector silvoagropecuario, la biodiversidad, la pobreza y el cambio climático, con una estimación de los costos de implementar esta SBN.

Horizonte temporal de implementación de metas

Esta SBN puede tener una rápida implementación, pero requiere asegurar recursos para la prevención y control, con campañas que sean holísticas e incluyan la educación de las personas, ya que en Chile los incendios son en general producidos por el hombre.

Próximos pasos

El próximo paso sería avanzar en la implementación de metas e indicadores asociados a esta SBN, para poder incluir acciones concretas en la ECLP y las próximas NDC, además de generar evaluaciones económicas del impacto que representan los incendios forestales en Chile.

2.4. Otras SBN del sector forestal

Hay que destacar que existen diferencias sustanciales en la captura y secuestro de CO_2 si comparamos el bosque nativo con especies forestales exóticas, sobre todo con aquellas destinadas a productos de vida corta (producción de celulosa, papel), los que liberarán en un corto tiempo el carbono capturado. Las especies nativas, además, proveen de mayores cobeneficios para la naturaleza y las personas (ver capítulos de ecosistemas y uso de suelo en Marquet et al., 2019b).

Sin embargo, existe una serie de acciones que podrían hacer que las plantaciones potencien su capacidad de contribuir a la captura y reduzcan sus efectos negativos sobre el ciclo del agua y la biodiversidad. Entre ellas están la de aumentar el tiempo de rotación de las plantaciones ya existentes, generar plantaciones mixtas, potenciar el uso de especies nativas y generar paisajes heterogéneos o agroforestales para impedir la propagación de perturbaciones como plagas e incendios.

Es de suma importancia enfrentar el problema del uso de la leña como principal energético en las viviendas, sobre todo en la zona centro sur de Chile. Esto requiere implementar medidas como subsidios y cambios tecnológicos, y tener una mirada holística e integrativa del fenómeno, abordando las barreras socioculturales para la conversión de uso de leña a otros combustibles menos contaminantes. Lo anterior debe ir asociado a un programa de mejoramiento en el aislamiento energético de las viviendas. Reducir el uso de leña tiene un impacto positivo en la biodiversidad y en la captura de carbono en los bosques, además de enormes beneficios sociales y en la salud de las personas. De acuerdo con Marquet et al. (2021a), el potencial de mitigación de esta SBN asciende a 8 $TgCO_2e$.

3. Agricultura

3.1. Antecedentes

Considerando que a nivel global el sector de la agricultura, silvicultura y otros usos de suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) contribuyen cerca del 23% de las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019b), reducir emisiones de este sector es clave para lograr la carbono neutralidad y mantener la seguridad alimentaria.

En el caso de Chile, el sector agricultura representa aproximadamente el 7% de las emisiones (**tabla 3**) (INGEI, 2018). Aunque el aporte es relativamente menor, el sector es muy vulnerable al cambio climático, ya que Chile tiene una alta tasa de tierras degradadas, algunas por desertificación —definida como degradación de la tierra en áreas áridas y semiáridas, según la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación—, y el sector es el mayor usuario de agua del país (Aitken et al., 2016). Procesos asociados a la desertificación, como la erosión del suelo, la salinización secundaria y el sobrepastoreo tienen un impacto negativo en el suministro de servicios ecosistémicos en tierras áridas, en particular en la producción de alimentos y de forrajes. Otros impactos incluyen la disminución de productividad primaria y el aumento de la erosión del suelo por viento, además de una disminución del secuestro de carbono en la tierra. Junto con estos impactos biofísicos y ecosistémicos, existe amplia evidencia de que la manera en que se practica la actividad agrícola tiene impactos sobre la seguridad hídrica y otros aspectos socioeconómicos, incluidos la desigualdad de género y la migración (IPCC, 2019b: cap. 3).

Debido a todos estos antecedentes, es importante promover SBN en el sector agrícola para mitigar y adaptarse al cambio climático. A continuación, se describen brevemente cuatro SBN relevantes para Chile. En términos generales, todas las medidas caen, con distintos énfasis, en lo que se conoce como *prácticas agroecológicas*, de *agricultura de la conservación* y de *manejo sustentable de la tierra*. Sus cobeneficios se describen en la **tabla 4**. Las SBN descritas en esta sección son un subgrupo de las evaluadas en la literatura, que creemos tienen mayor potencial en el caso de Chile.

Tabla 3.
Emisiones y capturas asociadas al sector agrícola relacionadas con las SBN

Origen	$TgCO_2$
Fermentación entérica	4,682
Gestión del estiércol	2,0221
Suelos agrícolas	4,4836
Aplicación de la urea	0,357
Cultivo de arroz	0,1337
Encalado	0,0884
Conversión de pastizales (tierras de cultivo)	1
Quema de residuos agrícolas	0,0348
Total	**12,8016**

Fuente: INGEI (2018).

Tabla 4
Cobeneficios asociados a la agricultura y pastizales

Soluciones	Biodiversidad (alfa, beta, gamma)	Agua (filtración, control de inundaciones)	Suelo (enriquecimiento)	Aire (filtración)
Agricultura y pastizales				
Evitar la conversión de los pastizales	Hábitat importante para las aves que anidan y se alimentan.	Los pastizales permanentes proporcionan un control de las inundaciones biológicas y mantienen el equilibrio hídrico del ecosistema asegurando recursos hídricos adecuados.	Los macroinvertebrados del suelo son presas importantes para la cría de aves zancudas en los pastizales húmedos de las tierras bajas.	
Biocarbón			La adición de biocarbón mejora la calidad del suelo y la fertilidad en las regiones templadas.	
Manejo de nutrientes de las tierras de cultivo	Aumento de la riqueza y la abundancia de las especies de peces.	Beneficios asociados con la mejora de la calidad del agua potable, más oportunidades de recreación y beneficios para la salud.	Una mejor gestión de los nutrientes mantiene la fertilidad del suelo.	La gestión precisa de los nutrientes del suelo puede reducir las emisiones de amoníaco y óxido nítrico.
Agricultura de conservación		Reduce la demanda de agua para la agricultura con cultivos de cobertura apropiados.	Reduce la erosión del suelo y la redistribución manteniendo la profundidad del suelo y la retención del agua.	
Árboles en zonas de cultivos	La agroforestería proporciona un hábitat para las especies y favorece la conectividad.	Control de la erosión y recarga de agua.	Reducción de la erosión del suelo.	La plantación de árboles ayuda a capturar las partículas del aire y los gases contaminantes.
Pastoreo y manejo de animales				
Intensidad óptima	Un gradiente de pastos intensivos a pastos extensivos reduce la perturbación general de las interacciones entre plantas e insectos.	Casi el 70% del uso del agua para el ganado se produce durante el pastoreo en las granjas. Las prácticas de pastoreo controlado pueden reducir el uso del agua en los pastos controlados.	El sobrepastoreo puede reducir la capacidad de los suelos para atrapar contaminantes y su provocar la liberación y la de otros sedimentos en suspensión.	

Legumbres en los pastos	La presencia de legumbres en la pradera conduce a una mayor diversidad de insectos herbívoros y depredadores.		Las leguminosas prestan otros servicios ecológicos, como la mejora de la estructura del suelo, la protección contra la erosión y una mayor diversidad biológica.	
Alimento mejorado				
Mejoramiento del cultivo de arroz		La alternancia de drenaje húmedo, seco y de media estación de los campos de arroz irrigados reduce la demanda de agua para la agricultura. El uso de aguas grises en la agricultura puede reducir el consumo bruto de agua.		

Fuente: Griscom et al. (2017). Las celdas en blanco indican casos en los que no identificamos pruebas claras de servicios de los ecosistemas mejorados.

3.2. Biocarbón para el manejo de residuos agropecuarios

Definición

Aumento del secuestro de CO_2 en el carbono del suelo mediante la modificación de los suelos agrícolas con biocarbón producido por la conversión de residuos de cultivos en carbono recalcitrante a través de la pirólisis.

Antecedentes

El biocarbón es el carbono obtenido a partir de la pirólisis de materia orgánica (residuos orgánicos) y puede aumentar significativamente el carbono del suelo. Este potencial para secuestrar el carbono depende del suministro de materias primas adecuadas, y ha surgido como una opción para la gestión de los residuos orgánicos que generan altas emisiones de CO_2, además de la contaminación del suelo y el agua. Como señala Marquet et al. (2021a), el biocarbón ofrece una oportunidad para reducir las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero, junto con aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno en suelos. Dado que se produce utilizando residuos orgánicos que son parte importante de las emisiones de CO_2 en los sectores agrícolas y forestales, representa una oportunidad para reducir estas emisiones y la producción de ecofertilizantes y biomasa para producir energía limpia.

Potencial de mitigación

El potencial de mitigación del biocarbón se relaciona con la cantidad de residuo orgánico disponible para la pirólisis. Griscom et al. (2017) calculan un potencial total global de 300 TgCe año^{-1}. Fargione et al. (2020), por otro lado, reportan que el biocarbón tiene un potencial medio de mitigación de 100 $TgCO_2e$ año^{-1} y un máximo de 135 $TgCO_2e$ año^{-1} para el caso de Estados Unidos. Según Lehman (2009), es una opción de secuestro de carbono de bajo costo y alta permanencia, debido a la estabilidad por ser un tipo de carbón casi elemental.

Para el caso de Chile, Marquet et al. (2021a) estiman que la generación y adición en los suelos de biocarbón derivado de residuos de la actividad agrícola asociada a cultivos anuales podría mitigar la emisión de 0,11 $TgCO_2e$ año^{-1}. Sin embargo, es importante considerar que estos valores dependen directamente de la composición de los desechos pirolizados. Si bien el biocarbón muestra gran potencial como SBN, aún no se conoce bien su huella energética, por lo que resulta arriesgado proponerlo como una SBN sin pasar antes por otras enmiendas, como el compostaje de residuos agropecuarios, y sin asegurarse de que efectivamente la tecnología de pirólisis usada asegure la captura neta de carbono. La evidencia disponible al respecto sí señala que la producción de biocarbón permite captura neta (Peters, Iribarren & Dufour, 2015).

Cobeneficios

En general, las SBN en agricultura, además de reducir las emisiones de carbono, amonio, metano y óxido nitroso, tienen el potencial de remediar y mejorar la fertilidad del suelo y, por tanto, la productividad agropecuaria y el secuestro de carbono, promoviendo la biodiversidad, a la vez que mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes y agua. Además, reducen la contaminación y los impactos negativos sobre la biodiversidad de ríos y lagos, como sucede cuando se agrega un exceso de fertilizantes.

Por ejemplo, un biocarbón con alto contenido en nutrientes y una elevada capacidad de intercambio catiónico podría aplicarse a suelos degradados y pobres en nutrientes, ya que permite la retención de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, además del agua. Por otro lado, el biocarbón puede aumentar el pH del suelo, lo que podría ayudar a recuperar los suelos ácidos a los que se les ha añadido un exceso de fertilizantes nitrogenados amoniacales (Marquet et al., 2021a). También funcionan como soporte de bioinoculantes, aprovechan los residuos agrícolas y mejoran la capacidad de retención de humedad, lo que lleva a un mejor aprovechamiento del agua.

Es importante mencionar que las propiedades y tipo de biocarbón dependen de la materia prima usada y el proceso de pirólisis al que es sometido. Una planta de biocarbón también puede generar energía a partir de la biomasa que utiliza, por lo que potencia aún más su capacidad de reducción de emisiones. Por último, se ha estudiado el uso de biocarbón en suelos contaminados con metales y se ha visto su efecto en la disminución de biodisponibilidad, por lo que podría ser una alternativa para la remediación de este tipo de suelos.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Faltan estudios que entreguen información de la captura y calidad de biocarbón, además de su capacidad de secuestrar carbono en el suelo para distintos tipos de residuos y suelos. Sin embargo, existen iniciativas asociadas a la Universidad de Concepción, la Universidad de la Frontera y varios proyectos Fondecyt sobre el tema (véase Marquet et al., 2021a).

Los procedimientos de pirólisis son bien conocidos y existen distintas alternativas tecnológicas disponibles. Habría que seleccionar aquellas que se adapten mejor a las condiciones de cada región del país. No obstante, es importante considerar la logística del transporte y un almacenaje de residuos que permita un flujo adecuado para la planta y no haga que las emisiones netas, al considerar el transporte de los residuos, sean positivas.

Indicadores y metas propuestas

Existen distintos indicadores, como las toneladas de biocarbón producido por año o la capacidad instalada por región del país. Se propone como meta la generación de una planta de biocarbón por macrozona. Sin embargo, esta meta pasa por cerrar ciertas brechas de conocimiento asociadas a la disponibilidad de residuos y la huella energética de este proceso, por lo que la primera meta es cerrar estas brechas. Idealmente, se debieran establecer metas regionales, como, por ejemplo, que el 10% de los predios de una región usen biocarbón, y que se elimine la práctica de quema de residuos vegetales (quemas invernales) por la generación de biocarbón.

Esta SBN también posee beneficios de adaptación que pueden ser medidos a través de un análisis de productividad de los suelos a largo plazo. Para medir los beneficios de prevención de escurrimiento de nutrientes, se puede evaluar la concentración de nitrógeno presente en cuerpos fluviales cercanos al sitio en donde se aplica la SBN. Además, hacer un seguimiento de la demanda biológica de oxígeno en los lagos cercanos a tierras de cultivo puede ser una importante herramienta de monitoreo de los beneficios del biocarbón.

Horizonte temporal de aplicación

Se estima que un horizonte de 10 años permitiría un adecuado desarrollo e implementación de esta tecnología.

Próximos pasos

Se recomienda una evaluación de la capacidad de captura neta de carbono por medio de esta tecnología para despejar potenciales dudas respecto de su uso en Chile. También es posible instalar la solución de biocarbón dentro del ámbito de manejo de residuos, en vista de la incertidumbres actuales, brechas tecnológicas y brechas de conocimiento, como la información sobre las huellas energética y de agua. Al incorporarlo dentro de una meta más amplia, se incentivaría que los productores no quemen residuos y puedan transitar a un manejo sostenible. Por ejemplo, podría haber incentivos para que los agricultores, en vez de quemar los rastrojos, los envíen a una planta de pirólisis o compostaje cercana.

También se sugiere cuantificar la materia prima disponible para generar biocarbón y, sobre eso, ajustar una meta para su utilización.

3.3. Manejo de nutrientes (nitrógeno y fósforo)

Definición

Reducción en las emisiones de óxido nitroso, otro importante GEI, como consecuencia de la reducción del uso de fertilizantes y a la mejora de los métodos de aplicación en las tierras de cultivo. Al reducir la aplicación excesiva de fertilizantes —mejorando el momento, la colocación y la forma de aplicación y haciendo un mayor uso del estiércol—, se puede mejorar en forma significativa la eficiencia sin afectar negativamente a los rendimientos de los cultivos.

Antecedentes

Uno de los nutrientes más importantes para el crecimiento de las plantas es el nitrógeno, el que suele estar limitado en los suelos agrícolas. Casi todos los cultivos utilizan la fertilización nitrogenada, cuya intensidad de uso varía en función del volumen y la composición de los insumos. El óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO) y el amoniaco (NH_3) se emiten como consecuencia del uso de fertilizantes nitrogenados, y su abundancia relativa depende del tipo de cultivo, el tipo de fertilizante utilizado, el contenido de agua del suelo, el pH y las condiciones climáticas, entre otros factores (Erb et al., 2017). Además, la lixiviación de nitrógeno del suelo a cuerpos de agua superficiales o subterráneos, y finalmente al océano costero, afecta la calidad del agua y la biodiversidad de la flora y fauna (Fowler et al., 2013).

En Chile, el uso de fertilizantes se ha incrementado sustancialmente en los últimos años (35% de incremento en el valor de las importaciones de urea en los últimos 10 años), llegando a 169 kTon de nitrógeno en 2014 (González, 2019). Esta, desgraciadamente, es una tendencia mundial.

Potencial de mitigación

El uso de fertilizantes nitrogenados genera emisiones directas e indirectas de alrededor de 1,56 $TgCO_2e$ $año^{-1}$ (INGEI, 2018), e incluye la contribución directa e indirecta del nitrógeno inorgánico y las emisiones de la aplicación de la urea. Esta cifra representa aproximadamente el 13% del total de las emisiones agrícolas en Chile. Un estudio reciente señala que el uso del nitrógeno y fósforo producto de la agricultura supera ampliamente los límites planetarios calculados para Chile (Marquet et al. 2021b). La reducción de la aplicación excesiva de fertilizantes mediante un mayor uso de estiércol, la selección adecuada del momento de aplicación de los nutrientes o la forma y la colocación de la fertilización, puede promover mejoras en la eficiencia sin afectar el rendimiento de los cultivos (Griscom et al., 2017). Existen alternativas tecnológicas para mejorar el uso de las fuentes utilizadas, como el reemplazo de urea por fertilizantes más eficientes ambientalmente o el uso de inhibidores.

Cobeneficios

El manejo de nutrientes posee importantes beneficios para la biodiversidad acuática de ríos, lagos y humedales, los que se pueden ver drásticamente alterados cuando aumenta la carga de nutrientes que les llega. Por otro lado, el manejo de los nutrientes tiene impactos positivos sobre la calidad del agua y suelos (Griscom et al., 2017).

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Es necesario acortar las brechas de información para que la aplicación de nutrientes sea concordante con los requerimientos de cada cultivo. También es importante obtener más información respecto del impacto de los fertilizantes nitrogenados sobre el carbono del suelo y la distribución espacial a nivel de cuenca del uso de fertilizantes.

Sabemos que las importaciones de fertilizantes en Chile son mayores que en la mayoría de los países. Es un mercado que presiona por el sobreuso de los fertilizantes como estrategia por su bajo costo. Hay muchos productores que, a pesar de tener asesoría permanente de profesionales, de igual forma aplican exceso de fertilizantes, por lo que hay que apuntar a un uso racional por parte de los agricultores, quizás con una regulación más estricta en su venta.

Existe una gama importante de tecnologías que podrían adoptarse en Chile para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes. Entre estas tenemos: la gestión del nitrógeno en tiempo real y específica para cada predio, la prueba rápida no destructiva del estado del nitrógeno en las plantas, el diseño de nuevos tipos de fertilizantes de liberación lenta y controlada, la gestión específica de nutrientes para cada predio y el uso de inhibidores de la ureasa y de la nitrificación para disminuir las pérdidas de nitrógeno (véase una revisión en Xiang et al., 2008).

Indicadores y metas propuestas

Potenciales indicadores para esta SBN son: i) la disponibilidad de un atlas de uso de nutrientes a nivel nacional con una gobernanza de datos transparente; ii) el porcentaje de productores que utilizan tecnología de mitigación; iii) la extensión del área agrícola incluida en programas de manejo de nutrientes; y iv) la generación de programas de certificación de uso de nutrientes y calidad de agua, que permitiría generar metas asociadas a la extensión de tierra agrícolas certificadas.

Los beneficios de adaptación pueden ser medidos a través de un análisis de la productividad de los suelos a largo plazo, la eficiencia en el uso de nutrientes (kg producto por kgNPK) y del escurrimiento.

Horizonte temporal de implementación de metas
Se estima que la implementación de indicadores y metas para esta SBN debiera tomar entre cinco y diez años.

Próximos pasos
Respecto al manejo de los nutrientes, se recomienda: i) condicionar los subsidios en programas de fertilización a la presentación de un programa de manejo; ii) generar un mapa de zonificación regional que permita declarar zonas saturadas por nitrógeno, además de poder regular y establecer zonas sensitivas al nitrato —esta no es una meta, sino que es un habilitante para generar una meta—; iii) avanzar hacia un registro de compra y aplicación de productos para generar mapas de cuencas o microcuencas gestionado por un regulador, ya que es importante saber lo que se aplica, cuánto y dónde; y iv) dado el impacto de los fertilizantes sobre cuerpos de agua asociados, se recomienda generar monitoreos de fertilizantes, además de las aguas adyacentes a las cuencas y predios evaluados, ya que el nitrógeno es móvil y reactivo y llega al agua (agua con alto contenido de nitrato). Sobre esto, la generación de normas secundarias de calidad del agua que impidan el uso excesivo de fertilizantes puede ser una alternativa; y a partir de este diagnóstico, se debe avanzar en medidas para lograr un uso racional de fertilizantes incorporando el clima como una variable importante, ya que la condición de temperatura y pluviometría puede tener un gran impacto en la forma en que el nitrógeno se volatiliza o lixivia.

Además, el programa de recuperación de suelos degradados debiera incentivar el uso de fertilizantes ambientalmente amigables, particularmente mejorando la transferencia tecnológica y la capacitación de productores en el correcto uso de fertilizantes. También es importante educar a los agricultores de los efectos negativos de la sobrefertilización, como la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero. Un primer paso para levantar las alertas puede ser la generación de un mapa de zonificación regional para declarar zonas saturadas por nitrógeno y poder regular a partir de ello.

3.4. Árboles en tierras de cultivo

Definición
Secuestro adicional de carbono en la biomasa arbórea por encima y por debajo del suelo y de carbono del suelo debido a la integración de los árboles en las tierras de cultivo a niveles que no reduzcan el rendimiento de los cultivos. Esto incluye cortinas rompevientos/cinturones de protección y cultivos en callejones (Griscom et al. 2017),

Antecedentes
La incorporación de árboles en las tierras de cultivo puede desarrollarse mediante prácticas como la agrosilvicultura y el incremento de la cobertura. Esta última puede aplicarse mediante elementos estructurales del paisaje, como cortavientos, cinturones de protección, setos, franjas y otros. La agrosilvicultura y el aumento de la cobertura arbórea en las tierras de cultivo son prácticas muy importantes, porque promueven diversos servicios ecosistémicos y reducen las externalidades negativas para el medioambiente y la sociedad (Rosa-Schleich et al., 2019; Torralba et al., 2016). Según la opinión de los expertos, el desarrollo de setos y cortavientos puede contribuir a la mitigación y adaptación del cambio climático a través de aumentar el carbono orgánico del suelo (SOC) (Hernández-Morcillo et al., 2018). Los sistemas productivos que incluyen árboles en las tierras de cultivo pueden secuestrar mayores cantidades de carbono que otros sistemas a través de la biomasa arbórea y subterránea (Abbas et al., 2017).

Potencial de mitigación
Los árboles en tierras de cultivo tienen un alto potencial para reducir emisiones. Siguiendo el razonamiento de Griscom et al. (2017), se estima que el potencial de mitigación de esta SBN podría llegar a 2,26 TgC año^{-1} (Marquet et al., 2021a).

Cobeneficios
El plantar árboles en tierras de cultivo para promover paisajes heterogéneos de tipo agroforestal decrece la erosión y aumenta la recarga de agua, además de potenciar el control biológico de plagas. El uso de sistemas forestales al borde de los campos agrícolas cercanos a cuerpos de agua sirve de filtro para agroquímicos, fertilizantes, antibióticos y pesticidas, pues evita que los contaminen. Estas prácticas promueven la conservación de la biodiversidad al aumentar la disponibilidad de hábitat y recursos, la conectividad, la protección de los cultivos y la producción, entre otros (Rosa-Schleich et al., 2019).

Otro cobeneficio importante de esta SBN es que los árboles en zonas de cultivo actúan como biofiltros para agroquímicos fertilizantes, antibióticos y pesticidas, lo que se evita contaminar aguas cercanas y promueve la salud de los ecosistemas y la biodiversidad. Estas prácticas debieran ser sinérgicas con las de reforestación y utilizar únicamente especies nativas para potenciar los cobeneficios para el agua y la biodiversidad.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología
Una de las brechas importantes es identificar qué combinaciones de especies nativas son más beneficiosas dependiendo del tipo de cultivo y situación climática, así como su funcionalidad asociada (por ejemplo, polinización).

Es importante superar brechas de gobernanza que impiden incorporar áreas no productivas con potencial de reforestación con especies nativas dentro de los predios a programas de reforestación, con cercos vivos. Esto se debe a la disociación de los programas de fomento agrícola, además de que Conaf separa lo que clasifica como suelo agrícola del suelo forestal, lo cual hace superficies con potencial de reforestación se desaprovechen por falta de bonificación. También se debe incentivar la generación de sistemas agroforestales en el Programa de Suelos Degradados.

No se visualizan brechas tecnológicas que puedan impedir las actividades que implican estas prácticas y que sean distintas de las mencionadas para el caso de reforestación o restauración.

Indicadores y metas propuestas

Como indicador, se recomienda: i) desarrollar una propuesta legal que permita alinear los programas de fomento agrícola con Conaf, para fortalecer la creación de paisajes agroforestales por medio de subsidios; y ii) que las hectáreas agrícolas pasen a una condición agroforestal con metas a veinte y treinta años.

Horizonte temporal de implementación de metas

Las actividades asociadas a esta SBN tienen un efecto que aumenta en un horizonte de 20 a 30 años, dependiendo de las especies nativas utilizadas y las condiciones climáticas de la zona intervenida.

Próximos pasos

Lo más urgente respecto de esta SBN es generar incentivos a nivel local para su adopción. Esto pasa por generar subsidios que consideren en forma holística bosques y agricultura, además de sistemas de certificación que promuevan la integración de los árboles en los campos agrícolas.

3.5. Mejora del carbono en el suelo en tierras de pastoreo

Definición

Incremento adicional en captura de carbono en el suelo de las praderas bajo pastoreo producto de las técnicas de manejo.

Antecedentes

Los pastizales son capaces de secuestrar grandes cantidades de carbono (Lorenz y Lal, 2018), incluso con más resiliencia que los bosques. La gestión de las tierras de pastoreo es un componente clave en el ciclo del carbono y el nitrógeno, además de ser una variable que puede modificarse para afectar a las reservas de carbono (Henderson et al., 2015). Comúnmente, la optimización del pastoreo implica una disminución de las tasas de carga en las zonas de pastoreo excesivo y un aumento de las tasas de carga en las zonas de pastoreo insuficiente (Fargione et al., 2018). Sin embargo, pruebas recientes sobre las prácticas de pastoreo y los servicios de los ecosistemas indican que el tiempo entre los eventos de pastoreo es tanto o más importante que las tasas de pastoreo, y el *pastoreo adaptable de múltiples potreros* ha surgido como un sistema de planificación del pastoreo que mejora la producción y el secuestro de carbono (Stanley et al., 2018).

Potencial de mitigación

La incorporación de carbono en el suelo en tierras de pastoreo también posee un importante potencial de mitigación. Considerando un valor conservador de tasas de acumulación de carbono en el suelo de praderas manejadas, Marquet et al. (2021a) llega a una estimación preliminar de 2,34 TgC ha^{-1} $año^{-1}$ como potencial de mitigación asociada a esta SBN.

Cobeneficios

Esta SBN posee importantes cobeneficios para la biodiversidad, ya que genera menores perturbaciones para insectos y plantas. Además, un manejo del pastoreo adecuado redunda en menos consumo de agua, y mejora la capacidad del suelo para retenerla (Griscom et al., 2017).

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Existen importantes brechas de conocimiento para Chile, empezando por una línea base del contenido de carbono en los suelos del país y en las praderas sujetas a pastoreo, y como esto varía según el clima, las especies vegetales y la carga ganadera. Por otro lado, es importante tener información de base sobre el número de predios y cabezas en actividades que podrían calificar bajo esta SBN.

Existen varias iniciativas regenerativas asociadas a actividades ganaderas y lecheras en Chile, las que podrían ser potenciadas gracias a incentivos legales a prácticas que estimulen la captura de carbono en suelos de praderas bajo pastoreo a través del manejo y mecanismos de certificación nacionales.

Muchos predios agropecuarios realizan análisis de suelos en laboratorios que no quedan registrados ni son georeferenciados. La información contenida en estas muestras y la metadata debiera poder ser almacenada en repositorios públicos, con la debida autorización, para ser utilizada en un programa nacional de monitoreo del carbono y otros compuestos en el suelo.

Indicadores y metas propuestas

Lo primero es generar metas asociadas a cerrar brechas de conocimiento, como contar con una línea base nacional de carbono en los suelos, evidencia experimental acerca del impacto del manejo con ganadería regenerativa, y pastoreo adaptable de múltiples potreros. Una vez que se implementen estas prácticas, se sugieren como indicadores el número de cabezas de ganado bajo un régimen de pastoreo que potencia el carbono en el suelo, el número de predios bajo este tipo de manejo, e indicadores de eficiencia de producción (carbono equivalente por kilo de carne). Sin embargo, no es posible colocar actualmente metas sin tener más información respecto de la situación basal. Un incremento al doble de lo que ya existe dentro de los próximos cinco años parece ser una meta alcanzable.

Horizonte temporal de implementación de metas

Se estima que en un horizonte de cinco años podrían implementarse gradualmente estrategias de manejo del pastoreo que mejoren el carbono en el suelo de praderas.

Próximos pasos

Se necesita generar políticas e iniciativas que se hagan cargo de manera eficiente y efectiva de las brechas en nuestro conocimiento y que fomenten, a través de fondos de concursos priorizados, el establecimiento de las líneas bases de carbono en el suelo, que nos permitan monitorear y evaluar el impacto de los manejos agrícolas y ganaderos en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Al igual que para el caso forestal, el indicador en este sector corresponde a hectáreas bajo alguna de las SBN aquí propuestas. Esto pasa por cuantificar lo que existe en términos de tierras que estén usando algunas de estas SBN, y proponer metas futuras. En relación con esto último, y considerando que en la actualidad existen 2.123.943 hectáreas dedicadas a cultivos anuales y permanentes o en forrajeras sembradas o barbecho o descanso (Odepa, 2019), una meta de 10% en alguna de las SBN recomendadas para el sector aparece como razonable en un horizonte de 5 a 10 años. Para el caso de la actividad ganadera, Odepa (2019) señala la existencia de 129.023 predios con ganado bovino de carne y leche con dispar cantidad de animales (60% posee menos de 10 cabezas), lo que suma unos 2,8 millones al 2017, de los cuales 500.000 son vacas lecheras. En este contexto, la transformación de 10% de la masa ganadera a alguna de las SBN en ganadería aparece como una meta razonable en un período de 5 a 10 años.

4. Humedales

4.1. Antecedentes

Dado que existe una variada gama de definiciones del concepto, para el presente documento se utiliza la definición dada por Ramsar (2013), en que se entiende *humedales* como «las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros». De esta forma, de manera general, se incluyen humedales estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y lagunas costeras mixohalinas), lacustres (humedales asociados con lagos), ribereños (humedales asociados a ríos), palustres (turberas, pantanos) y los humedales costeros. Además, se incluyen los humedales artificiales.

La conservación o restauración de los sistemas de humedales constituye una SBN con una multitud de servicios de gran valor social, económico y ambiental, como la mitigación de impactos por inundaciones, la absorción de contaminantes, la retención de sedimentos, la recarga de acuíferos, la creación de hábitats para animales, aves y plantas y captura de CO_2, el almacenamiento de biomasa y el enterramiento de carbono, entre muchos otros. Dentro de estos servicios, destacan los asociados a la provisión de agua y, por lo tanto, las medidas de protección para conservar los humedales y sus servicios tendrán beneficios en particular para asegurar la no interrupción del ciclo del agua y su disponibilidad, lo cual es un especial aporte a la adaptación al cambio climático. Aunque se consideraba que los humedales eran un recurso de biodiversidad estático, hoy se ha avanzado hacia un enfoque en que se consideran las muchas funciones y beneficios que estos ecosistemas proporcionan a la sociedad (Maltby et al., 2013).

La restauración de humedales es la renovación de la estructura y función de los humedales que han sido drenados o perdidos como resultado de actividades humanas. Los humedales que han sido drenados y convertidos a otros usos a menudo conservan las características del suelo y la hidráulica y, por lo tanto, pueden restaurarse. La restauración de humedales puede ocurrir en tiempos muchísimo más rápidos en comparación con la restauración de otros sistemas; sin embargo, en general, la mejor y más costo-eficiente forma de prevenir una mayor pérdida de valor ecológico y económico debido a la degradación de los humedales es eliminando las presiones que provocan su pérdida y degradación.

Para poder restaurar humedales dañados es fundamental implementar medidas adecuadas. Por ejemplo, en el caso de la función de humedales como sumideros de carbono, es necesario y urgente tener una comprensión clara de los cambios del carbón orgánico en el suelo (COS) (Xu et al., 2019; Yang et al., 2020). El COS de los humedales está influenciado por una gran cantidad de factores, como la hidrología, la vegetación, el clima, las propiedades del suelo y los patrones de uso del suelo. Estos factores y sus interacciones son extremadamente complejos y es importante monitorear los cambios en el COS después de la restauración de humedales, de manera de potenciar la capacidad de sumidero de carbono de los humedales restaurados (Jackson et al., 2017; Xu et al., 2019).

Los humedales construidos pueden ser opciones innovadoras para manejar la contaminación proveniente de efluentes domésticos en áreas urbanas y periurbanas (Mancilla Villalobos et al., 2013), así como también para efluentes industriales, lo que ofrece una oportunidad única al considerar la legislación nacional, que se basa en concentraciones en cada efluente, pero no considera la suma de las concentraciones de todos los efluentes vertidos a un humedal. Los humedales construidos se caracterizan por imitar de forma controlada procesos que se dan en la naturaleza para tratar el agua y mejorar su calidad, y han sido utilizados en diferentes partes del mundo. Se utilizan principalmente en el tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales domésticas, y son capaces de eliminar una variedad de contaminantes, incluidos sólidos en suspensión, material que demanda oxígeno, nutrientes, patógenos, metales y metaloides (De Klein & Van der Werf, 2014; Frantzeskaki et al., 2019). Al mismo tiempo, pueden actuar como sumideros de carbono cuando se captura CO_2 en la biomasa. Sin embargo, es bien sabido que los humedales también producen cantidades sustanciales de gases de efecto invernadero CH_4 y N_2O. Sobre todo este último, resultante de la nitrificación y desnitrificación, es un GEI con 300 veces mayor poder radiativo que el CO_2. Para evaluar la sostenibilidad ambiental

de los humedales artificiales, es necesario evaluar el beneficio del sumidero de carbono y la desventaja de las emisiones de GEI (De Klein & Van der Werf, 2014; Ingrao, Failla & Arcidiacono, 2020). A pesar de esto, la idea central de la construcción de humedales es evitar la degradación de los humedales naturales debido al vertido de contaminantes, y en consecuencia mantener los servicios ecosistémicos de los humedales naturales incluyendo el almacenaje de COS.

4.2. Humedales como SBN

Potencial de mitigación

Su potencialidad como sumideros de carbono dependerá de su manejo o de su estado de conservación, ya que en caso de que la tasa de productividad no supere la de degradación, pueden convertirse en una fuente neta de emisión de carbono a la atmósfera (Dinsa & Gemeda, 2019; Villa & Bernal, 2018).

A pesar de representar solo un pequeño porcentaje de la superficie de la tierra (entre 3,2% y 9,7%) (Melton et al., 2013; Mitsch et al., 2013; Villa & Bernal, 2018), varios estudios reportan que los humedales son importantes sumideros de carbono que almacenan alrededor de un tercio de la reserva de carbono del suelo orgánico del mundo (Gallant et al., 2020; Lal, 2008; Xu et al., 2019). Sin embargo, se estima que a nivel mundial se ha perdido el 50% de los reservorios de carbono de los humedales (Griscom et al., 2017). Mitsch et al. (2013) estiman que los humedales a nivel mundial pueden ser sumideros netos de carbono de aproximadamente 830 Tg año^{-1} de carbono, con un promedio de 118 gC m^{-2} año^{-1} de retención de carbono. La mayor parte de esa retención de carbono ocurre en humedales tropicales y subtropicales. Sin embargo, el papel de los humedales como sumideros de carbono varía mucho según su característica hidrogeomórfica y su ubicación dentro del paisaje (Bernal & Mitsch, 2013). Además, aunque los ecosistemas de humedales secuestran carbono en su suelo, su capacidad real de sumidero depende del balance neto de sus flujos. Las emisiones de metano, en particular, dificultan la capacidad de muchos humedales de agua dulce para funcionar como sumideros netos de carbono, por su potencial efecto como gas de efecto invernadero, 28 veces superior al dióxido de carbono (Bastviken et al., 2011).

En el caso de las turberas, la información existente con respecto a tasas de acumulación de turba en la Patagonia es relativamente limitada. Mientras que en el hemisferio norte se cuenta con estudios que involucran el análisis de cientos de núcleos de turba (más de 1.300 núcleos) (Korhola et al., 1995), en la región de la Patagonia las estimaciones emplean la información derivada del análisis de menos de una centena de núcleos obtenidos entre −45° S y −65° S. En promedio, las turberas de la Patagonia comenzaron a acumular carbono hace 13.249 ± 430 años y tienen una profundidad de 5,6 ± 0,3 m. Se estima que la tasa promedio de acumulación de turba en la Patagonia es de 0,43 ± 0,02 mm año^{-1}, equivalente a una tasa de acumulación aparente de carbono de 12,25 ± 0,55 gC m^{-2} año^{-1} (Hoyos-Santillan & Mansilla, 2021). Considerando el área total de turberas en la Patagonia (4,5 millones de hectáreas en Chile y Argentina) y la tasa aparente de acumulación de carbono en el largo plazo actualizada (12,25 ± 0,55 g C m^{-2} año^{-1}), se estima que estos ecosistemas podrían acumular 550.000 toneladas de carbono cada año. Por su parte, considerando el área total de turberas de las regiones de Aysén y Magallanes (cerca de 3,5 millones de hectáreas) (Conaf, 2017; Conaf & Conama, 2006), es posible estimar que las turberas localizadas en estas regiones podrían contribuir anualmente a la acumulación de 430.000 toneladas de carbono (cerca de 13 millones de toneladas de carbono) entre 2020 y 2050. Esta cantidad podría parecer pequeña en comparación con los 95 millones de toneladas de CO_2eq que se proyecta emitirá Chile en 2030 (MMA, 2021). Sin embargo, el hecho de que las turberas funcionen como sumideros, y no como fuentes emisoras de carbono, garantiza la conservación del importante reservorio de carbono que representan, mismo que es 4,7 veces superior al de la biomasa aérea de todos los bosques de Chile (Hoyos-Santillan et al., 2019). Marquet et al. (2021) estima la tasa anual de captura de carbono para las turberas de la Patagonia entre 2,2 y 3,9 TgC año^{-1}, lo que refleja la necesidad de tener un buen inventario de la extensión de este ecosistema en Chile, así como de su tasa de acumulación de carbono.

El caso diametralmente opuesto sería que, debido a intervención humana o al cambio climático, las turberas de la Patagonia se comportasen como fuentes emisoras de CO_2 a la atmósfera. Por ejemplo, la extracción de la cubierta vegetal de las turberas o de turba podría ejercer impactos negativos cuasipermanentes en estos ecosistemas, destruyendo el acrotelmo donde se fija el dióxido de carbono, y junto con ello eliminando a las poblaciones de metanotrofos (consumidores de metano) simbiontes del *Sphagnum*, liberando cantidades importantes de metano y dióxido de carbono. A partir de las tasas de acumulación de turba ya presentadas, la regeneración de una capa de 20 cm de espesor de turba podría tomar 400 años en la región de Aysén, y 500 años en la región de Magallanes. Aunque esta estimación es solo ilustrativa, pues asume que se mantiene constante la tasa de acumulación de turba los pasados 18.000 años, hace evidente la necesidad de evaluar cuantitativamente el impacto real de la extracción de turba sobre la dinámica del carbono en la Patagonia. Esto tiene relación directa con las actividades de extracción de turba, ya que es importante dejar de considerar —de manera equivocada— que se puede explotar la turba de manera sostenible, ignorando el hecho de que la turba es un recurso no renovable en el corto y mediano plazo (Evers et al., 2016).

En el caso de los humedales costeros o marismas, Farías et al. (2019) indican la alta tasa de producción primaria neta de estos ecosistemas, que fluctúa entre 92 a 280 TgC año^{-1} y contribuyen en hasta 15% de la acumulación total de carbono en los sedimen-

tos marinos. La conservación, la restauración y el uso de hábitats costeros con vegetación en soluciones de ingeniería ecológica para la protección costera son promisorios (Duarte et al., 2013), pero el costo de esta restauración es altísimo (Bayraktarov et al., 2015), por lo que proteger es la mejor opción.

Potencial para la adaptación

En el caso de los humedales, es necesario considerar no solo su potencial de mitigación, sino también el de adaptación (Erwin, 2009). En ese sentido, los humedales (andinos, turberas, urbanos, entre otros) sirven para gestionar el escurrimiento de agua al ser receptores y almacenadores de aguas lluvia, gracias a lo cual mitigan el riesgo de inundaciones e influencian la provisión de agua, tanto en cantidad como calidad. Por otra parte, debido al proceso de evapotranspiración, también bajan la temperatura del ambiente su alrededor (Sun et al., 2012).

Cobeneficios

Los humedales proveen servicios ecosistémicos con múltiples cobeneficios (**tabla 5**). Estos incluyen la protección de la calidad del agua, la protección de la zona costera, la regulación de humedad del suelo y el agua subterránea, la regulación de inundaciones, el soporte a la biodiversidad, la generación de hábitat y el secuestro de carbono (Thorslund et al., 2017). Con respecto a los servicios relacionados con los humedales como provisión de agua en cantidad y calidad, es ampliamente reconocido que los humedales aportan el 40% de todos los servicios ecosistémicos identificados, lo que incluye el mejoramiento de la calidad del agua, la regulación de inundaciones, la regulación de la turbiedad del agua al retener sedimento, la absorción de carbono y la mantención de la biodiversidad (Zedler & Kercher, 2005).

Investigaciones en humedales chilenos han determinado que estos proveen servicios ecosistémicos, como provisión de turismo (Nahuelhual et al., 2013), protección contra catástrofes (Barbosa & Villagra, 2015) y provisión de materias primas —por ejemplo, para artesanías—, entre otros. También proveen beneficios socioculturales y servicios ecosistémicos culturales, como belleza del paisaje, sentido de pertenencia e identidad, cohesión social, conexión con la naturaleza, oportunidades para la recreación, oportunidades para la educación ambiental y oportunidades para las relaciones sociales. Los humedales costeros son importantes mitigadores del efecto de desastres naturales, como tsunamis y marejadas.

Es evidente que los humedales proveen servicios claves para la productividad de Chile. Por ejemplo, los humedales altoandinos han provisto históricamente el agua para el desarrollo de la minería del cobre en la zona norte, lo que genera competencia por los recursos hídricos con comunidades locales (Romero et al., 2012). Procesos de retención de agua naturales asociados a humedales en altura o a lo largo de la cuenca pueden retener y modular el régimen de caudal y sedimentos de mejor manera que un embalse (Arriagada et al., 2019), por lo que es necesario conservar y restaurar los que en la actualidad se encuentran degradados.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

A continuación, se enumeran algunas brechas de conocimiento, gobernanza y brechas tecnológicas para poder conservar los humedales y beneficiarse de los múltiples cobeneficios que proveen.

En cuanto a brechas de conocimiento, en la actualidad se requiere:

- Una caracterización del ecosistema biofísico de humedales y turberas.
- Un balance global del carbono en humedales de Chile, que incluya balances (flujos) y *stock* de carbono-metano.
- Una comprensión clara de los cambios del carbón orgánico en el suelo de los distintos tipos de humedales, y a lo largo de gradientes latitudinales y altitudinales.
- Conocer mejor las tasas de cambio de uso de suelo.
- Una cuantificación del aporte de los humedales a la adaptación al cambio climático y sus cobeneficios.
- Conocimiento, capacidades y experiencias para la restauración de humedales en el país.
- Conocimiento el estado de degradación o conservación.
- Una red para monitoreo a largo plazo y protocolos estandarizados. Hay indicadores que pueden monitorearse por sensoramiento remoto (espejo de agua, clorofila y macrófitas), mientras que otras variables requieren seguimiento *in situ*, como la salinidad, el nivel del agua o las emisiones de gases.
- Una cuantificación del impacto de la contaminación sobre la estructura y función de humedales en Chile, principalmente nutrientes, pero también contaminantes (residuos) industriales.
- Un catastro nacional de turberas que permita contar con información precisa del área y profundidad de estos ecosistemas a lo largo del país. Solo existen esfuerzos aislados en Magallanes.
- Programas de monitoreo intensivo de emisiones de gases de efecto invernadero en humedales. Por ejemplo, en el caso de las turberas, existen esfuerzos aislados en Navarino y Magallanes.
- Entendimiento del impacto que ha tenido y tendrá el cambio climático y las actividades humanas en el sistema cuenca hidrográfica-turbera en distintas regiones del país.

Dentro del área de gobernanza, se pueden identificar como brechas:

- La falta de una ley que proteja los humedales no urbanos.

Tabla 5.
Cobeneficios asociados a los humedales

Soluciones	Biodiversidad (alfa, beta, gamma)	Agua (filtración, control de inundaciones)	Suelo (enriquecimiento)	Aire (filtración)
Humedales				
Impactos evitados en los humedales costeros	Mantiene el suministro de la estructura, los nutrientes, la productividad primaria y los viveros de peces y camarones de importancia comercial.	Los humedales costeros tienen un valor económico estimado de USD 785 a USD 34.700 en valor de tratamiento de aguas residuales.	Beneficios de la transferencia de nutrientes entre sistemas a los arrecifes de coral, protección costera y regulación de la calidad del agua.	La plantación de árboles ayuda a capturar las partículas del aire y los gases contaminantes.
Impactos evitados en las turberas	Las turberas boreales contienen insectos distintivos, además de generalistas ampliamente distribuidos.	Los humedales y sus suelos atenúan las inundaciones.	Los humedales y sus suelos atenúan las inundaciones.	El drenaje y la tala de bosques aumentan el riesgo de incendio de la turba. La exposición a los contaminantes procedentes de los incendios de turbas aumenta la necesidad de servicios de salud para tratar los trastornos pulmonares.
Restauración de humedales costeros	Mantiene el suministro de la estructura, los nutrientes, la productividad primaria y los viveros de peces y camarones comerciales.	Beneficios del control de inundaciones y de la filtración del agua de los manglares y de otros humedales costeros.	Beneficios de la transferencia de nutrientes entre sistemas a los arrecifes de coral, protección costera y regulación de la calidad del agua.	La plantación de árboles ayuda a capturar las partículas del aire y los gases contaminantes.
Restauración de turberas	La regeneración de las turberas restablece diversas comunidades.	Tratamiento de aguas residuales y remediación de aguas pluviales.	La restauración de las tierras degradadas a una alta productividad depende de las especies de fauna que ayudan a desarrollar la estructura y la fertilidad del suelo.	La exposición a los contaminantes procedentes de los incendios de turbas aumenta la necesidad de servicios de salud para tratar los trastornos pulmonares. La rehumidificación de las turberas reduce el riesgo de incendios.

Fuente: Griscom et al. 2017.

- El retraso en la aprobación ley que crea Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, con el consiguiente retraso de su implementación descentralizada y coordinada con gobernanza en cambio climático.
- La poca relación con comunidades o sociedades humanas.
- La falta de integración con otros sistemas a escala de cuenca o paisaje, con ineficiencias y objetivos contrapuestos.
- La poca gestión territorial a escala de cuenca y planificación territorial de los diversos usos de la tierra.
- La falta de incentivos para que los propietarios de humedales de propiedad privada los gestionen como SBN.
- La falta de inclusión de las instituciones de gobernanza local en las actividades de conservación de humedales.
- Las modificaciones al Decreto 25/2018 del Ministerio de Agricultura, que impactaron negativamente sus alcances regulatorios para la protección de las turberas.

Las brechas de tecnología identificadas son:

- La cantidad limitada a nivel nacional de infraestructura y equipos para caracterizar los humedales y medir emisiones de gases de efecto invernadero en ellos. Por lo tanto, es necesario desarrollar redes de análisis y monitoreo nacionales que permitan evaluar el balance del carbono en estos ecosistemas.
- La falta de instrumentos multiparamétricos de monitoreo constante de parámetros esenciales (básicos) como pH, oxígeno, conductividad, temperatura y cantidad de agua a bajo costo.
- La cantidad limitada de grupos de investigación especializados en el estudio de los ciclos biogeoquímicos en turberas en Chile.
- La cantidad limitada de trabajos enfocados en la restauración de humedales. Es necesario destinar más recursos que potencialicen los esfuerzos de restauración a través de la integración de redes de trabajo que involucren a la academia, las instituciones gubernamentales y los sectores productivos.

Finalmente, es necesario destacar la importancia de contar con un Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad (SIMBIO) que cuente con un adecuado financiamiento y gobernanza, para actuar como un repositorio de información primaria, además de un instrumento para la gestión de la información de la biodiversidad que apoye la toma de decisiones en relación con adaptación y mitigación de cambio climático en ministerios sectoriales.

Indicadores, metas y horizonte temporal de implementación

En la **tabla 6** se incluye una serie de propuestas de metas e indicadores para avanzar en los humedales como alternativa de SBN.

Tabla 6.
Propuestas de metas e indicadores para el uso de humedales como SBN

Meta	Indicador	Horizonte temporal
Homologación de la metodología de inventario	Existe una metodología estándar para la confección del inventario	> 2023
Las comunas han identificado y delimitado sus humedales	La cantidad de comunas que ha identificado y delimitado sus humedales	> 2025: 50 comunas > 2030: 100 comunas > 2035: 200 comunas > 2040: todas las comunas
Cuantificar *stock* y flujos de GEI de un porcentaje de la superficie d e humedales	Superficie de humedales monitoreada	> 2025: 20% > 2030: 50% > 2035: 75% > 2040: 100%
	Superficie de humedales cuantificada	> 2025: 10% > 2030: 30% > 2035: 60% > 2040: 80%
Mantención de la superficie actual de humedales en el largo plazo (o que no haya disminución en la superficie de humedales respecto a la superficie actual)	Superficie (o tasa de pérdida, ganancia) de humedales o turberas conservadas, en hectáreas al año	> 2025

Inventario y priorización de humedales a restaurar	Existe una metodología estándar para la priorización	> 2023
	Listado priorizado de humedales a restaurar	> 2025
Restauración del porcentaje de la superficie de los humedales priorizados para restauración	Superficie de humedales restaurado, en hectáreas	> 2030: 10% > 2035: 30% > 2040: 70%
Gestión de humedales como SBN, asegurando que proveen cobeneficios y aportes a la adaptación al cambio climático	Superficie de humedales gestionados como SBN	> 2030: 10%
Desarrollo de un catastro nacional de turberas por cuenca o grupo de cuencas hidrográficas, en área y profundidad	Cantidad de cuencas incluidas en el catastro	> 2021: Identificación preliminar de cuencas-turberas > 2022: Inicio de estudios prospectivos y catastro preliminar basado en análisis de imágenes satelitales > 2023: Región de los Lagos > 2025: Región de Aysén > 2030: Región de Magallanes
Monitoreo de emisiones de gases de efecto invernadero y subsidencia.	Número de cuencas-turberas incluidas en el programa de monitoreo (implementación de red de monitoreo)	> 2025: Región de los Lagos y Aysén > 2030: Región de Magallanes
	Superficie de turberas que es monitoreada	> 2025: 30% > 2030: 70% > 2040: 100%

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación económica

Se estima que el valor global de los servicios ecosistémicos de los humedales es de USD 26,4 billones al año, aportando más del 20% del valor total de los servicios ecosistémicos a nivel global (Costanza et al., 2014; Thorslund et al., 2017).

Relación con instrumentos, políticas existentes y el sector económico

Los humedales como SBN se relacionan con la Ley de Humedales Urbanos y su reglamento, las Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC), el Plan Nacional de Protección de Humedales, el uso de humedales construidos como instrumento de evaluación de impacto ambiental y las respectivas ordenanzas municipales.

Es importante destacar que existen políticas y normativas que tienen impacto negativo sobre humedales. Por ejemplo, el Ministerio de Agricultura tiene incentivos para su drenaje, y las turberas están incluidas en la Ley Minera. Una descripción más completa puede encontrarse en Möller & Muñoz-Pedreros (2014).

Próximos pasos y recomendaciones

Dadas la cantidad importante de brechas expuestas, se recomiendan como acciones priorizadas el definir una metodología estandarizada para mantener y actualizar un inventario nacional de humedales. El inventario se debe actualizar periódicamente (cada cinco años, por ejemplo).

A su vez, el inventario nacional utiliza datos satelitales, que tienen una resolución espacial limitada. Por lo tanto, se requiere validar en terreno a nivel comunal lo que realmente son humedales y sus bordes.

Algunas de las variables biofísicas de los humedales se pueden medir remotamente. Por ello, se recomienda realizar estas mediciones de manera sistemática para los humedales en el inventario nacional y dejarlas disponible en alguna plataforma, como el Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad (SIMBIO) o el Observatorio de Cambio Climático.

Para cada tipo de humedales (marismas, bofedales, turberas, etcétera) se deberían escoger un número pequeño para que sirva de piloto para medición *in situ* de los flujos de carbono y así poder evaluar potencial de mitigación. Además, se debe medir en el lugar el nivel del agua para ver si se están secando o no. En cuanto a ciencia ciudadana, para algunos humedales —sobre todo los urbanos— se pueden hacer estas mediciones con ayuda de las comunidades aledañas, como colegios o vecinos.

Es importante mencionar que dada la urgente necesidad de abordar la grave sequía que afecta al país desde 2010, la conservación de humedales, la protección de las cabeceras de cuencas y los ambientes de ribera, entre otros, pueden ser la clave para una solución sostenible a 2050, que asegure el caudal ecológico necesario para proveer de agua a la naturaleza y las personas. Será difícil restaurar los humedales y conectar la relación de la conservación del bosque nativo con la provisión de agua para diferentes usuarios —incluidos los humedales— si el cambio climático disminuye fuertemente las precipitaciones, por lo que la discusión debe ampliarse a la reutilización del agua, como la obtenida en plantas de tratamiento (véase el caso del humedal de Batuco).

Por último, es necesario avanzar en la discusión que existe actualmente en el Congreso Nacional respecto a la Ley de Turberas.

5. Ecosistemas marinos

5.1. Antecedentes

Basados en el concepto de SBN, el océano es un mitigador natural de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por cuanto atrapa el calor acumulado en la atmósfera y favorece el secuestro de carbono (carbono azul) en diferentes formas químicas, desde dióxido de carbono a hidrocarburos. Por lo tanto, si velamos por el buen funcionamiento de los ecosistemas marinos, el océano captura, almacena y secuestra en forma óptima y natural una gran cantidad de carbono en diferentes reservorios. Más aún, el océano es el único sistema capaz de enterrar carbono como resultado del funcionamiento a largo plazo de una compleja red de procesos biogeoquímicos y tróficos asociados al ciclo del carbono, el cual queda enterrando permanentemente en los sedimentos marinos, que son el mayor reservorio de largo plazo de carbono, tanto orgánico como inorgánico, en el planeta.

Los ecosistemas marinos son un gran aporte en materia de adaptación, ya que modulan el aumento de temperatura atmosférica en zonas costeras; proveen refugios o hábitats para el aseguramiento de cuotas pesqueras y la producción de bienes y servicios para pescadores artesanales y pequeños empresarios del turismo; y en particular, reducen el riesgo de desastres naturales por marejadas o tsunamis.

Chile es el décimo país a nivel mundial con más maritorio en el mundo y el con mayor superficie de mar en América del Sur. Dada su extensión latitudinal (subtropical a polar) y zonal (costa a islas oceánicas), alberga numerosos ecosistemas marinos, muchos de ellos de gran productividad biológica, lo que se traduce en gran capacidad de capturar, almacenar y finalmente exportar carbono a los sedimentos subyacentes. La ventaja comparativa que tiene Chile respecto a la protección de fondos marinos como marismas, bosques de algas pardas y otros ecosistemas es fundamental a la hora de mitigar el cambio climático, dada la superficie marina bajo su jurisprudencia y la diversidad de ecosistemas marinos que alberga.

Cuando se considera todo el carbono orgánico enterrado en los sedimentos marinos a nivel global y se compara con el carbono enterrado estimado en la plataforma continental y la zona económica exclusiva (ZEE) chilena del suelo marino global, estas superficies entierran entre 2 TgC año^{-1} y 25 TgC año^{-1}, cantidades sustantivas si consideramos que solo representan el 0,045% y el 0,55% de la superficie total del océano, respectivamente (**tabla 7**).

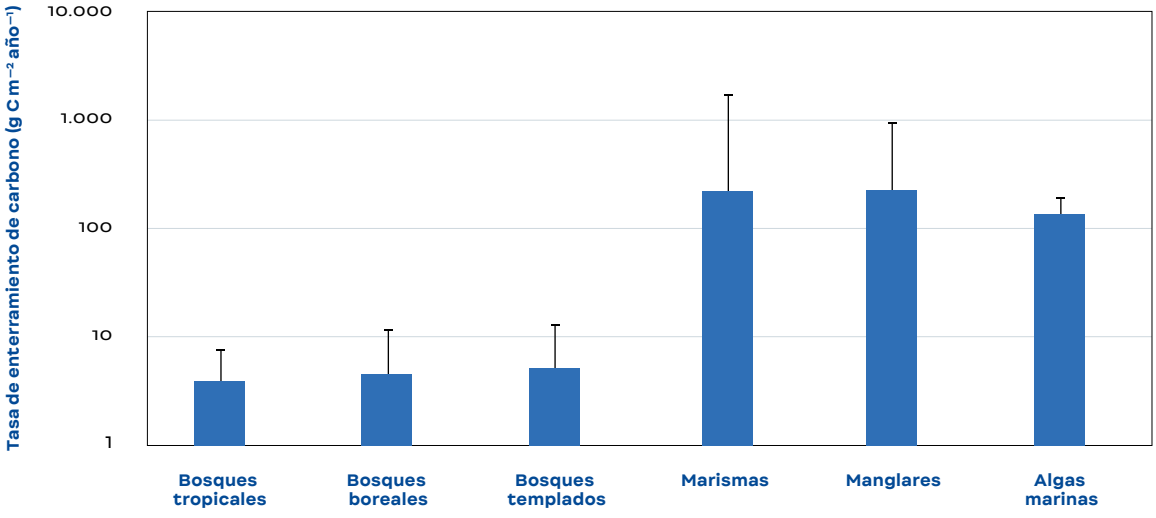
Tabla 7.
Enterramiento de carbono orgánico en ecosistemas marinos costeros respecto al océano global y el enterramiento en sedimentos de la ZEE

Hábitats	Superficie (km²)	Tasa de enterramiento de carbono orgánico (Tg año⁻¹)	Enterramiento respecto a la superficie global del océano
Bosques de macroalgas[a]	~1.500.000[b]	173[c]	1% a 1,5%
Manglares	140.000	20	0,1%
Marismas	435.000	60,4	0,3%
Pastos marinos	177.000	27,4	0,1% a 0,2%
Total	**~2.252.000**	**280,8**	**1,69%**
Plataforma continental global	29.000.000	138[d]	8%
Plataforma continental chilena	160.000	0,08 a 2,02[e]	0,045%
Zona económica exclusiva chilena	2.009.000	1 a 25,31[e]	0,55%

a. Los bosques de macroalgas son los mayores secuestradores de carbono. Las estimaciones aún preliminares consideran secuestro, pero no tasas de enterramiento.
b. Área obtenida de Krumhansl et al. (2016).
c. Tasa obtenida de Krause-Jensen & Duarte Duarte (2016).
d. Tomado de Kandasamy & Nagender (2016). Este valor no considera enterramiento de carbono por ecosistemas litorales (carbono azul).
e. Estimado en este trabajo por Laura Farías. No considera ecosistemas carbono azul.

De hecho, cuando los ecosistemas marinos como los pastos marinos, las marismas, los manglares y los bosques de algas pardas se comparan en una misma unidad de superficie con bosques tropicales o caducifolios del hemisferio norte, la magnitud acumulada de carbono en los sedimentos es sustantivamente mayor (**figura 1**): según estimaciones, el enterramiento de carbono en sedimentos adyacentes a las marismas, manglares, bosques de quelpo y pastos marinos fluctúa entre 31 a 87 TgC año⁻¹, lo cual es entre 7 a 21 veces mayores que las tasas en bosques tropicales, templados y boreales.

Figura 1.
Almacenamiento de carbono en ecosistemas de carbono azul y bosques



Fuente: Pendleton et al. (2012).

El concepto de *blue carbon* o carbono azul fue acuñado en 2009 por el programa internacional The Blue Carbon Initiative. Este programa está enfocado en mitigar el cambio climático a través de la conservación y restauración de los ecosistemas costeros y marinos que naturalmente almacenan y secuestran grandes cantidades de carbono azul. Los manglares, las marismas o humedales, los bosques de macroalgas y los pastos marinos son sistemas que capturan (por medio de fotosíntesis), almacenan (como biomasa) y finalmente acumulan y entierran carbono en sedimentos adyacentes. Por ejemplo, más del 95% del carbono almacenado en las praderas de pastos marinos se acumula en los sedimentos (Kennedy et al., 2010).

Cuando están protegidos o restaurados, los hábitats de carbono azul almacenan y secuestran carbono; pero cuando se degradan o destruyen, estos emiten el carbono que habían almacenado durante siglos al océano (Howard et al., 2017). Estudios estiman que los ecosistemas costeros degradados liberan anualmente hasta 1.020 millones de toneladas de CO_2, equivalente al 19% de las emisiones de la deforestación tropical en todo el mundo (Pendleton et al., 2012). Resulta fundamental proteger los fondos marinos, sobre todo aquellos que presentan un eficiente proceso de enterramiento de carbono azul. La pérdida de un tercio de la cobertura global de estos ecosistemas implica una pérdida de sumideros de CO_2 y la emisión de 1 Pg de CO_2 al año.

Junto con relevar en forma incremental la importancia del océano en las contribuciones nacionalmente determinadas, a continuación se proponen medidas basadas en el océano en las que Chile tenga ventajas comparativas, costo-efectivas y que den cumplimiento a mejores normativas, para liderar el cumplimiento de compromisos internacionales (Farías et al., 2019).

A continuación, se exponen tres SBN asociadas a los ecosistemas marinos: protección, conservación, restauración y manejo de bosques de algas pardas; la protección de la bomba biológica del carbono, y la protección del fondo marino.

5.2. Bosques de algas pardas

Los bosques de macroalgas, también llamados bosques de huiros o quelpos, son ecosistemas submareales con una alta densidad de algas pardas gigantes, y son reconocidas como uno de los ecosistemas más productivos y dinámicos en el planeta (Pfister, Berry & Mumford, 2018).

Las macroalgas son los productores primarios activos y dominantes de las zonas costeras (Duarte, Middelburg & Caraco, 2005), con una producción neta primaria a nivel global que supera los 1.500 TgC por año (Krause-Jensen & Duarte, 2016), y son sustentadas por la continua y natural provisión de nutrientes desde las corrientes costeras que permiten altas tasas de fotosíntesis y crecimiento. Por esta razón, los bosques de macroalgas son verdaderos captadores de CO_2 y almacenadores de carbono como biomasa, parte de la cual es secuestrada en sedimentos adyacentes como carbono orgánico, lejos del contacto con la atmósfera. En esto se diferencian de bosques terrestres, cuyos suelos también acumulan carbono orgánico, pero están expuestos a la influencia de la atmósfera y, por ende, a una oxidación aeróbica inmediata.

Estudios actuales sugieren que las macroalgas podrían secuestrar hasta 173 TgC por año a nivel global, con un rango de 61 a 268 TgC por año (Krause-Jensen & Duarte, 2016), principalmente en sedimentos donde la descomposición anaeróbica de la materia orgánica es incompleta, secuestrando alrededor 20% a 30% de la biomasa depositada (Pedersen et al., 2021). El resto de la biomasa es reciclada en forma de carbono orgánico disuelto (descomposición y oxidación de biomasa) y entra a ser parte de trama trófica bacteriana y fitoplanctónica que finalmente se traspasa a la bomba biológica marina.

Macrocystis pyrifera, más conocida como huiro, es un alga parda gigante que forma densos bosques bajo el mar. Estas algas pueden llegar a medir hasta 60 m o incluso 70 m de largo, y en condiciones óptimas pueden lograr tasas de crecimiento de cerca 30 cm a 50 cm diarios. En Chile, los bosques de macroalgas se distribuyen desde Arica al Cabo de Hornos, desde la zona intermareal hasta unos 20 m a 50 m de profundidad, por lo que su impacto en mitigación es amplio en el océano. Estos bosques marinos también son muy importantes como refugio para otros organismos, contribuyen a desacelerar la desoxigenación y acidificación de los océanos, y son moduladoras de la energía que llega a la costa, entre otros cobeneficios. Sin embargo, este ecosistema enfrenta importantes y crecientes amenazas, en gran parte derivadas de la pesca artesanal y la ilegal.

Los avances actuales de conservación marina no han estado enfocados en los ecosistemas de bosques de algas. En el océano Austral existen enormes parques marinos, como Cabo de Hornos (140.000 km^2) o Islas Diego Ramírez y Paso Drake (144.000 km^2); sin embargo, estos albergan solo una pequeña fracción de bosques de macroalgas presentes en Chile. El resto de la zona costera, donde se distribuye la mayor densidad de bosques de algas, cuenta con menos de 2% de protección. Obviamente, este porcentaje incluye todos los ecosistemas costeros, de los cuales los bosques son solo una pequeña fracción, por lo que el nivel de protección de estos valiosos ecosistemas es aún menor.

En general, los hábitats templados a polares donde ocurre *M. pyrifera* se caracterizan por ser ecosistemas dinámicos y con una importante estacionalidad, especialmente en la Patagonia Sur. Los ecosistemas de macroalgas poseen una alta estabilidad, al menos en los últimos 45 años (Friedlander et al., 2020), y posiblemente esta condición se extienda desde los reportes de Darwin (1882), dada la alta capacidad de adaptación local de los bosques de macroalgas australes, que les permite resistir al cambio climático (Palacios et al., 2021). Este escenario posiciona a la Patagonia chilena como un posible refugio climático para este tipo de macroalgas gigantes.

Potencial de mitigación

Si consideramos que las macroalgas son parte activa en la productividad primaria de los océanos (Hepburn et al., 2006; Graham, Vásquez & Buschmann, 2007; Reed, Rassweiler & Arkema, 2008), es innegable que este aporte debe ser sustentado por grandes cantidades de carbono inorgánico disuelto (CID) tanto autóctono como alóctono, que subsidian su fotosíntesis y crecimiento (Fernández, Hurd & Roleda, 2014). Gran parte del CID presente en los océanos está como HCO_3^- (91%) y CO_3^- (8%) y CO_2 (1%) (Roleda & Hurd, 2012), y solo el CO_2 y HCO_3^- pueden ser utilizados en los procesos fotosintéticos como fuente primaria de carbono (Fernández, Hurd & Roleda, 2014).

Las algas pardas son las especies con más rápida tasa de crecimiento en el mundo y superan con creces las de las plantas terrestres; en términos de toneladas por hectárea por año, son mayores que las plantaciones de eucaliptos. Por ejemplo, el crecimiento de un alga gigante es más rápido que el del bambú, a una tasa de entre 7 cm y 14 cm por día, pudiendo incluso llegar a medio metro al día en condiciones ideales.

Existe una gran brecha de conocimiento global sobre el real potencial de estas comunidades de macroalgas respecto a la captura y secuestro de carbono atmosférico. En el hemisferio sur solo existe un gran metanálisis que estima el secuestro de carbono de comunidades macroalgales formadoras de bosques submarinos, los cuales son capaces de secuestrar entre 1,3 a 2,8 Tg C $año^{-1}$ (Filbee-Dexter et al. 2020). Entonces, si consideramos la gran cantidad de bosques de macroalgas pardas presentes en el hemisferio sur, y en particular al sur de la ecorregión chiloense, nuestro país tiene un lugar privilegiado, ya que podría convertirse en una potencia global en el secuestro de carbono. Esto potenciaría a los bosques de macroalgas parda como una importante SBN frente al cambio climático.

Existen esfuerzos recientes destinados a cuantificar la abundancia y cobertura de los bosques de *Macrocystis pyrifera*. Mora-Soto et al. (2020) han estimado las superficies globales ocupadas por macroalgas a partir de algoritmos y filtros aplicados a imágenes satelitales. Dichos autores estimaron que la superficie cubierta de macroalgas gigantes junto con algas verdes en la ecorregión de canales y fiordos patagónicos (provincia magallánica) es de 4.841 km^2, el doble o triple de área que regiones biogeográficas similares como el Pacifico nororiental (costas de Alaska y Oregón). Considerando el área cubierta y recientes estimaciones de biomasa o *standing stock*,[3] la cantidad de carbono secuestrado en sedimentos costeros chilenos representa un mecanismo de mitigación que supera la de bosques y plantaciones terrestres (**figura 1**).

Cobeneficios

Los principales cobeneficios de mitigación y adaptación de los ecosistemas marinos, ampliamente reportados en la literatura científica, son:

- Capturan y almacenan cantidades significativas de dióxido de carbono.
- Amortiguan los eventos de deoxigenación, ya que producen cantidades significativas de oxígeno asociadas la fotosíntesis.
- Previenen la acidificación del océano por la captura activa de CO_2 atmosférico, el cual es utilizado en los procesos fotosintéticos de este tipo de macroalgas.
- Proveen efectos paliativos y ayuda a la adaptación frente a eventos climáticos extremos como marejadas y oleaje, además de mitigar la erosión de los ecosistemas costeros: en el hemisferio norte se ha comprobado que los bosques de *Macrocystis pyrifera* son capaces de minimizar el impacto del oleaje en un tercio (Rosman, 2013).
- Generan hábitats que proveen de refugio, alimentación y reproducción para un gran número de especies y biodiversidad.
- Son espacios de reclutamiento larval (soporte físico), incluidas especies de importancia.
- Tienen efectos paliativos indirectos sobre la salmonicultura, al asimilar y metabolizar excesos de carbono y nitrógeno provenientes de esta industria.
- Actúan como biofiltros, tanto de origen continental como atmosférico, depurando las aguas marinas costeras y submareales someras de metales pesados y compuestos orgánicos, los cuales afectan la salud marina ecosistémica y aumentan la susceptibilidad al cambio climático (Oyarzo-Miranda et al., 2020; Contreras et al., 2016; Contreras, Moenne & Correa, 2005; Contreras et al., 2007).
- Disminuyen la temperatura gracias al efecto sombra, lo que ayuda a paliar el calentamiento global.
- Sirven como refugio climático para organismos marinos. En el actual escenario de crisis climática existe evidencia científica en Oceanía que comprueba la utilización de los ecosistemas de bosques de macroalgas como refugio climático, principalmente en áreas costeras impactadas por la acidificación de los océanos (Ling et al., 2020).
- Proveen identidad local y regional, al estar presentes como elementos y ser parte de la dieta regular de varios pueblos originarios de América del Sur.

3 Comunicación con Mauricio Palacios, investigador de la Universidad Austral de Chile, Taller de Soluciones basadas en la naturaleza, 19 de marzo de 2021.

- Aportan belleza escénica.
- Promueven el turismo en zonas de importancia y con intereses especiales, como el avistamiento de ballenas (archipiélago de Humboldt). También son zonas preferidas para las actividades de buceo, debido a la alta diversidad de especies asociadas que presentan y la generación de espacios con aguas más transparentes.

A continuación, se han analizado las metas e indicadores separando la conservación y protección de bosques de algas pardas de su restauración y manejo.

5.3. Conservación y protección de bosques de algas pardas

Objetivo

Conservación de bosque de algas pardas para preservar el *stock* de carbono y su enterramiento y la biodiversidad como elementos claves para mitigar y adaptar el cambio climático.

Brechas de conocimiento

Chile no cuenta con un inventario de bosques de algas por especie de importancia; falta sistematizar y profundizar información sobre la densidad, la biomasa y la cobertura de los bosques de macroalgas con una metodología única y validada. En la misma línea, no existe un escalamiento de biomasas y tasas de producción primaria para estimar el secuestro o enterramiento de carbono y, con ello, un balance de carbono azul para Chile.

Falta información por especie sobre su capacidad de almacenar y enterrar carbono. Por ejemplo, si bien *Macrocystis* presenta una altísima tasa de crecimiento, *Lessonia* tiene mayor densidad en su biomasa, hundiéndose más fácilmente en el fondo del mar. Así se establecen diferencias en la tasa de enterramiento de carbono en el fondo marino.

Brechas de gobernanza

La Ley General de Pesca y Acuicultura solo considera al alga como un recurso, regulando en consecuencia su explotación. Así, en su artículo 9 bis, se otorga la facultad para que la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura establezca planes de manejo aplicables a todo o parte de una región o regiones (como el caso de Tarapacá, con la Resolución Exenta 3.344, de 2013). Dichos planes deben contener los aspectos señalados en el artículo 8 del mencionado cuerpo legal, entre los que se consideran los objetivos, metas y plazos para mantener o llevar la pesquería al rendimiento máximo sostenible de los recursos involucrados. Como puede apreciarse, la normativa no introduce elementos para asegurar la conservación del alga dado su rol frente a la adaptación y mitigación al cambio climático, lo cual representa una brecha que hay que ir subsanando.

Además, como se menciona en Farías et al. (2019) y Rehbein, Encalada & Barbosa (2020), es relevante contar con una legislación que destaque la importancia de los ecosistemas marinos para la acción climática. En Chile, los avances para la aprobación de la Ley Marco de Cambio Climático y el desarrollo de la Estrategia Climática de Largo Plazo sientan precedente para legislar en esta materia. En ambas instancias, es importante incluir el potencial de los océanos para que sean considerados como opciones de soluciones basadas en la naturaleza, movilizando a instituciones gubernamentales, gobiernos y comunidades locales para valorar sus aportes. En términos del marco financiero, el precio al carbono es crucial para aumentar los recursos disponibles y fortalecer los marcos normativo y regulatorio de conservación y explotación de algas pardas.

El país podría aumentar la ambición del precio al carbono e incrementar el monto y el alcance del impuesto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con miras a facilitar el financiamiento de proyectos de mitigación en el océano.

Por último, como brecha ampliamente reconocida, se encuentra la falta de monitoreo de ecosistemas de bosques de algas pardas como parte del servicio de la biodiversidad y el Observatorio de Cambio Climático, y en particular el Sistema Integrado de Observación del Océano Chileno (SIOOC).

Brechas tecnológicas

Para lograr una correcta evaluación de superficie de bosques de macroalgas, se necesita validar metodologías de sensoramiento remoto con otras, como imágenes de alta resolución (drones) o sonares para distintas regiones.

Metas

Se requiere implementar áreas marinas protegidas donde los bosques de macroalgas sean considerados como objetos de conservación prioritarios por sus cualidades ecosistémicas. Al proteger y conservar los bosques, se hace los mismo con la fauna asociada (siete veces más diversa que en bosques explotados), junto con prohibir la pesca de arrastre en áreas cubiertas por bosques de macroalgas.

Indicadores

Se recomienda como indicador lograr el 30% de protección de los ecosistemas marinos (superficie efectiva ocupada asociada a bosques de algas pardas) con alguna medida de conservación. Este indicador fue propuesto en la Convención de las Naciones Unidas sobre Diversidad, celebrada en octubre de 2021, y apunta a proteger al menos el 30% del océano para 2030 para lograr tanto la conservación de la biodiversidad como las metas de mitigación climática (Sala et al., 2021).

Otro indicador sería lograr una densidad de algas considerada ecológicamente óptima para mantener la biodiversidad y la función ecosistémica, y una tendencia (pendiente) positiva o neutra de superficie y densidad de bosques de algas, de modo de asegurar crecimiento, captura y almacenamiento positivos y efectivos de carbono.

A su vez, se sugiere mantener parámetros poblacionales y ecosistémicos propios de las ecorregiones y anteriores a los períodos de explotación (en el caso de bosques explotados). Estos parámetros se deben considerar en relación al tamaño de disco frente a su longitud, la densidad y la madurez de los bosques.

Horizonte de implementación

Se contempla un horizonte de 3 a 5 años, basado en el potencial de las macroalgas, su tasa de crecimiento y de longevidad.

Recomendaciones

Dadas las brechas identificadas, se recomienda crear un inventario nacional por especie de algas, con metodología estandarizada y que incluya información de densidad y biomasa y otros parámetros ecológicos.

También se recomienda definir algunas regiones para medir *in situ* la fotosíntesis y estimar la captura de carbono.

Por último, se recomienda crear o buscar internacionalmente una línea de financiamiento al pago por servicios ecosistémicos asociados a los bosques de algas pardas en su contribución a la mitigación y adaptación (proyectos de carbono azul).

5.4. Restauración y manejo de bosques de algas pardas

La destrucción de bosques de algas avanza a tasas alarmantes, lo cual se explica por la sobreexplotación de carnívoros, la cosecha de algas y la falta de fiscalización. En 2019, el huiro llegó a ocupar el tercer lugar en el podio de los tres recursos con mayor nivel de pesca ilegal en Chile (Sernapesca, 2020). Además, la remoción de peces e invertebrados que habitan los bosques puede generar enormes consecuencias en los ecosistemas. De hecho, la pesca de carnívoros ha generado importantes cambios en la abundancia de herbívoros, los que ahora ejercen una mayor presión sobre los bosques, lo que ha cambiado su follaje.

La cosecha de algas y la forma de explotación en zonas submareales (hasta aproximadamente 20 m) es una realidad preocupante para las costas de Chile, que desconoce la real magnitud del impacto y sus recientes y futuras consecuencias. Estudios en curso muestran que los parches explotados no se recuperan después de dos años de la cosecha, muy posiblemente por las consecuencias ecológicas de la redistribución de organismos herbívoros asociados a estas macroalgas (Pérez-Matus et al., 2017). En Chile, las especies de macroalgas están bajo una fuerte y creciente presión de explotación, principalmente para la producción de alginato y como fuente de alimento para el abalón del norte. Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable ya fue publicado por Buschmann et al. (2013). A la fecha no existen progresos regulatorios o normativos sustantivos.

Otro aspecto a considerar es que a nivel global existe una pérdida acelerada de estos ecosistemas, y en Chile solo se acentúa en el norte del país, principalmente por el deficiente manejo de las pesquerías de macroalgas pardas (Krumhansl et al., 2016). Esta pérdida de bosques ha sido dramática en Oceánica y América del Norte, por efecto del alza de las temperatura medias del mar (Filbee-Dexter et al., 2020), panorama que no se está manifestando en el extremo austral de nuestro país, pues *Macrocystis pyrifera* ha logrado generar estrategias fisiológicas de aclimatación muy eficientes (Palacios et al., 2021), que le han permitido sobrellevar el impacto del cambio climático en los océanos australes y así mantener su estructura poblacional y su función ecosistémica intacta durante los últimos 45 años aproximadamente (Friedlander et al., 2020).

La degradación y pérdida de hábitats naturales debido a las actividades humanas es una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad mundial, también asociada al cambio climático. Sin embargo, la urbanización costera también está provocando una disminución significativa de las algas marinas, especies claves que forman el hábitat marino. Las zonas a repoblar, cultivar y por consiguiente a restaurar deben estar basadas en los informes de más de quince años desarrollados por Sernapesca y Subpesca.

Objetivo

Asegurar el manejo sustentable de bosques de algas pardas en ecorregiones sujetas a la explotación del recurso.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Si bien existen estudios sobre el estado actual de todas las pesquerías y recomendaciones para cada una (proyectos FIPA), se necesitan modelos ecológicos y tróficos (herbivoría) para manejarlas mejor.

Respecto de la gobernanza, se necesita revisar y asegurar el principio ecosistémico y precautorios en pesquerías bentónicas (Ley de Pesca y Acuicultura) y aumentar la fiscalización y la extensión de los comités de manejos de macroalgas parda en gran parte del territorio nacional donde se lleve a cabo algún tipo de actividad extractiva. Una solución puede ser reforzar el comanejo de los recursos de grandes algas pardas mediante la adopción de planes de manejo en áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB), el incentivo a la generación de nuevas áreas o la extensión de las existentes.

Además, falta articulación entre la Armada de Chile y Sernapesca en los procesos de fiscalización y detección de incumplimientos en áreas marinas protegidas. Se debe dar mayor empoderamiento, atribuciones y capacidades complementarias de monitoreo y fiscalización para los administradores de áreas protegidas. Estas atribuciones significarán un aumento significativo de la efectividad de los proyectos asociados a protección y manejo sustentable de los recursos.

Por último, se necesita definir un reglamento asociado a la Ley de Repoblamiento de Algas (Ley 20.925), que tiene por objeto aumentar la biomasa disponible de recursos algales de importancia ecológica y económica existentes en el territorio nacional mediante el establecimiento de un sistema de bonificación, el cual permite cambiar la matriz productiva actual del sector alguero de extracción, por medio del cultivo o repoblamiento. En este contexto, la Ley 20.925 es una herramienta importante para evitar la sobreexplotación y promover la recuperación de las poblaciones naturales de macroalgas marinas, permitiendo así desarrollar diferentes actividades como cultivo y repoblamiento; sin embargo, estas herramientas públicas no han sido bien aprovechadas, debido a la falta de tecnologías disponibles que sean escalables, repetibles e inocuas con el ambiente, lo que ha dificultado la puesta en marcha de programas de repoblamiento o cultivo.

Entre las brechas tecnológicas, las tecnologías del repoblamiento de estas especies son insuficientes para ser masificables actualmente en Chile. Se necesitan estudios para poder implementar futuras investigaciones de cultivos de macroalgas para repoblamientos efectivos. Las algas comercializadas provienen de poblaciones naturales y no se han establecido cultivos masivos de las especies involucradas; existen iniciativas de cultivo, pero esto no ha sido escalado lo suficientemente para representar una ventaja costo-efectiva.

Por último, se necesita desarrollar un plan de financiamiento para proyectos de carbono azul. Los proyectos de restauración y protección pueden ser sostenibles para movilizar financiamiento climático. La Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO, por sus siglas en inglés) trabaja desde 2018 con la Asociación de la Cuenca del Océano Índico (IORA, por sus siglas en inglés) en esta área.

Metas

Implementación por parte de Subpesca, Sernapesca y el Ministerio del Medio Ambiente de un sistema de restauración basado en el repoblamiento y el manejo de especies de importancia ecológica, que sean claves en los procesos de mitigación al cambio climático. Debe incluirse un sistema para cada una de las especies, como el huiro negro (*Lessonia spicata*), el huiro palo (*Lessonia trabeculata*) y el huiro canutillo (*Macrocystis pirifera*).

Indicadores

Como indicadores, se propone, primero, aumentar el porcentaje de zonas repobladas y cultivadas mediante la implementación de proyectos de acuicultura, con seguimiento de manejo. Segundo, desacelerar en 50% la tendencia a pérdida de bosque de algas pardas y establecer vedas temporales para frenar el proceso de «juvenilización» de bosques de algas pardas en distintas provincias biogeográficas de Chile, donde existe una explotación del recurso bentónico. Tercero, restaurar el 30% de la superficie de área degradada en un horizonte de diez años. Por último, se propone repoblar con cultivos a gran escala aquellos bosques que han mostrado más de 40% de pérdida en densidad (sobre una línea base de 1990, previa al *peak* de explotación).

Horizonte de implementación

Dada la tasa de crecimiento de las macroalgas y la longevidad, el horizonte de implementación debe ser entre 3 a 5 años.

Evaluación económica

Chile es un importante productor de algas pardas, que representan el 10% del suministro mundial. La pesquería artesanal de algas pardas en nuestro país se ha constituido como una importante actividad comercial del sector costero y en la actualidad, por su gran importancia económica y social, sustenta muchas comunidades de recolectores de orilla y buzos.

Los desembarques de algas marinas chilenas fluctuaron entre 40.000 toneladas año^{-1} a principios de la década de 1980 y 300.000 toneladas año^{-1} a 2013, año de máximo desembarque (Vasquez et al., 2016). Posterior a esta fecha, la tasa de desembarque se ha mantenido (IFOP, 2019).

El reporte más completo del valor económico de las poblaciones de algas silvestres en el norte de Chile (26° a 32° S) fue publicado por Zúñiga-Jara et al. (2009) y actualizado por Vasquez et al. (2014). En estos, usando varios indicadores económicos, se evaluaron, además del valor comercial como fuente de materias primas para la extracción de alginato, el valor de un grupo de algas pardas de importancia económica (*Lessonia spp.* y *Macrocystis pyrifera*) en términos de: i) el valor de mercado de la biomasa como fuente de materia prima para la extracción de ácido algínico; ii) el valor de mercado de especies asociadas de importancia

económica; iii) el valor como fuente de información científica; iv) el valor como amortiguador climático (captura de CO_2 y liberación de O_2); v) el valor de la biodiversidad asociada (especies no comerciales); vi) el valor como patrimonio cultural; y vii) el valor como reserva de biodiversidad.

Los resultados indican que los lechos de algas en el norte de Chile tienen un valor total de USD 540 millones. De este total, la pesca de algas marinas representa el 75% y las pesquerías de especies asociadas representan el 15%. En este contexto, el valor económico de los lechos de algas chilenas se asocia principalmente a la industria de extracción de alginato. Por el contrario, el valor de existencia como fuente de información científica o amortiguador ambiental para la captura de CO_2 o la producción de O_2 representa solo el 9% del valor total, lo que representa una importancia relativa muy baja para la sociedad. La valoración económica de los recursos costeros y los ecosistemas marinos es una herramienta complementaria para la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas relacionadas con la conservación y explotación sostenible de los recursos renovables y sus ecosistemas.

Relación con instrumentos de política pública

La protección de los bosques de macroalgas se relaciona con otros instrumentos, como la Ley de Pesca y los comités de manejo.

5.5. Protección y reducción de la degradación de la bomba biológica de carbono

El carbono inorgánico (CO_2), principal gas de efecto invernadero en la atmósfera, es capturado por los microorganismos autótrofos —por medio de la fotosíntesis—, y a través de las tramas tróficas, al ser consumidos por el krill y otros organismos del zooplancton. Los organismos del zooplancton como el krill austral producen una gran cantidad de *pellets* fecales y exuvias (exoesqueletos), que son vehículos que «exportan» carbono orgánico particulado (COP) al fondo del océano, en donde es almacenado por los organismos bentónicos —por décadas a centurias— o reciclado por bacterias (Cavanagh et al., 2021), en lo que se ha llamado la *bomba biológica de carbono*. Por lo tanto, proteger y evitar la degradación de la bomba biológica es importante para evitar transformar un sumidero de CO_2 en fuente de CO_2. Para la protección de la bomba biológica, se deben identificar los denominados refugios climáticos, en especial en la Patagonia chilena y el océano Austral.

Un *refugio climático* se define como aquellas áreas que, por sus particulares características geoclimáticas, una condición poco alterada de sus ecosistemas o una menor presión de uso, poseen cierta capacidad de amortiguar los efectos negativos del cambio climático, que se manifiestan con mayor rigor en otras áreas. Esta condición permite la viabilidad de sus ecosistemas y especies, dentro de ciertos límites. También pueden considerarse refugios aquellas áreas cuyo patrón climático tendencial, sumado a una menor presión de uso, ofrece condiciones para albergar especies que están siendo afectadas negativamente por el cambio climático en su actual rango de distribución (MMA, 2017). La identificación de estas áreas debe permitir ser el refugio para las especies ante una diversidad de estresores ambientales; y mantener o recuperar, según sea el caso, el rol de sumidero de carbono y regulador del clima, como medida fundamental en un escenario de cambio climático.

Roman & McCarthy (2010) mencionan que los grandes cetáceos fertilizan la zona fótica de los océanos alimentándose de presas meso y batipelágicas y defecando heces líquidas en superficie. De esta forma, translocan nutrientes que limitan la productividad primaria (como nitrógeno y hierro) desde las profundidades a aguas superficiales, estimulando una nueva y recurrente producción primaria, con la consiguiente exportación de carbono al océano profundo. La restauración de las poblaciones de ballenas podría aumentar la productividad al hacer disponibles nutrientes limitantes en aquellas áreas consideradas bajas en clorofila, incrementando la disponibilidad de hierro y nitrógeno en la zona fótica de los océanos (Nicol et al., 2010; Doughty et al., 2015). Por su parte, Lutz & Martin (2014) y Lutz et al. (2018) extienden el efecto de los vertebrados sobre la regulación y almacenamiento del carbono atmosférico, argumentando que al menos nueve procesos ecológicos mediados por los vertebrados marinos —escasamente explorados en los modelos tradicionales del ciclo biogeoquímico del carbono— pudiesen tener un rol relevante.

La evidencia reciente sugiere que los vertebrados marinos —y las ballenas en particular— pueden desempeñar un papel desproporcionadamente importante en los flujos de carbono marino, cuyas magnitudes podrían rivalizar con aquellas estimaciones de almacenamiento de carbono más tradicionales. Con altas demandas metabólicas y grandes poblaciones, probablemente tuvieron una fuerte influencia en los ecosistemas marinos antes del advenimiento de la caza industrial de ballenas, como consumidores de peces e invertebrados, como presa, como reservorios y vectores de nutrientes y como fuentes detritales de energía y hábitat en las profundidades del mar, un conjunto de procesos ecológicos denominado *carbono de ballenas*. Entre estos, la hipótesis del «bombeo de las ballenas» se basa en que todas las ballenas se sumergen para alimentarse y regresar a la superficie para respirar. En la superficie, liberan plumas fecales flotantes que son ricas en nutrientes limitantes que el fitoplancton necesita para crecer. Por lo tanto, las ballenas fertilizan de manera recurrente la zona fótica durante cada temporada de alimentación. La disminución en el gran número de ballenas debido a la caza en el siglo pasado (estimada en 90%) probablemente alteró la estructura y la función de los océanos. En algunas especies, la recuperación ya está en marcha, pero la mayoría aún enfrenta desafíos que impiden maximizar su tasa de crecimiento de la población, incluyendo colisiones con barcos, enredos en artes de pesca, ingestión de

desechos plásticos y contaminación acústica. Estimaciones recientes indican que, como mínimo, incluso un aumento del 1% en la productividad del fitoplancton gracias a la actividad de las ballenas capturaría cientos de millones de toneladas de CO_2 adicionales al año, lo que equivale a la aparición repentina de 2.000 millones de árboles maduros.

En este sentido, la Patagonia chilena representa una región donde confluyen criterios para la creación de refugios climáticos (Castilla, Armesto & Martínez-Harms, 2021), ya que representan sitios donde la bomba biológica es muy activa y conlleva a un alto grado de exportación y secuestro de carbono (Iriarte, González & Nahuelhual, 2010; Torres et al., 2011). Hucke-Gaete (2011) destaca el estudio del funcionamiento de estos ecosistemas marinos, que cuentan con una alta abundancia de grandes cetáceos alimentándose en estas aguas. Además, las especies de crustáceos claves de estas áreas de altas latitudes (krill, langostinos) consumen un amplio espectro de partículas que concentran en productos de desecho (por ejemplo, *pellets* fecales) que transportan grandes cantidades de carbono orgánico a zonas profundas del océano, potenciando la bomba biológica de carbono en el período productivo (González et al., 2016). Los actuales factores de estrés en el ecosistema marino están perjudicando a distintas especies, obligándolas a emigrar, adaptarse o bien extinguirse (Henson et al., 2017), lo cual altera el manejo sustentable de distintas actividades como las pesquerías y el turismo.

El océano Austral es responsable de la captación de una buena parte de las emisiones de CO_2 de origen antropogénico. Además, es una zona donde se forman masas de agua profundas y se oxigenan las aguas de las cuencas oceánicas (Sallé et al., 2012). El océano Austral ofrece un sinnúmero de beneficios y servicios ecosistémicos ligados a la pesca (como el krill y el bacalao), turismo y obtención de productos de interés biotecnológicos (Grant et al., 2013).

Potencial de mitigación

Si tenemos aproximadamente entre 250 Mt y 380 Mt de krill antártico, y estamos pescando entre 0,6 Mt a 5,6 Mt año^{-1} —lo estimado y lo máximo permitido— en el área 48 de la península Antártica, el impacto de la pesca está muy por debajo de los límites permitidos. Sin embargo, de cualquier modo, estamos disminuyendo el flujo de *pellets* de krill entre 2 y 17 mg C m^{-2} d^{-1} (Cavan et al., 2019). El krill también genera un flujo de carbono en exuvias similar al de los *pellets*, lo que sumados representa una contribución del 87% del flujo de COP anual en la Antártica (Manno et al., 2020).

A pesar de que el mecanismo de la bomba biológica de carbono está bien documentado, existen incertidumbres relativas a cómo podría cambiar el flujo de carbono secuestrado a medida que aumentan la temperatura del océano y los volúmenes de pesca.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Existe limitada capacidad de observación de largo plazo (series de tiempo). Se requiere instalar una red de observación de la exportación y secuestro de carbono en el sistema de la corriente de Humboldt, Patagonia y Antártica.

En la Antártica, se requiere un programa de monitoreo de variables oceanográficas y atmosféricas que provean series de tiempo no limitadas a muestreos puntuales desarrollados por investigaciones en el marco de proyectos específicos. Un paso para subsanar esta brecha es el Programa de Gradiente Latitudinal, impulsado por el Instituto Antártico Chileno (Inach), organismo técnico dependiente del Ministerio de Relaciones Exteriores. En este programa se instalarán estaciones meteorológicas automáticas y otros sensores radiométricos en sitios cercanos a bases antárticas, con el fin de generar datos públicos que serán insumos para tomadores de decisión y para el proyecto de Observatorio de Cambio Climático liderado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Es necesario el desarrollo de una nueva generación de trampas de sedimento, además del monitoreo del fondo marino con cámaras, para estimar el carbono orgánico lábil proveniente de microalgas como diatomeas (*food banks*) y flujo de krill hacia zonas de acumulación en la península Antártica (*hotspots*). También es necesario mejorar las mediciones de almacenamiento de carbono en el fondo marino (bentos), ya que en vastas zonas de Antártica aún no se ha medido el nivel de acumulación de carbono.

Por otra parte, falta personal especializado en la mantención y calibración de estaciones de monitoreo en sistemas acuáticos.

A la fecha, los modelos para estimar cuantitativamente el rol de los nutrientes derivados de las ballenas en la producción primaria se han basado sobre todo en parámetros teóricos y en un número muy limitado de mediciones de campo para probar la sensibilidad del modelo a la incertidumbre actual de los parámetros. Se desconoce el tamaño y tendencia poblacional de ballenas en Chile. Se requieren más estudios dirigidos a cuantificar la captura y secuestro de carbono en fiordos chilenos. Se necesita aprobar el proyecto de ley del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y asegurar financiamiento para áreas marinas protegidas.

Horizonte temporal de implementación

Estos efectos de la bomba biológica de carbono como agente mitigador del cambio climático deberían ser analizados en escalas mayores a una década.

Cobeneficios

La bomba biológica de carbono es muy importante en la captura, exportación y secuestro de una parte del CO_2 al océano profundo, en donde es incorporado por organismos bentónicos (asociados al fondo), para finalmente ser secuestrado y enterrado por miles de años.

En el contexto de carbono azul oceánico de las ballenas, la biomasa y la captura carbono y el secuestro al morir (*deadfall carbon*) representan valores importantes en el presupuesto de carbono oceánico. Respecto a los grandes cetáceos, esto representa una oportunidad para el ecoturismo, al igual que la belleza escénica y el valor cultural que representa los fiordos chilenos de Patagonia.

Metas

La efectividad de la bomba biológica de carbono como elemento mitigador se podría estudiar en los incrementos de carbono orgánico exportado (como agregados de microalgas, *pellets* fecales, exoesqueletos de krill, etcétera) en estudios de series de tiempo (estimado como incrementos en mg C m^{-2} d^{-1}) de largo período (de años a décadas).

Una segunda meta sería potenciar el rol de las ballenas y los fiordos en la captura de carbono.

Indicadores

Algunos indicadores serían:

- Se registran tasas de crecimiento poblacional positivas para ballenas en Chile.
- La mortalidad antropogénica de ballenas se reduce a cero.
- Los fiordos de la Patagonia chilena son restaurados y protegidos, minimizando la actividad industrial que se desarrolla en ellos.
- Evaluaciones cuantitativas de la efectividad de las áreas marinas protegidas en el contexto de cambio climático.
- Aumentar en 30% la representatividad de las áreas marinas protegidas en que se identifican criterios para el establecimiento de refugios climáticos.

Relación con instrumentos, políticas existentes y el sector económico

En la actualidad, existe explotación comercial de krill antártico —con participación de un buque con pabellón chileno—, la cual es regulada por una serie de medidas de conservación acordadas por la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), en que Chile participa activamente en la Comisión (representado por Dirantarica) y en el Comité Científico (representado por Inach). La protección de organismos asociados a fondos está regulada por medidas de conservación acordadas por la CCRVMA, que prohíben la pesca de fondo y la protección de hábitats bentónicos y ecosistemas marinos vulnerables.

5.6. Protección del fondo marino

Dado que el carbono es capturado y secuestrado por distintos ecosistemas marinos (surgencias, fiordos, bosques y marismas) a través de la bomba biológica o el hundimiento o entrenamiento de biomasa en sedimentos marinos adyacentes a estos ecosistemas, proteger el suelo marino se vuelve imprescindible. El proceso de enterramiento, por su magnitud y extensión, tiene un rol fundamental en la mitigación al cambio climático y está asociado directamente a la regulación del clima planetario.

En la actualidad, existen dos grandes amenazas que pueden poner en riesgo la capacidad del océano para enterrar carbono, ya que destruyen la estructura vertical de los sedimentos y pueden resuspender parte del carbono que había sido acumulado y enterrado.

La primera de estas amenazas es la *pesca de arrastre*. A nivel global, se estima que cerca del 1,3% del fondo marino es perturbado por la pesca de arrastre, y que esta actividad resulta en alrededor de 1,47 Gt de emisiones de CO_2 al año, equivalente al 15% a 20% del CO_2 atmosférico absorbido por el océano global cada año, y es comparable a las estimaciones de pérdida de carbono en suelos terrestres causadas por la agricultura (Sala et al., 2021). En Chile existen a la fecha algunos proyectos de reforma en el sector pesquero y acuícola en tramitación que incluyen la restricción (Boletín 12.937-21) y la prohibición (Boletín 13.019-21) de la pesca de arrastre para capturar merluza común.

En segundo lugar, la *minería submarina* es una de las mayores amenazas del fondo marino, por cuanto altera la estratigrafía, estructura y su capacidad de secuestrar carbono. Esta es definida como un conjunto de operaciones relativas a la prospección, exploración, explotación y procesamiento de depósitos minerales en los sedimentos o subsuelo del océano, e incluye el depósito de residuos mineros generados en el continente (relaves) o en el mismo océano. Hoy existe un gran interés a nivel internacional por explotar recursos minerales —sobre todo metales— en el lecho y el subsuelo de los océanos, debido a la creciente escasez de materia prima en el sistema continental. En términos de explotación de los recursos, esta actividad presenta grandes desafíos tecnológicos, que han sido abordados en la presente década. Por ahora, la minería submarina no ha tenido un amplio desarrollo, probablemente debido a su aparente baja viabilidad o rentabilidad económica en algunos casos. En concreto, el desarrollo de la

minería submarina en la zona económica exclusiva de Chile tendría efectos directos sobre el secuestro de CO_2, en especial en la zona costera, ya que perturbaciones del fondo marino por esta actividad tenderían a revertir tal secuestro, junto con el potencial de alterar, en forma prolongada y significativa, los ecosistemas marinos y el clima de planeta. En particular, tales efectos se podrían concentrar en las áreas metalogénicas, como: i) la dorsal de Chile, zona de atracción para la exploración de depósitos de sulfuros polimetálicos de origen hidrotermal, especialmente en su extremo oriental (península de Taitao); ii) las zonas circundantes a las islas de Juan Fernández, San Félix y San Ambrosio y los montes submarinos, que presentan condiciones favorables para la formación de nódulos polimetálicos (Morales, 2014); iii) Magallanes y otras regiones, por la explotación de hidratos de gas metano para uso de combustibles fósiles en el sector energía, y que conllevará un claro conflicto ambiental (Roig Monge, 2014), explotación que estaría fuera de toda estrategia de largo plazo de cambio climático y de la carbono neutralidad planteada para Chile.

En síntesis, proteger a los fondos marinos implica:

- Conservar los hábitats en las zonas costeras y en la zona económica exclusiva en general.
- Conservar la biodiversidad marina en los fondos en la zona económica exclusiva.
- Reducir los efectos negativos sobre los recursos marinos (bentónicos) en la zona económica exclusiva.
- Proteger a la fauna bentónica.
- Evitar la resuspensión de sedimento y metales tóxicos absorbidos a esta matriz.

Recomendaciones

Proteger los ecosistemas marinos es una importante SBN por el rol central que juega el océano como sumidero de CO_2, tiene cobeneficios para la preservación de la biodiversidad marina y proporciona valiosos recursos alimentarios. Una herramienta efectiva para estos objetivos es declarar áreas marinas protegidas (AMP) (Sala et al., 2021). Según el informe de Calisto, Muñoz & Astete (2020), la mayoría de las áreas marinas protegidas en Chile están ubicadas en territorio insular: el 91% de la superficie total de áreas marinas protegidas están en el océano abierto, mientras que solo el 9% corresponde a áreas costeras. La región con mayor representación de protección es la de Valparaíso; sin embargo, si contamos solo las áreas costeras, la región con mayor representatividad es Aysén, con la protección de aproximadamente 6950 km^2, de los cuales 6.700 km^2 son la zona marina costera de caleta Tortel (área marina costera protegida de múltiples usos, AMCP-MU).

Se recomienda ampliar las áreas marinas protegidas a otras ecorregiones, ya que, debido al gradiente latitudinal de condiciones ambientales frente a las costas de Chile, cada región tiene condiciones únicas y, por lo tanto, especies que son exclusivas de cada región (Thiel et al., 2007).

Bosques de macroalgas. Las áreas costeras albergan áreas importantes para la reproducción, el reclutamiento y el crecimiento, y por lo tanto son también altamente productivas y ricas en áreas de captura de peces y recursos bentónicos.

Se recomienda la protección, en mayor porcentaje, de áreas donde las macroalgas son parte importante del ecosistema para la conservación, con beneficios para la pesca.

Se recomienda aumentar la fiscalización y la extensión de los comités de manejos de macroalgas parda en gran parte del territorio nacional donde se realice algún tipo de actividad extractiva, sobre todo en la macrozona norte, para garantizar una adecuada gestión y seguimiento de la actividad.

Se debe reforzar el co-manejo de los recursos de grandes algas pardas mediante la adopción de planes de manejo de estos recursos en áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERB), el incentivo a la generación de nuevas áreas y la extensión de las existentes.

También se recomienda definir reglamento asociado a la Ley de Repoblamiento de Algas (Ley 20.925), publicada en el *Diario Oficial* el 17 de junio de 2016, teniendo por objeto aumentar la biomasa disponible de recursos algales de importancia ecológica y económica existentes en el territorio nacional, mediante el establecimiento de un sistema de bonificación el cual permite cambiar la matriz productiva actual del sector alguero de extracción, por medio del cultivo o repoblamiento.

Bomba biológica de carbono. Se recomienda establecer el área marina protegida en la península Antártica y sur del mar de Scotia (AMP Dominio 1), liderada por los institutos antárticos chileno y argentino, la cual otorga protección a gran parte del área 48, zona donde se concentra la mayor población de krill y el 70% de la pesquería de krill antártico. Además, es donde se han registrado importantes hábitats bentónicos (Delegaciones de Argentina y Chile, 2020). Un área marina protegida contribuiría a proteger la bomba biológica de carbono en la zona.

Se recomienda avanzar en la creación de nuevos sistemas de monitoreo con una red de estaciones *in situ* para medir variables atmosféricas y oceanográficas.

Se recomienda financiar estudios que consideren la sensibilidad y respuesta del flujo de carbono secuestrado por la bomba biológica a cambios en la temperatura del océano y los volúmenes de pesca.

Respecto a caracterizar e identificar refugios climáticos marinos, se recomienda elaborar un mapa con potenciales puntos de interés para la ciencia, con especial énfasis en la Patagonia chilena.

Se recomienda establecer figuras de protección marina o ampliar las existentes en aquellos sectores identificados con características de refugios climáticos para la biodiversidad marina

También se recomienda generar líneas de investigación para evaluar los cambios que permitan mantener y fortalecer la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de los océanos ante el cambio climático.

A su vez, se recomienda propender a la valoración de la función ecosistémica de los vertebrados marinos (*oceanic blue carbon*) y su rol ecológico como sumideros de carbono del océano.

Por último, se recomienda promover un aumento del conocimiento de los cobeneficios que tiene el rol de los vertebrados marinos a través de diversos procesos ecológicos, a nivel de políticas públicas y sus implicancias en la población.

Protección del fondo marino. Se recomienda asegurar la protección del suelo marino de las amenazas de la actividad de minería submarina en la zona económica exclusiva chilena. Se trataría de una medida precautoria fundada en el principio *in dubio pro natura*, en virtud del cual, ante la duda de si una acción u omisión pueda o no pueda afectar al ambiente o los recursos naturales, las decisiones que se tomen deben ser en el sentido de protegerlos.

6. Ciudades

6.1. Antecedentes

Más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas, mientras que en Chile la cifra alcanza más del 87% (INE, 2018). El rol de las ciudades en el cambio climático ha sido un tema central en las discusiones en la última década, debido a que son una de las fuentes principales de emisión de carbono y, al mismo tiempo, están altamente expuestas a sus consecuencias.

A nivel global, las ciudades son responsables de entre el 30% y el 40% de las emisiones mundiales de CO_2, gran parte de ellas por el uso sostenido de automóviles que genera también otras externalidades, como contaminación atmosférica, congestión vehicular, obesidad, expansión del área urbana y la necesidad de un amplio uso de los espacios públicos. La gran mayoría de las ciudades han mostrado poca sensibilidad con los ecosistemas en que están insertos al momento de implementar soluciones que exigen infraestructura, por ejemplo, para reducir los riesgos socionaturales o para gestionar el drenaje urbano. Tradicionalmente, la inversión pública ha expandido la denominada *infraestructura gris* (que instala carpetas de hormigón donde antes había ecosistemas naturales), expandiendo las ciudades y deteriorando irreversiblemente los ecosistemas afectados. Cuando esta urbanización se ha llevado a cabo sin una planificación adecuada, ha exacerbado algunos riesgos asociados a este deterioro, por ejemplo, construyendo en humedales, en zonas aluvionales, en ribera de ríos, o en zonas con pendientes pronunciadas.

La geografía en que están enclavadas muchas de nuestras ciudades las hace especialmente vulnerables ante estas problemáticas, como el relleno y fragmentación de humedales costeros en ciudades (Rojas et al., 2019b). En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza han sido identificadas como posibles alternativas tanto para abordar una variedad de problemas urbanos, como por su potencial para lograr ciudades vibrantes, saludables, resilientes y sostenibles (Dumitru, Frantzeskaki & Collier, 2020). Entre las ciudades que han integrado SBN en su planificación y que han indicado sus beneficios se encuentran Rotterdam (Países Bajos), Malmö (Suecia), Londres (Reino Unido), Copenhague (Dinamarca), Seúl (Corea del Sur), Barcelona, Vitoria y Gasteiz (España).

Los impactos positivos de las SBN en ciudades se pueden distinguir en impactos medioambientales (por ejemplo, reducción de emisiones) y sociales (potencial de recreación) como resultado de la mayor inclusión de infraestructura verde. Dentro de los impactos socioambientales, las SBN pueden diseñarse como instrumentos de protección frente a eventos climáticos extremos (olas de calor e inundaciones) y para la conservación del hábitat, con foco en su capacidad y eficacia para mitigar los efectos del cambio climático en la población urbana (Cohen-Shacham et al., 2016), por lo que poseen un importante rol en la adaptación a los impactos del cambio climático sobre las personas. Por otro lado, aunque los efectos de las SBN en las comunidades aparecen como indirectos o secundarios, estos son fundamentales para lograr algunos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), por ejemplo, en relación con la salud de las personas, la equidad y la cohesión social.

Las estrategias asociadas a las SBN deben definirse según cada contexto urbano, ya que su impacto variará dependiendo de factores como la densidad urbana, los microclimas, las alturas edificatorias, los sistemas de transporte, etcétera. Asimismo, algunas estrategias tendrán efectos secundarios en la forma en que las ciudades se desarrollan, como cambios en la movilidad o patrones de crecimiento en zonas residenciales.

A continuación, desarrollaremos algunas estrategias de SBN para incorporar en el diseño y planificación de las ciudades.

6.2. Corredores verdes

Las infraestructuras urbanas —principalmente las de transporte— han afectado el equilibrio ecológico y han reducido la conectividad de los ecosistemas. Existe un número considerable de autopistas que han fragmentado humedales urbanos, por ejemplo, en Concepción (Rocuant-Andalién) y Valdivia (Angachilla). Por el contrario, sin una planificación adecuada, se pierde la oportunidad de identificar ejes de movilidad que podrían contribuir a los ecosistemas urbanos uniendo áreas verdes que de otro modo estarían aisladas.

Implementar corredores verdes permitiría no solo incrementar la cobertura verde en ciudades para la recreación, el bienestar psicológico y la movilidad activa de sus habitantes (caminata y bicicleta), sino también restaurar ecosistemas recuperando la conectividad ecológica de parches vegetacionales. En este tipo de iniciativas pueden incorporarse cerros isla, humedales urbanos, lagunas urbanas, ríos, riberas y lagos, entre otros, lo que permitiría a los ecosistemas potenciar su capacidad de secuestrar carbono, así como generar espacios que ayuden a la purificación de aire y provisión de hábitat para la biodiversidad. Dependerá de factores locales el que estas medidas generen o no cobeneficios en la reducción de la contaminación local en conjunto con la reducción de emisiones de CO_2, como quedó demostrado para China con la reducción de emisiones de CO_2 y la mejora en calidad del aire observadas por efecto de la reducción de movilidad e industrias por pandemia del covid-19 (Myllyvirta, 2020).

6.3. (Re)forestación de zonas urbanas

Diversas investigaciones han documentado los beneficios del arbolado urbano y áreas verdes para reducir los efectos de las islas de calor; sin embargo, su correcta utilización dependerá de las características de cada ciudad (edificaciones, clima, etcétera). Por ejemplo, Almeida et al. (2018) indican que las áreas verdes y parques sobre 250.000 m^2 pueden tener impactos positivos sobre la temperatura urbana, aunque no siempre es posible contar con grandes paños para este uso, menos en ciudades ya consolidadas. En estos casos, es posible obtener beneficios mediante parques urbanos de menor escala y repartidos en la ciudad (Bayulken, Huisingh & Fisher, 2021). En relación con los beneficios a una escala menor (microclima), Elmqvist et al. (2015) indican que un aumento del 10% del arbolado urbano en zonas con islas de calor en Manchester (Reino Unido) resultó en una reducción de la temperatura ambiente de 3 a 4 °C en el entorno directo, lo que contribuyó a reducir la energía utilizada en aire acondicionado. Por otro lado, un estudio sobre las diferencias de temperatura entre el parque La Ciudadela en Barcelona y su entorno adyacente (temperaturas máximas y mínimas dentro y fuera del parque) indica su capacidad de enfriamiento entre 0,9 y 5,2 °C, con una media de 2,7 °C dependiendo de la fecha, estación del año y condiciones atmosféricas (Moreno-García & Baena, 2019).

6.4. Manejo de aguas

Los ecosistemas acuáticos son corredores ecológicos en ambientes urbanos y periurbanos que proveen una variedad de servicios ecosistémicos a la ciudad, y por lo tanto deben ser protegidos. Estos ecosistemas incluyen no solo los cursos y cuerpos de aguas como cauces, humedales, lagunas y lagos, sino también las zonas riparianas y planicies de inundación, las quebradas, los piedemontes y la vegetación que se desarrolla en estos lugares. Estas áreas además contribuyen a contrarrestar los efectos adversos del cambio climático sobre la población (Rojas et al., 2019a, 2019b). A estos ecosistemas se agregan las SBN urbanas, las que permiten replicar el ciclo hidrológico natural prestando funciones hidrológicas y otros servicios ecosistémicos dentro de la red de drenaje. Un ejemplo de este tipo de soluciones es el High Line de Nueva York, un parque urbano del tipo de una pasarela verde y parque elevado sobre los rieles de una antigua vía ferroviaria.

Desde el punto de vista hidrológico, estas SBN pueden proveer una o más funciones importantes para la adaptación a escenarios de escasez hídrica. En primer lugar, existe la infiltración o capacidad para introducir aguas lluvias en los suelos, lo que permite reducir el número de eventos de escorrentía, junto con los volúmenes y caudales de agua lluvia superficial. Además, mediante una adecuada distribución espacial de las SBN, esta función permite incorporar aguas lluvias al sistema natural antes de que se ensucien con contaminantes depositados en las superficies urbanas. Ejemplos de SBN que incorporan infiltración son los jardines infiltrantes y los pavimentos permeables, los que podrían implementarse en muchas zonas impermeables de las construcciones del Estado.

En segundo lugar, está el almacenamiento o la capacidad para detener la escorrentía urbana por tiempos prolongados, lo que permite reducir los caudales máximos de aguas lluvias urbanas, que a su vez disminuye los impactos sobre la infraestructura de drenaje y sobre los ecosistemas acuáticos y su geomorfología, ubicados aguas abajo. Ejemplos de SBN que incorporan almacenamiento son los estanques de retención, que pueden estar implementados en plazas y parques.

En tercer lugar, se encuentra la conducción o capacidad para trasladar aguas lluvias con velocidades de escurrimiento bajas, producto de un diseño que incorpora secciones naturales y la presencia de vegetación y elementos de paisajismo. Una conducción provista por SBN permite reducir los caudales máximos hacia aguas abajo, con implicaciones similares a las descritas para la función de almacenamiento. Esta práctica permitiría complementar o reemplazar los sistemas de drenaje artificiales subterráneos,

los que son caros y poco flexibles en el tiempo, además de la recuperación de aguas grises. Ejemplos de SBN que incorporan conducción son los denominados parques fluviales —como el Parque de La Familia en la comuna de Quinta Normal, en Santiago—, zanjas con vegetación en costados de calles y canales urbanos superficiales.

Junto con esto, existe una gran oportunidad de incorporar el tratamiento de aguas grises para reutilizar en el riego de parques y cerros, además del ámbito domiciliario. Para lograrlo, se requiere que las obras hidráulicas incorporen estrategias verdes y que exista un plan de manejo de aguas en las ciudades que considere la separación de aguas grises de aguas negras. Aun cuando las consideraciones sobre el costo inicial de estas estrategias puede ser una desventaja, programas de educación ambiental, incentivos y demostración de los beneficios en el largo plazo pueden favorecer la adopción de este plan (incluyendo la reducción de costos en el uso de edificios y viviendas).

El Manual de Drenaje Urbano del Ministerio de Obras Públicas incorpora una variedad de SBN que implementan estas tres funciones hidrológicas, con procedimientos de diseño y ejemplos de aplicación. Estas soluciones deben comenzarse a aplicar masivamente en áreas urbanas pilotos que incluyan espacios para su implementación, como plazas, parques, estacionamientos y calles. Buenas ubicaciones para la aplicación de estos pilotos son todas aquellas ciudades con alta presencia de ecosistemas acuáticos (cauces, humedales, lagunas y lagos), donde el control de las aguas lluvias permitiría, además de reducir las inundaciones urbanas, controlar la calidad de estos ecosistemas, los que se ven negativamente afectados por el lavado superficial de contaminantes o el colapso de sistemas combinados (aguas servidas y aguas lluvias). Una excelente oportunidad para fortalecer la implementación de SBN es la reciente ley de humedales urbanos, la que permitirá incorporar en las inversiones estos espacios y potenciar su capacidad de regulación hidrológica en proyectos urbanos sustentables, mediante el llamado diseño sensible al agua.

6.5. Restauración de cerros isla urbanos y piedemontes

Las montañas y cerros son componentes fundamentales de la geografía chilena, y una formación bastante conspicua son los cerros isla y los piedemontes. Los cerros isla urbanos son aquellos que han quedado total o parcialmente inmersos en una ciudad, y corresponden a una elevación local de la superficie terrestre, delimitada en todo su contorno por un cambio de pendiente notorio, y que son vestigios de antiguas montañas ya erosionadas (Lugo, 2011). La restauración y reforestación de estos cerros es una solución basada en la naturaleza aplicable en las ciudades chilenas que permite multiplicar la capacidad de captura y almacenamiento de carbono, y además genera múltiples otros beneficios sociales y ambientales.

En doce ciudades chilenas se han contabilizado 69 cerros isla (Picón et al., 2020). Para implementar soluciones basadas en la naturaleza, se debe poner el foco en las ciudades localizadas en la zona centro y sur del país, cuyas condiciones climáticas hacen factible la restauración y reforestación. Desde Santiago al sur, hay 46 cerros isla urbanos, la mayoría de los cuales se encuentra en las áreas metropolitanas de Santiago (24) y Concepción (14). En cuanto a la cobertura del suelo, en Santiago, Rancagua y Talca (28 cerros en total) predominan los matorrales, seguidos por las praderas silvestres y otras coberturas. En Concepción, Temuco y Padre Las Casas, Puerto Montt y Coyhaique (18 cerros en total), el bosque nativo ocupa alrededor del 40% de la superficie de los cerros, seguido por matorrales y plantaciones forestales (Picón et al., 2020).

La capacidad de captura y almacenamiento de carbono depende de la cantidad de árboles que se establezcan en los cerros, y en el más largo plazo se podría sumar la capacidad de captura de los suelos, en la medida en que también se van restaurando mediante la forestación. En el área metropolitana de Santiago hay 24 cerros isla urbanos, que suman en total 5.534 ha, de las cuales 1.629 son susceptibles de restauración (Picón et al., 2020). Con una densidad de plantación de 700 árboles por hectárea —más baja que en ecosistemas nativos—, se podrían plantar poco más de 1.140.000 árboles. En el área metropolitana de Concepción se identificaron 14 cerros que suman 1.547 ha, de las cuales 346 carecen de cobertura arbórea. En esta superficie se podrían plantar 346.000 árboles. En Temuco y Padre Las Casas se pueden restaurar 339 hectáreas de los cerros Ñielol y Conun-Huenu, incorporando 339.000 árboles. En un cálculo para el cerro Chena, Retamal (2015) concluye que el aumento de la cobertura de bosque nativo, con una densidad de 700 árboles por hectárea, permitiría incrementar en 86% la actual tasa de captura de material particulado y otros contaminantes, aumentar en 104% la infiltración de las aguas lluvia y aumentar en 91% el control de la erosión de las laderas. Respecto del riego necesario para el establecimiento de los árboles, hay evidencia de que es posible contar con agua de riego implementando sistemas más eficientes que los actualmente utilizados en áreas verdes urbanas, en las cuales se riega por sobre las necesidades de las plantas (Reyes-Paecke et al., 2019).

El piedemeonte, por otro lado, se refiere a la bajada o pedestal de las montañas, y corresponde a una superficie en el margen de la montaña que desciende gradualmente. En muchas ciudades —como en el caso de Santiago—, el piedemonte corresponde a una interfaz entre centros urbanos y ecosistemas de montaña (Kulakowski et al., 2017), y es una zona que provee importantes contribuciones a las personas en aspectos culturales (Álvarez-Codoceo et al., 2021), pero que se encuentra usualmente degradada y bajo amenazas de cambio de uso de suelo debido a la expansión urbana. El piedemonte podría representar una importante zona para actividades de restauración con especies nativas, con miras a potenciar la captura de carbono en biomasa vegetal y suelos.

6.6. Superficies verdes en zonas edificadas (techos verdes, patios y jardines)

La utilización de techos verdes puede contribuir a la retención de aguas lluvias, reducir el exceso de temperatura y generar energías renovables. Por ejemplo, según el plan estratégico de Rotterdam, 10.000 m^2 de techos multiuso pueden generar hasta 1,25 MW de energías renovables y 80.000 m^2 de techos verdes pueden retener hasta 2.000 m^3 de agua (Peiwen & Stead, 2013). Por su parte, Heusinger, Sailor & Weber (2018) compararon el uso de techos verdes frente a techos convencionales (negros) con diferentes escenarios de riego, dependiendo del clima local y disponibilidad de agua en periodos de calor. El estudio indica que en ciudades con precipitación estival —como Beijing, Londres, Ciudad de México y Nueva York—, los techos verdes pueden contribuir a una disminución de temperatura, debido al enfriamiento por evaporación.

En Chile, en 2019 se modificó el artículo 2.6.3 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) para fomentar el desarrollo de techos verdes en los edificios nuevos. La modificación indica que un máximo del 25% de la azotea debe destinarse a construcciones (cubiertas, quinchos, baños, estanques, salas de máquinas, etcétera) y el 75% restante a terraza, vegetación o paneles solares, entre otros. Aunque este cambio en la normativa es positivo, al existir grandes diferencias climáticas a lo largo del territorio, las estrategias deberían ajustarse a las condiciones específicas de cada ciudad. Además, su diseño requiere una evaluación detallada para maximizar los beneficios térmicos deseados de los techos verdes.

6.7. Evaluación de las SBN en ciudades

Cobeneficios

Las SBN en ciudades pueden tener beneficios directos en adaptación al cambio climático en áreas urbanizadas y en sustentabilidad. Progresar en comunidades sostenibles es parte del mandato del ODS 11, cuyas metas —por ejemplo, reducir tanto las muertes por desastres y vulnerabilidad como el impacto ambiental en ciudades, además de mejorar el acceso a zonas verdes— están directamente relacionadas con el aumento de inversiones en SBN localizadas en ciudades. Estas soluciones pueden lograr beneficios indirectos en la planificación, reconociendo la integración de los espacios naturales en la ciudad, integrando la escala de paisaje en el contexto urbano. Como se señala en Rojas et al. (2019a, 2019b), la escala de paisaje es fundamental para comprender la interconexión de los sistemas urbanos y rurales. Estimar en forma adecuada sus beneficios exige considerar su impacto en la demanda de bienes y servicios de los sistemas urbanos y su aporte de los ecosistemas naturales o seminaturales.

Una estrategia urbana que incorpore la restauración de los ecosistemas en las ciudades mediante la creación de corredores verdes, la reforestación de zonas urbanas, la restauración de los cerros isla, piedemontes y humedales, y la utilización de superficies como techos verdes, patios y jardines, contribuye a la biodiversidad, la retención de aguas lluvias, la reutilización de aguas grises, la reducción de las islas de calor, la captura y almacenamiento CO_2, la reducción del consumo de energía y disminución de riesgos, además de a mejorar la calidad de vida y a la salud pública de los habitantes.

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Implementar SBN exige cerrar múltiples brechas de conocimiento que permitan un mejor catastro, junto con una implementación que reconozca el contexto geográfico y social en que se podrían emplazar.

Dentro de las necesidades que se observan para cerrar estas brechas, podemos destacar, en relación con las brechas de conocimiento, que se requiere mayor análisis sobre el desempeño de las plantas nativas frente a las plantas exóticas en las ciudades, en cuanto a su capacidad de captura de carbono, su contribución a la biodiversidad, su capacidad de supervivencia en el largo plazo y sus requerimientos hídricos. También se hace necesario caracterizar los cerros isla y las zonas de piedemonte y periurbanas de las ciudades, determinar su efecto en la biodiversidad y analizar el efecto del cambio climático en las especies a utilizar para la restauración. Este último aspecto será crucial para desarrollar planes que consideren el estrés hídrico y el cambio climático en las zonas a intervenir, debido a que las condiciones serán cambiantes y aquellas especies que se consideraban adecuadas para una ciudad hace diez años podrían no serlo en unos años más. Otro aspecto que requiere mayor análisis es la contribución de techos, patios y jardines a la biodiversidad de las ciudades y a la captura y retención de CO_2. Por otro lado, se requieren más estudios que evalúen la reducción de islas de calor a través de intervenciones combinadas, incluyendo superficies verdes, ya que las islas de calor dependen fuertemente tanto de factores geográficos locales como de las características de los edificios y el entorno construido.

Desde la gobernanza, se requieren un análisis específico de las brechas de la planificación territorial para implementar SBN, junto con programas de educación ambiental para que la ciudadanía asuma responsabilidad y participe en las estrategias aquí planteadas, como la reutilización de aguas grises, la transformación de techos a superficies verdes, la utilización de medios no motorizados para el transporte y la elección de especies nativas sobre las exóticas, entre otros. Además, se necesitarán incentivos para llevar a cabo las modificaciones, como las inversiones para separar las aguas grises de aguas negras o intervenir edificios existentes para instalar techos verdes. Por otro lado, se requiere hacer una mejor caracterización de algunos aspectos: incluir las ciudades como entes contaminantes de los cuerpos receptores de agua, mayor claridad en los instrumentos de planificación territorial (IPT) sobre los cerros —que ahora se indican como cerros, áreas verdes, zonas mixtas o zonas de interés silvoagro-

pecuario—. Otro aspecto importante será el involucramiento de las municipalidades en estos planes, debido a que las metas requerirán que ellas puedan definir su capacidad para aumentar sus coberturas verdes, promover los techos verdes y participar en la plantación de especies nativas (árboles y arbustos), entre otros.

Finalmente, desde la tecnología, se necesita mayor conocimiento sobre la incorporación de materiales permeables que puedan utilizarse en ciclovías que permitan absorción de aguas lluvias y disminuir las superficies asfaltadas. Para la separación de aguas grises de aguas negras en edificios existentes, se requiere más investigación y desarrollo tecnológico para hacer los cambios sin necesidad de transformar toda la edificación, motivo por el cual se hace más difícil incorporar esta estrategia. También se requieren sistemas que permitan incorporar estructuras resistentes con mayor capacidad de carga para incorporar vegetación en los techos.

Indicadores y metas propuestas

Aunque las iniciativas planteadas para las ciudades pueden formar parte de una estrategia conjunta, es posible distinguir algunas metas individuales para lograr sus potenciales de mitigación.

Para integrar los corredores verdes a las ciudades, se propone, en primer lugar, duplicar dentro de los próximos diez años los kilómetros dispuestos para la movilidad no motorizada (bicicleta y caminata) incorporando un mínimo de cobertura vegetal, que incluye bandejones y otros elementos de separación. La provisión de área verde por habitante (10 m^2) y accesibilidad (máximo 15 minutos caminando) puede impactar en cambios en el uso de transporte, lo que en consecuencia afecta al sistema urbano completo. Por su parte, la forestación o reforestación de zonas urbanas deberá considerar una proporción mínima de 50% de especies nativas para aumentar la biodiversidad, debido a que actualmente existe una proporción cercana al 80% de especies exóticas. Esta proporción es relevante, debido a la tensión entre la capacidad de supervivencia de las especies exóticas en el largo plazo y la necesidad de riego por no ser adecuadas para el clima local. Otro aspecto a considerar es la reutilización de aguas grises para el riego en estos corredores verdes y para las estrategias de reforestación, lo cual se relaciona directamente con las metas del manejo de aguas en ciudades.

En segundo lugar, el manejo de aguas es una solución que requiere cambios importantes en las obras de infraestructura hidráulica para prestar funciones hidrológicas y otros servicios ecosistémicos dentro de la red de drenaje. En este sentido, las metas apuntan a acciones que afectan al espacio público, y otras directamente a los espacios privados. En particular, se propone como meta que todos los diseños de nuevos espacios públicos deberán integrar aguas soterradas para mejorar la infiltración y recarga de napas. Además, se debe incrementar a lo menos al doble en los próximos diez años la superficie urbana destinada a gestionar la escorrentía superficial a través de humedales o parques inundables, entre otras acciones. Por otro lado, todos los edificios nuevos deberán separar las aguas grises de las aguas negras, con el objetivo de incorporar tratamiento de aguas grises para el riego de parques, y a una escala menor, para reutilización dentro del ámbito domiciliario.

En tercer lugar, para la restauración de cerros isla y piedemontes será fundamental la declaración de los cerros isla como áreas protegidas. Esta medida requerirá clarificar su función en los instrumentos de planificación territorial (IPT), debido a que son identificados de distinta forma, lo que afecta directamente su protección. El objetivo de restaurar y reforestar los cerros isla se deberá medir según el porcentaje de superficie intervenido, el porcentaje de cobertura vegetal natural y el número de cerros identificados como área protegida. Asimismo, esta solución podrá beneficiarse del plan de manejos de aguas, al incorporar un porcentaje de agua reutilizada como sistema de riego para reforestación y restauración. Una meta es reforestar con especies nativas el 50% de los cerros isla presentes en las grandes ciudades de Chile en los próximos diez años.

Finalmente, las medidas de utilización de superficies urbanas como patios, jardines y techos verdes requerirán del compromiso ciudadano, debido a que implican intervenciones sobre los bienes públicos y privados en las ciudades. Siguiendo el artículo 2.6.3 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), se define como meta que todos los edificios nuevos cuenten con 75% de superficie de techo verde, considerando la zona climática para incorporar vegetación adecuada al clima local. Asimismo, se propone aumentar a 50% la cobertura verde en edificaciones públicas, aunque este indicador deberá revisarse según metas específicas por municipio, debido a las distintas realidades existentes.

Horizonte temporal de implementación de metas

Se plantean tres etapas. Una primera etapa a cinco años para recopilar información y definir los planes y estrategias a implementar: plan maestro de corredores verdes y reforestación de zonas urbanas; plan de manejo de aguas en ciudades con estrategia verde; plan de restauración de cerros isla urbanos y piedemontes; y estrategia para promover el uso de superficies verdes en ciudades. En una siguiente etapa proyectada a diez años (en que algunas acciones podrían iniciarse antes del año cinco), se plantea lograr al menos 50% de cumplimiento de las metas propuestas; y en una tercera etapa, proyectada a quince años, se plantea lograr el 100% de las metas. Este horizonte de cumplimiento requerirá el compromiso tanto de organismos públicos como de la ciudadanía, debido a que un importante número de las metas propuestas exigen cambios en el estilo de vida de los habitantes y educación ambiental.

Evaluación económica

Las medidas propuestas para las ciudades requieren incentivos, por una parte, pero también la difusión de sus beneficios para la población. Por ejemplo, la separación de aguas grises y la captación de aguas lluvia desde los techos para su reutilización en riego tienen bajos costos y pueden reducir el costo mensual de gastos domiciliarios. Asimismo, la instalación de techos verdes puede disminuir los gastos en energía, al contribuir a un mejor control térmico interior. La disminución de temperatura en islas de calor también puede disminuir el uso de sistemas de ventilación al interior de las edificaciones. La transformación a sistemas de reutilización de aguas grises y el aumento de superficie de techos verdes podrían tener incentivos mediante la rebaja en contribuciones u otros beneficios.

Relación con instrumentos, políticas existentes y el sector económico

La nueva política de parques urbanos de Chile puede ser una oportunidad para incluir el desarrollo de corredores ecológicos y la inclusión de vegetación urbana en ciudades, siguiendo la lógica, por ejemplo, del reciente Plan Verde y de la Biodiversidad de Barcelona, en España. La construcción de parques propiciada por esta política debe reducir la brecha en acceso a las áreas verdes, además de avanzar a conectar parches naturales en las ciudades y propiciar la biodiversidad urbana. También son una oportunidad para generar sistemas de transporte público más limpios, como la implementación de ejes de transporte público no contaminante, acompañados de corredores verdes. La inclusión de vegetación en estos corredores permite también reducir el ruido urbano, una de las afecciones más molestas de la vida en ciudades.

En estas intervenciones es importante la aplicación del Manual de Drenaje Urbano del Ministerio de Obras Públicas en proyectos hidráulicos en ciudades de regiones, así como financiar proyectos para la recolección de aguas lluvias. Un buen ejemplo es el reciente proyecto por CLP 193 millones para habilitar un sector inundable en el centro de la ciudad de Valdivia que a futuro puede proyectarse como un parque inundable.

Próximos pasos y recomendaciones

Para implementar las soluciones planteadas aquí, además de cubrir los vacíos de conocimiento indicados anteriormente, se deberá generar un plan maestro de corredores verdes que incorpore movilidad activa (caminata y bicicleta) y aumento de cobertura verde en las ciudades chilenas; definir una estrategia de manejo de aguas en zonas urbanas para controlar la calidad de estos ecosistemas (aguas servidas y aguas lluvias) a escala urbana y a escala domiciliaria; desarrollar un plan de restauración de cerros isla urbanos y piedemontes; y definir una estrategia que promueva el uso de superficies verdes en ciudades, de acuerdo a las características de cada comuna.

Es crucial que en la adopción de soluciones basadas en la naturaleza se potencie simultáneamente la resiliencia de las sociedades y la de los ecosistemas, de forma transversal entre sectores y a distintas escalas de manejo, priorizando las soluciones locales. Estas medidas deben desarrollarse en los territorios en conjunto con las comunidades locales y pueblos indígenas, de manera de respetar sus derechos y asegurar la justa distribución de costos y beneficios en la protección del medio ambiente. Las SBN pueden transformarse en un instrumento que aumente el orgullo y sentido de pertenencia de las comunidades locales a los territorios que habitan.

7. Criósfera andina

7.1. Antecedentes

Los ecosistemas de la criósfera andina, usualmente ubicados como cabeza de cuenca en Chile centro norte, y tanto en la cabeza como al término de cuenca en la Patagonia, presentan una tremenda variabilidad latitudinal en su cobertura glaciar y nival. Estos sistemas son de gran importancia por los servicios ecosistémicos que proveen y tienen un rol clave en la gestión y manejo hídrico. A su vez, es de amplio conocimiento que los glaciares son muy vulnerables al cambio climático y su protección es fundamental desde la perspectiva de las SBN.

En las cuencas donde los glaciares ocupan parte de sus cabeceras, el régimen hídrico es en gran medida determinado por el derretimiento de la nieve y hielo, lo que tiene un fuerte impacto en los ecosistemas existentes «aguas abajo» del dominio glacial y en las numerosas actividades antrópicas que usan y gestionan dichas aguas.

7.2. Evaluación de la SBN en criósfera

Potencial de mitigación

La criósfera mantiene y protege la capacidad de reflexión o albedo de los glaciares y la nieve andina. La reflexión de la radiación es clave en el balance energético del planeta. Las superficies nevadas pueden reflejar a la atmósfera mucha de la radiación (más del 80%) incidente —al contrario del océano, que refleja cerca del 10% y absorbe cerca el 90% de la radiación solar incidente—. Esta capacidad disminuye cuando el hielo o la nieve está parcial o totalmente cubierto por hollín (*black carbon*) u otro tipo de partículas. En la criósfera andina se han reportado significativas concentraciones de carbono negro (Rowe et al., 2019). Muestras de nieve cordillerana han revelado enriquecimiento antropogénico significativo en sitios cercanos a Santiago y en el desierto de Atacama (Alfonso et al., 2019; Gramsch et al., 2020). Análisis de retrotrayectoria han permitido ligar la actividad minera a los altos factores de enriquecimiento para cobre y molibdeno presentes en zonas nevadas en el centro y norte de Chile (Alfonso et al., 2019). El polvo también juega un rol relevante en el oscurecimiento de la nieve, especialmente en el desierto de Atacama. Por ejemplo, en el glaciar Tapado (cuenca alta del río Elqui en la región de Coquimbo), las fuentes de contaminación son polvo transportado por el viento, que incluye sectores mineros (38%), sulfatos naturales erosionados (27%), nitratos antropogénicos (25%) y aerosoles costeros (10%) (Barraza et al., 2021).

Cobeneficios

La protección de glaciares y la cobertura nival presenta cobeneficios debido a su contribución hídrica para actividades productivas, el abastecimiento de agua y otros servicios ecosistémicos. Los glaciares contribuyen con agua dulce y con nutrientes esenciales para la productividad de aquellos sistemas terrestres, lacustres y marinos interconectados, además de ser fundamentales en la mantención de la biodiversidad y los ciclos biogeoquímicos asociados.

La protección del permafrost también presenta cobeneficios. El permafrost, definido como el suelo congelado por períodos de más de dos años, contiene altas concentraciones de carbono orgánico —que a su vez podrían, a nivel global, duplicar las concentraciones de carbono atmosférico en caso de derretirse—, lo que lo posiciona como un elemento vulnerable que puede retroalimentar el cambio climático. El retroceso de glaciares y las actividades antrópicas tienen el riesgo de dejar expuesto este permafrost, el que, por actividad microbiana, podría liberar gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) a la atmósfera (véase Brouillette, 2021).

Brechas de conocimiento, gobernanza y tecnología

Al igual que la mayoría de las SBN analizadas en este informe, es importante avanzar en la evaluación de su impacto sobre la mitigación y adaptación al cambio en el clima, junto con el costo de las acciones que permitirían adecuadamente proteger glaciares, la cobertura nival y del permafrost, además de los beneficios asociados.

En particular respecto de esta SBN, se requieren más datos de terreno y estudios detallados para un mejor entendimiento del efecto de aquellos elementos que contribuyen a oscurecer la nieve y el hielo, disminuyendo su albedo. Esto permitiría atribuirles a diferentes factores (antrópicos o naturales) la disminución observada del albedo, e implementar modelos predictivos del impacto del material particulado sobre glaciares. Además del hollín y el polvo, estudios recientes (Khan et al., 2021), indican que floraciones de microalgas de nieve verdes y rojas también pueden disminuir el albedo de la nieve en 40% y 20%, respectivamente, en relación a la nieve sin microalgas.

Se requiere una red permanente de mediciones de la deposición de material particulado con financiamiento estatal, que asegure su funcionamiento en el largo plazo. Esta red es necesaria para poder detectar, hacer seguimiento y atribuir a posibles fuentes el material particulado que se deposita en la nieve y los glaciares. Este material puede originarse en incendios, el uso de combustibles fósiles y leña, actividades productivas como la minería y el tráfico sobre caminos sin pavimento, entre otros. El transporte de material particulado desde ciudades hacia la cordillera ha demostrado ser una fuente significativa de hollín que afecta la nieve en la zona central (Gramsch et al., 2020) y el centro sur de Chile (Rowe et al., 2019).

Si bien existe un inventario nacional de glaciares, este debe ser actualizado y ampliado para acortar las brechas de conocimiento glaciológico que aún persisten, en especial porque hay muy pocos glaciares con programas sistemáticos de monitoreo, ya que hay muy pocas series de datos de largo plazo. Falta también el personal especializado necesario para el diseño, construcción, instalación, mantención, calibración y en definitiva la operación exitosa de estaciones de monitoreo en ambientes criosféricos.

Se requiere un sistema de monitoreo de la cobertura de nieve. Estudios recientes han demostrado que la cobertura —y la persistencia— promedio de nieve está disminuyendo en porcentajes cercanos al 10% por década (Cordero et al., 2019; Saavedra et al., 2018). Sin embargo, en la actualidad no se hace un monitoreo sistemático de la cobertura de nieve, lo que condiciona esfuerzos para atribuir la caída en la cobertura a los factores que parecen estar contribuyendo: baja en precipitaciones, alza de temperatura y deposición de material particulado.

La creación del Observatorio para el Cambio Climático (MCTCI-OCC) y el desarrollo de tecnología satelital —por la Fuerza Aérea de Chile y la Universidad de Chile— podrían ser avances importantes en la observación de los cambios que están experimentando los glaciares y la cobertura de nieve en Chile.

Relación con instrumentos, políticas existentes y el sector económico

Es importante avanzar en políticas que permitan regular la emisión de fuentes de hollín y polvo para minimizar su efecto en la disminución del albedo de los glaciares y la nieve andina. Como ya se ha señalado, la evidencia científica indica que existen significativos niveles de hollín y polvo en gran parte de la criósfera andina chilena. Las concentraciones más altas se han detectado en la zona central, que concentra la población y el sector industrial. En esta zona las concentraciones de hollín detectadas en la nieve pueden causar la reducción en el albedo nivoglacial de hasta 2% (Rowe et al., 2019).

Es muy precario el nivel de información y estudios sobre la relevancia del permafrost en la criósfera y sus sistemas asociados, como los humedales. Se requiere más información y evidencia científica sobre el significado, magnitud y características del permafrost y de las áreas periglaciares para avanzar en forma efectiva en su protección.

Próximos pasos y recomendaciones

Se recomienda impedir cualquier intervención directa en glaciares y minimizar posibles impactos indirectos de actividades humanas en glaciares. Esto es importante para proteger su rol en la provisión de varios servicios ecosistémicos, incluido el suministro de agua. En ese sentido, es importante acelerar la tramitación de la Ley de Glaciares en el Congreso.

Se recomienda regular actividades que contribuyan a generar material particulado —incluido el polvo—, que al depositarse sobre la nieve o el hielo pueden contribuir a acelerar su derretimiento. Controlar la emisión de este material ayudará a moderar la reducción del albedo, evitando además retroalimentar el derretimiento de la nieve y hielo, de modo de asegurar una provisión más estable de agua dulce a la población y las actividades productivas.

Se recomienda potenciar los sistemas de monitoreo; por ejemplo, el sistema de monitoreo glacial, así como el sistema de alerta de riesgos hidrogeológicos de origen glaciar. Estos riesgos se están incrementando en la medida que se acelera el actual proceso de desglaciación. Los países que poseen extensos ambientes criosféricos son vulnerables a las avalanchas, vaciamientos repentinos de lagos proglaciares, avalanchas de hielo, inundaciones, inestabilidad de laderas, etcétera. Estos desastres se están haciendo más frecuentes en el marco del cambio climático.

Recomendamos avanzar en la creación de nuevos sistemas de monitoreo. Se requiere una red de estaciones *in situ* para monitorear la deposición de material particulado —incluido polvo— sobre superficies de nieve o hielo. Se requiere además un sistema de monitoreo de la cobertura de nieve que combine productos satelitales con estaciones de validación en superficie.

Finalmente, se recomienda financiar estudios para determinar la cantidad y características del permafrost y de las áreas periglaciares en el país.

8. Relación con instrumentos de política pública

En los seis ámbitos de SBN que se cubren en este informe se identifican instrumentos de política pública específica con las que se deberían vincular las SBN. Dos instrumentos son particularmente relevantes: las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) y la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP), ya que son los dos instrumentos del Acuerdo de París que vinculan las medidas nacionales con nuestros compromisos internacionales. Además, estos son los instrumentos centrales de la gestión del cambio climático en la Ley Marco de Cambio Climático, actualmente en discusión en el Congreso.

8.1. Contribuciones Nacionalmente Determinadas

Las SBN aparecen explícitamente en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) como uno de los seis criterios del pilar social de transición justa y desarrollo sostenible que aplica a todas las NDC. Además, se vuelve a mencionar en el componente de integración, donde se incluyen al mismo tiempo enfoques de mitigación y adaptación. Dentro de este componente, las SBN se mencionan para las acciones relacionadas con el sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). El sector UTCUTS es un sumidero de CO_2 neto en el país y por lo tanto fundamental para lograr el objetivo de la carbono neutralidad. Incluir este sector en el pilar de integración asegura que las medidas que se implementen para mantener o incrementar la capacidad de sumidero deban aportar al mismo tiempo tanto a la adaptación como a los objetivos de desarrollo sostenible más globalmente. Como vemos del levantamiento descrito en este informe, existe espacio para ampliar propuestas de SBN en las próximas actualizaciones de las NDC.

8.2. Estrategia Climática de Largo Plazo

Dentro del proceso de elaboración de la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) hubo una mesa que discutió el rol de las funciones ecosistémicas y las SBN en la visión de largo plazo de la acción climática. Como resultado de ese ejercicio, emergió una serie de conceptos: economías locales, cosmovisión indígena, manejo integrado de territorios, conservación y protección de la biodiversidad, protección del recurso hídrico y economía circular, entre otros. Se nota, por lo tanto, que las SBN permiten integrar mitigación, adaptación y ODS, y además vincular estos ámbitos con el territorio. El mismo documento presenta algunas ideas para materializar los conceptos asociados con las SBN, la mayoría de ellas relacionadas con la planificación territorial. El rol de la ECLP en el ámbito de mitigación es definir los presupuestos sectoriales de gases de efecto invernadero, metas e indicadores de adaptación, como lineamientos para que tanto en mitigación y adaptación se consideren soluciones basadas en la naturaleza. De las posibilidades de soluciones recogidas en este informe, se pueden desprender lineamientos generales como acciones para abordar las brechas identificadas y medidas e indicadores cuando estos fueron identificados.

9. Brechas

Del levantamiento de información en los seis ámbitos abordados en este informe, queda claro que hay una importante cantidad de brechas en conocimiento, gobernanza y tecnológica específicas a cada ámbito. Estas brechas se deben subsanar para poder contar con metas e indicadores específicos para SBN. En particular, para la mayoría de las SBN analizadas en este informe es importante avanzar en la evaluación de su impacto sobre la mitigación y adaptación al cambio en el clima, y en estimar el costo de las acciones que permitirían su implementación, así como los beneficios asociados para la biodiversidad y las poblaciones locales.

Es necesario implementar un gran programa nacional para medir y monitorear el ciclo del carbono en nuestro país, que permita caracterizar los ecosistemas terrestres, marinos y humedales y su interacción con el ciclo del agua y la biodiversidad. Por otro lado, es importante diseñar una gobernanza de datos para el cambio climático que sea estandarizada —véase Gurney & Shepson (2021) para una discusión de las complejidades asociadas— y nos permita evaluar de manera directa, tanto las emisiones como las captura de gases de efecto invernadero. En particular, se requiere generar información estandarizada sobre los bosques y los suelos a nivel nacional. Hoy en día existen solo dos torres que permiten medir flujos de carbono en bosques (*eddy covariance*). Con esta información se pueden establecer las líneas bases necesarias para posteriormente fijar metas.

Aspectos relevantes por detallar son, por ejemplo, la superficie de bosque nativo y su biomasa sobre y bajo el suelo, un mapa de la integridad ecosistémica, el estado de degradación y prioridades para la restauración considerando riesgo de perturbaciones (fuego) y factores climáticos y económicos.

10. Recomendaciones

Las SBN aquí analizadas enfatizan el rol de la SBN en la captura y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y colocan como beneficios indirectos los impactos positivos en biodiversidad y el bienestar de las personas. Es importante, en este contexto, tener claro que esta es una elección metodológica que no implica una posición ontológica o axiológica respecto de la importancia de estos componentes. Por el contrario, como se ha enfatizado en distintas secciones de este documento, una SBN *debe* tener impactos positivos, aunque variables en magnitud, en mitigación, biodiversidad y bienestar de las personas. En este contexto, es posible entregar una serie de recomendaciones específicas, muchas de las cuales coinciden con las entregadas en el contexto del Comité Científico Cambio Climático (Rojas et al., 2019).

10.1. Recomendaciones generales

La evidencia científica disponible señala que Chile ha excedido varios límites ambientales que pueden poner en peligro la implementación y la capacidad de nuestros ecosistemas para mitigar emisiones, potenciar captura y adaptarnos a los impactos del cambio climático. En este contexto, es urgente reducir las presiones de origen antrópico sobre los ecosistemas e impulsar investigación y acciones que permitan su restauración estructural y funcional, como ha sido comprometido en la actual NDC del país:

> *Al año 2021 se contará con Plan Nacional de Restauración a Escala de Paisajes, que considerará la incorporación, a procesos de restauración, de 1.000.000 hectáreas de paisajes al 2030, priorizando en aquellos con mayor vulnerabilidad social, económica y ambiental.*

Se recomienda que toda propuesta de SBN en el marco del cambio climático incluya una visión ecosistémica integrada (a nivel de cuenca), en un contexto de ciclos naturales como los del agua y carbono y que considere las diferentes realidades de Chile (González et al., 2021). Se recomienda que estas acciones puedan responder a desafíos medioambientales (conservación, protección y uso sustentable de los ecosistemas), económicos (costo-efectividad) y sociales (bienestar humano). Además, sus fundamentos deberían estar basados en: i) procesos de gobernanza inclusivos —desde instituciones como universidades a agrupaciones humanas hasta pueblos originarios—, ii) transparentes —decisiones y datos públicos— y iii) empoderados —con apoyo legal y jurídico—. Además, su gestión debe ser adaptativa, de modo que pueda ser revisada a partir de la evidencia científica (UICN, 2020).

Se recomienda incorporar las SBN en los estudios de impacto ambiental, lo que requeriría modificar el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para que los titulares de proyectos privilegien o favorezcan SBN cuando deban comprometer medidas de compensación en los estudios de impacto ambiental (artículo 13 de la Ley 19.300).

Se recomienda gestionar el financiamiento de acciones climáticas asociadas a las SBN, que sea canalizado por el Gobierno con ayuda participativa de ONG especializadas y otros organismos de la sociedad civil. Debe existir integración del accionar climático a través del Gobierno y de los presupuestos y la planificación para la inversión.

10.2. Recomendaciones específicas

De acuerdo con las directrices del IPCC de 2006, solo se consideran en los inventarios de gases de efecto invernadero los bosques gestionados que han permanecido en el mismo tipo de uso de la tierra por al menos veinte años. Estos bosques corresponden a aquellos que son manejados bajo la figura de los planes de manejo que considera la Ley de Bosques y aquellos bosques nativos dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). A este respecto, y como se enfatizó en el reporte de biodiversidad para la COP25 (Marquet et al. 2019b), es importante revisar la Ley de Bosques para incrementar los incentivos al manejo y la restauración de bosques nativos y generar mayores superficies que entren en la contabilidad.

Es importante llevar a cabo una labor estratégica de conservación que permita aumentar la actual red de áreas protegidas para proteger aquellos ecosistemas que aún están subrepresentados en el SNASPE, y con especial consideración al cambio climático (Fuentes-Castillo et al., 2019; Hannah et al., 2020) y dotarlos a cada uno con un plan de manejo efectivo que considere el cambio climático y la protección de los *stocks* de carbono que poseen tanto sobre como bajo el suelo. Los cobeneficios para la biodiversidad, el suelo, el ciclo hidrológico y la calidad del aire son de gran magnitud, así como los beneficios sociales y de calidad de vida asociados.

Es de suma importancia atacar el problema del uso de leña, sobre todo en la zona centro sur de Chile, donde este es de gran magnitud, a pesar de existir planes de descontaminación que consideran medidas para reducir el uso de leña y la adopción de alternativas menos contaminantes. Esto requiere reforzar los actuales planes de descontaminación aumentando su cobertura e implementar mecanismos eficientes de fiscalización. Griscom et al. (2017) señalan que el 49% de las emisiones que provienen de leña se podrían mitigar si se subsidian mejores cocinas y estufas a leña. Lo anterior debe ir asociado a reforzar los planes de descontaminación en relación al mejoramiento en el aislamiento energético de las viviendas. Reducir el uso de leña no solo tiene un impacto positivo en la biodiversidad y en la captura de carbono en los bosques, sino que además ofrece enormes beneficios sociales y en la salud de las personas. La contaminación que surge de la combustión de la madera tiene una mayor toxicidad, ya que la distribución del tamaño de las partículas del humo de la madera es más fina que la de la mayoría de las fuentes dando origen a MP 2,5. Por ejemplo, en la temporada de invierno de Temuco, la concentración de MP 2,5 representa el 80% a 90% del total de las partículas del ambiente, mientras que en Santiago es solo del 30% a 60% (Schiappacasse et al., 2013; Schueftan & González, 2015).

Es importante considerar metas y objetivos de reducción de emisiones provenientes de incendios forestales e implementar acciones integrales que involucren capacitación y educación, además del financiamiento de tecnología de monitoreo, prevención y mitigación de incendios forestales. Por ejemplo, reforzar la Unidad de Incendios de la Conaf, en coordinación con la Onemi, para potenciar la respuesta temprana.

Se recomienda elaborar una metodología para poder medir el balance de carbono y metano de un humedal, lo que permitiría evaluar las posibles contribuciones al inventario de emisiones.

La incorporación del océano en las SBN se traduce en una posibilidad concreta para el país de avanzar hacia un desarrollo más sustentable, que se verá reflejado en las localidades costeras que utilizan los recursos naturales marinos, pero también a nivel global, al mejorar su comportamiento ambiental. Respecto de las recomendaciones del conjunto de soluciones basadas en la naturaleza propuestas en Farías et al. (2019), se pondera considerar los sumideros oceánicos en el presupuesto de carbono de Chile. En la actualidad, no existen métodos aceptados por el IPCC para cuantificar los sumideros de carbono oceánicos, como los ecosistemas costeros con vegetación (carbono azul). No obstante, Martin et al. (2016) llevan un inventario de los países que incluyen medidas NDC basadas en carbono azul, sean estas medidas de mitigación o de adaptación. Al respecto, hay países que lo están proponiendo como Costa Rica (Rivera Wong, 2019) y México.

Es importante avanzar en la creación de un inventario de los ecosistemas carbono azul, y estimar la magnitud de los reservorios de carbono y las tasas de entierro de carbono respectivas. Además, se debe hacer una evaluación exhaustiva del estado de protección y restauración de estos reservorios de carbono.

Es importante valorizar y dar valor económico a todos los servicios ecosistémicos asociados a los ecosistemas carbono azul, un procedimiento ya empezado y guiado por otros países, con antecedentes técnicos y ambientales (por ejemplo, Murray et al., 2011).

Se recomienda incorporar servicios ecosistémicos asociados a marismas o bosques de macroalgas en las estrategias de reducción de riesgos costeros, dados todos sus cobeneficios.

Se recomienda priorizar la protección ante la restauración de ecosistemas costeros, que son una reserva clave de carbono tanto para el corto plazo, en la biomasa viva, como a largo plazo en el sedimento (enterramiento). Por tanto, es imperativo proteger las fuentes de carbono si queremos maximizar el entierro de carbono orgánico. Otra razón para proteger los ecosistemas carbono azul es que la restauración de los hábitats costeros marinos es de 100 a 400 veces más costosa que la restauración de hábitats terrestres, mientras que la investigación sugiere que la restauración de hábitats costeros ha tenido solo éxito limitado (Bayraktarov et al., 2015).

Se recomienda fortalecer de manera sustantiva la normativa o las leyes para que se valore y proteja al océano y sus ecosistemas valiosos desde el punto de vista climático (como fondos marinos, humedales costeros, bosques de algas, etcétera). Esto, debido al fortalecimiento de su labor tanto en adaptación como en mitigación al cambio climático, incluyendo como piso mínimo a nivel constitucional el principio de desarrollo sustentable (pilar social, ambiental y económico) y el principio precautorio. ●

Anexos

Anexo 1.
Selección de respuestas recibidas a la consulta sobre soluciones basadas en la naturaleza

Se eliminaron respuestas duplicadas, con poca información específica y respuestas referidas a generar instituciones para la gestión de recursos y educación. También se editaron algunos textos para hacerlos más breves (en particular, la columna «Financiamiento») y no se incluyeron las columnas «Fundamento», «Ámbito de aplicación» ni «Implementación» por falta de información y espacio. La consulta se llevó a cabo mediante un formulario en línea abierto y disponible entre el 23 de noviembre y el 1 de diciembre del 2020, distribuido a todos los contactos contenidos en la base de datos del Comité Científico de Cambio Climático (alrededor de 650 investigadores).

Bosques

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Reforestación de gran escala y sustitución de especies.	Mejorar el secuestro de CO_2.	Secuestro de CO_2, disminuir la erosión, aumentar la biodiversidad.	Reducir puntos de calor en ciudades gracias a la reforestación de áreas urbanas, mejorar la calidad de vida.		Ministerio del Medio Ambiente.	Público y privado
Plantación de especies vegetales nativas o fitorreparadoras de suelo en laderas para evitar erosión y desprendimientos de tierra.	Mejorar el suelo de laderas, evitar erosión, evitar riesgos de desprendimiento de tierra y aumentar el secuestro de carbono.	Mejorar el sustrato, evitar erosión, mejorar el ciclo de nutrientes y aumentar la captura de carbono.	Adaptación del cambio climático por escorrentía o desprendimientos en masa por derretimiento de nieves o lluvias fuera de temporada.			

Agricultura

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Nuevas formulaciones de fertilizantes nitrogenados.	Reducir las emisiones de N_2O desde el suelo.	Reducción de emisiones de N_2O.	Aumento del retorno económico para el productor.	Norma de calidad de fertilizantes, nueva ley de suelos (en redacción).	SAG, Indap.	Público y privado
Secuestro de Carbono en los suelos.	Mitigación del Cambio climático.	Reducción del CO_2 atmosférico.	Mejoramiento de la fertilidad, actividad biológica y capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, reducción de la erosión.	Incentivos para prácticas de secuestro de carbono.	Ministerio de Agricultura, SAG, Indap.	Público
Reducción de la contaminación de suelos y aguas por metales pesados y metaloides.	Mejorar la salud de los suelos y agua.	Mantener el ecosistema microbiológico del suelo y agua.	Propiciar el potencial de producción de los cultivos.	Generación de normas secundarias para cursos de agua superficial y subterránea. Normas de calidad de suelo.	Ministerio de Obras Públicas (ejecución); Ministerios Medio Ambiente, Salud y Agricultura (fiscalización).	Público
Conservación de la biodiversidad en terrenos agrícolas.	Control de plagas, fomentar la polinización.	prevenir la pérdida de biodiversidad y sus servicios.	Agricultura más sostenible y menos intensiva, eliminando el uso indiscriminado de insumos.	En la actualidad, no hay normas obligatorias (leyes) que obliguen a preservar hábitats en paisajes agrícolas y hacer un mejor manejo. Estas normas existen en otros países, como Brasil (se debe preservar 30% del hábitat nativo) o en Argentina.	Campesinos, Ministerio de Medio Ambiente, ONG, municipalidades, Ministerio de Agricultura	Público y privado
Siembra y fertilización de grandes extensiones.	Recuperación acelerada de grandes extensiones de suelos degradados por erosión, incendios forestales, aluviones, etcétera.	Recuperación acelerada de grandes extensiones de suelos degradados por erosión, incendios forestales, aluviones, etcétera.			Conaf, privados	Público y privado

Humedales

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Humedales construidos (o artificiales) para la depuración de aguas residuales	Generar procesos de depuración basados en más ecología y menos tecnología	Los humedales construidos permiten un buen tratamiento de riles a muy bajo costo de operación y con alta resiliencia, con menor huella de carbono, mejor gestión del agua y secuestro de carbono por parte de las plantas acuáticas.	Fomento a la biodiversidad de ecosistemas amenazados y sistemas de transición con ecosistemas naturales. Los humedales construidos también implican un aporte al paisaje, tanto en términos escénicos como por la vida que albergan. Los humedales construidos en el ambiente urbano contribuirían al control de los flujos hidrológicos, regulando inundaciones y a la termorregulación, entregando humedad en los meses cálidos y secos, razón por la que se han promocionado con el concepto de *ciudades esponja*.	DS 90, Nueva Ley de Humedales Urbanos, Ley 21.202, Reglamento en curso. Ordenanzas municipales (Valdivia).	DGA, Servicio de Salud.	Público

Ecosistemas marinos

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Disminuir cuotas de pesca.	Dejar más biomasa en el agua.	Recuperación de pesquerías.	Mayor capacidad para afrontar efectos del cambio climático y El Niño. La menor oferta aumenta los precios y el beneficio socioeconómico puede ser incluso mayor.	Cambios en la Ley de Pesca y Acuicultura.	Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.	Público
Refugios climáticos en ambientes marinos.	Identificar y crear zonas de refugios climáticos como figuras de protección de la naturaleza, en que se protegen áreas con poca variabilidad en los componentes de su biodiversidad ante el cambio climático. Estos espacios permitirán ser refugio para mantener ecosistemas o especies.	Evitar la extinción de especies y ecosistemas amenazadas por el cambio climático, introduciendo este último como principal variable de estrés ambiental para crear nueva áreas protegidas, especialmente marinas y costero-marinas. Se busca corregir la subestimación de los servicios ecosistémicos de sumidero de carbono del océano y la desfuncionalización de los ecosistemas marinos y costeros.	Desarrollo de investigación científica en aspectos poco desarrollados, como la elaboración de métricas asociadas a la captura de CO_2 de los océanos y métricas para la adaptación. Desarrollo y fortalecimiento de comunidades humanas aledañas en torno a actividades económicas sustentables que permitan desarrollo local. Desarrollo y fortalecimiento de actividades económicas como el turismo de naturaleza.	Nueva figura de protección requería ajustarse a las actuales normativas de la protección de espacios costeros, marinos o terrestres, según corresponda.	Conaf, Ministerio de Medio Ambiente, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Ministerio de Bienes Nacionales, según corresponda, para espacios costero-marinos.	Público y privado
Regular la minería submarina.	Evitar, controlar o disuadir la remoción del fondo marino donde se registra presencia de hidrato de metano.	Posible liberación de metano.		Se sugiere adoptar un enfoque precautorio. Aunque en la actualidad la extracción de hidrato de metano del fondo del océano no está desarrollada de manera eficaz, debe tenerse en cuenta que es altamente inestable y en su extracción es poco probable que no se libere		

Ecosistemas marinos (continuación)

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Promoción del enfoque ecosistémico a la acuicultura.	Producir alimentos acuáticos con baja huella de carbono y mínimos efectos en los ecosistemas, contribuyendo a la alimentación nacional de calidad y para la generación de empleo a través del mercado nacional y exportaciones.	Minimizar la huella de carbono de la acuicultura (en sistemas abiertos en el mar) y minimizar los efectos negativos de la acuicultura alimentada (peces) sobre los ecosistemas, por aportes de nutrientes y riesgo de eutroficación de los cuerpos de agua que la contienen.	Mejorar y fortalecer la eficiencia productiva de la acuicultura (reducir costos, mejorar el crecimiento de los individuos, etcétera) por unidad ecosistémica. Disminuir los riesgos sanitarios para la propia industria y sistemas productivos. Mejorar la adaptación a algunos de los forzantes del cambio climático, por ejemplo, al reducir las densidades productivas en general los cultivos son menos vulnerables. Al considerar aspectos de circulación y procesamiento natural del carbono en los cuerpos de agua para planificar la ubicación y densidad de los centros de cultivo se incrementa la resiliencia de los cultivos. Contribuir a la conservación de la biodiversidad de comunidades bentónicas y pelágicas. Minimizar riesgos de eutroficación.	Las normativas actuales para la acuicultura chilena no consideran la implementación de un enfoque ecosistémico atendiendo a la capacidad de carga de los ecosistemas y a la necesidad de combinar estratégicamente sistemas productivos alimentados y extractivos.	El estado posiblemente a través de un trabajo conjunto entre la Subsecretaria de Pesca y el Ministerio del Medio Ambiente.	

Ciudades

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Captación de aguas atmosféricas.	Incrementar la disponibilidad hídrica (seguridad hídrica) para comunidades en zonas costeras mediante la implementación de atrapanieblas que interceptan la neblina costera.	Mitigación de escasez hídrica en zonas costeras de Chile.				
Biodigestión de residuos orgánicos.	Evitar emisiones de metano, gestión de la basura orgánica (desinfección, desodorización, control de vectores, reducción del espacio de gestión, estabilización de los residuos, mineralización de nutrientes).	Reducción sustantiva de la huella de carbono de la gestión de residuos, generación de biocombustible sustituto de fósiles o biomasa fotosintética. Disminución de lixiviados (contaminación de suelo y napas).	Menor transporte de basura, potenciación de reciclaje de inorgánicos, disminución de riesgos en vertederos (vectores: aves, roedores, combustión espontánea), potenciación del reciclaje de nutrientes, aporte de materia orgánica al suelo, promoción de la autonomía energética y de fertilizantes. Disminución de infecciones vía vectores, mayor resiliencia del suelo por aporte de nutrientes, mayor productividad y almacenaje de agua.	La tecnología se acaba de normar en forma oficial. Lamentablemente, se toman estándares extranjeros, por lo que la norma constituye una gran barrera de entrada (restricciones y costos).	Superintendencia de Electricidad y Combustibles, Ministerio del Medio Ambiente.	Público y privado
Regulación de servicios ecológicos por población en áreas urbanas.	Lograr equilibrios en las zonas de habitación humana, integrando servicios ecosistémicos a una escala equivalente a los usos de un territorio dado.	Aumentar la sostenibilidad de los ecosistemas en zonas urbanas, donde vive la mayoría de la población chilena.	Reducción de la temperatura de las ciudades.	Requiere descentralizar la gestión territorial en Chile, facultando a gobiernos regionales y locales a coordinar medidas. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.	Gobiernos regionales en conjunto con gobiernos locales, con participación ciudadana vinculante.	Público y privado
Biofiltros.	Tratamiento de aguas lluvias y escorrentía urbana.	Prevenir inundaciones, efectos negativos en la calidad del agua de cuerpos receptores finales (ríos, lagos).				Público y privado

Protección de la naturaleza

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Protección de los recursos genéticos naturales.	Evitar la erosión de la diversidad genética, y las alteraciones a los patrones de distribución espacial de esta, para retener adaptaciones locales y el potencial evolutivo frente a cambios ambientales.	Prevenir la extinción de las poblaciones, la alteración de los patrones espaciales de su distribución, y reforzar su potencial evolutivo.		No hay.	SAG, Sernapesca y otros.	Público
Protección y restauración de cabeceras de cuenca y corredores ribereños (mínimo 30 m, hasta 200 m en ríos grandes).	Recuperación de zonas prioritarias para el correcto funcionamiento de ecosistemas de agua dulce.	Provisión de agua. Calidad de agua. Prevención de la erosión. Protección del hábitat y conectividad entre parques de bosque nativo para especies de fauna y flora.		La Ley de Bosque Nativo prohíbe la tala de bosque hasta 30 m de un curso de agua. La Ley 18.378 sobre distritos de conservación de suelos, bosques y aguas, establece que el presidente puede decretar la prohibición de cortar los árboles situados hasta a 100 m de las orillas de ríos y lagos. El DFL 1.600 (1931) establece que el propietario cede gratuitamente al Fisco una faja de hasta 25 m de terreno firme en la ribera de los ríos y lagos (artículo 34).	Empresas forestales y agrícolas. Conaf. Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas.	Público y privado
Recarga artificial de aguas subterráneas.	Recuperar el almacenamiento de aguas subterráneas, para garantizar la existencia de caudales base que alimenten los ecosistemas dependientes de aguas subterráneas.	Afectación de humedales y otros ecosistemas dependientes de aguas subterráneas.	Reducción de conflictos sociales.		Mesa de trabajo regional.	Público
Proteger los ríos.	Limitar la degradación de los ecosistemas de agua dulce.	Reducción de la degradación y transformación de riberas de ríos por usos agrícolas y antrópicos.	Gestionar de escurrimientos hídricos superficiales durante eventos catastróficos y sequías, control de recurso mediante modelos hidrogeológicos del impacto de usos de aguas de acuíferos (para evitar que sequen ríos y humedales aledaños).	Ministerio del Medio Ambiente, Sernageomin, Ministerio de Agricultura (para regulación del ganado) y DGA (deben estar asociados).	Guardapescas, guardabosques, Ministerio de Agricultura y turismo.	Público

Protección de la naturaleza (continuación)

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Restricción de intervenciones en el ámbito de la criósfera andina, especialmente en las zonas áridas y semiáridas	Impedir efectos directos e indirectos que modifiquen o alteren la evolución y dinámica natural del glaciosistema como parte fundamental del hidrosistema.	Evitar la pérdida de funciones ambientales, hidrológicas, climáticas, socioeconómicas y de calidad de vida por destrucción o degradación de cuerpos de hielo, campos de neviza y de penitentes derivadas de la actividad humana.	Asegurar el suministro hídrico natural de aguas de consumo directo por parte de las comunidades y del riego de zonas áridas y semiáridas. Incrementar la disponibilidad de tiempo para el diseño e implementación práctica de medidas de adaptación ambientalmente sustentables. Asegurar la continuidad de la actividad productiva de los valles, la disponibilidad de agua para beber y para higiene, y el resguardo de los patrimonios culturales.	Se requieren modificaciones al Código de Aguas para que estas dejen de ser propiedad de personas o grupos privados que la han convertido en un bien comercial y al Código de Minería que, entre otros, no pueda adueñarse gratuitamente de las aguas alumbradas en sus faenas. Se requiere, además, que se consideren medidas compensatorias en relación directa con el daño o impacto ocasionado a los ecosistemas andinos, y que se resguarde la seguridad de los habitantes y territorios agua abajo de este tipo de faenas.	Ministerio del Medio Ambiente con apoyo de la DGA y MOP.	Público
Conservación de turberas.	Conservar los reservorios de carbono de las turberas patagónicas. Restaurar la capacidad de sumidero de carbono en turberas degradadas.	Pérdida de depósitos de carbono y sus registros paleoecológicos. Pérdida de flora y fauna endémica de las turberas de la Patagonia.			Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.	Público

Protección de la naturaleza (continuación)

Nombre	Objetivo	Efecto esperado	Cobeneficios	Normas	Encargado	Financiamiento
Protección a bosques primarios.	Establecer que es de interés público conservar y proteger los bosques primarios alojados en Patagonia chilena, como medidas de solución basadas en la naturaleza, que abarca aspectos conjuntos de mitigación y adaptación al cambio climático. Mantener o aumentar la superficie de bosques primarios en estado de conservación.	Los bosques primarios de Patagonia chilena (incluyendo superficie fiscal) se encuentran amenazados por ocupaciones ilegales, tala de árboles para leña, erosión de suelo por deforestación, pérdida de biodiversidad por introducción de ganadería o tala para construcción de caminos. Se busca prevenir la sustitución de bosques primarios por plantaciones forestales con especies introducidas, como el pino y eucaliptus, y fomentar la captura de CO_2.	Los bosques primarios juegan un rol esencial como refugios climáticos para especies que permitan su adaptación en oposición a la extinción. Además, entregan servicios ecosistémicos como el suministro de agua potable y de riego, prevenir el deterioro de las cabeceras de cuenca, control de inundaciones, hábitat y biodiversidad, y servicios culturales que colectivamente proporcionan valores económicos y no económicos a las comunidades que dependen de ellos.	Se propone establecer por medio de un Decreto del Ministerio de Bienes Nacionales, una designación de estas superficies como áreas de alto valor ambiental considerando sus funciones ecosistémicas de mitigación y adaptación al cambio climático como solución basada en la naturaleza. Para evitar la sustitución de bosques primarios, se podría prohibir por medio de la Ley de Bosque Nativo el reemplazo de bosques primarios por las plantaciones forestales con especies introducidas. Se debería reconocer en la normativa existente asociada al Servicio de Evaluación Ambiental para generar un instructivo respecto de la protección de los bosques primarios dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.	Ministerio del Medio Ambiente, Conaf, SEA, Ministerio de Bienes Nacionales, Ministerio de Energía.	Público
Regular las fuentes emisoras de material particulado y polvo en áreas cercanas a glaciares, buscando disminuir el efecto de la deposición de estos elementos sobre el albedo glaciar y de las nieves de las altas cumbres.	Protección de glaciares en las cabeceras de las cuencas, de las cual depende gran parte del caudal de los ríos de los andes centrales en años secos.	Prevenir la disminución acelerada de las masas glaciares en la cordillera de los Andes, con consecuencias catastróficas en la provisión de agua dulce para consumo humano, desarrollo ecosistémico, etcétera.		Se debe analizar el proyecto de ley de glaciares.		Público

Anexo 2.
Participantes del taller

Nombre	Apellido	Afiliación	Rol
Ciudades			
Elizabeth	Wagemann	Universidad Diego Portales	Moderadora
María Catalina	Muñoz	Universidad de Chile	Secretaria
Jorge	Gironás	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Juan Carlos	Muñoz	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Cristóbal	Lamarca	Activa Valdivia	Participante
Francois	Simon	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Gilles	Flamant	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Andrés	Muñoz-Pedreros	Universidad Católica de Temuco	Participante
Margarita	Jans	Universidad Diego Portales	Participante
Agricultura			
Diego	González		Moderador
Bárbara	Morales	Universidad de Chile	Secretaria
Rodrigo	Arias	Universidad Austral de Chile	Participante
Pablo	Cornejo	Universidad de la Frontera	Participante
Francisco Javier	Matus	Universidad de la Frontera	Participante
Cristina	Muñoz	Universidad de Concepción	Participante
Francisco	Salazar	Instituto de Investigaciones Agropecuarias	Participante
Osvaldo	Salazar	Universidad de Chile	Participante
Eduardo	Arellano Ogaz	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Rafael	Larraín	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Bosques			
Pablo	Marquet	Pontificia Universidad Católica de Chile	Moderador
Isidora	Avila	Pontificia Universidad Católica de Chile	Secretaria
Pablo	Donoso	Universidad Austral de Chile	Participante
Alfredo	Erlwein	Universidad Austral de Chile, TESES	Participante
Jorge	Pérez Quezada	Universidad de Chile	Participante
Álvaro	Promis	Universidad de Chile	Participante
Christian	Little	Instituto Forestal de Chile	Participante
Fuego			
Paulina	Aldunce	Universidad de Chile	Moderadora
Rodrigo	Palma	Universidad de Chile	Secretario
Andrés	Holz	Portland State University	Participante
Rony	Pantoja	Corporación Nacional Forestal	Participante
Cecilia	Smith Ramírez	Universidad Austral de Chile	Participante
Francisco Javier	Matus	Universidad de la Frontera	Participante

Nombre	Apellido	Afiliación	Rol
Humedales			
Alejandra	Stehr	Universidad de Concepción	Moderadora
Sebastián	Vicuña	Pontificia Universidad Católica de Chile	Secretario
Jorge	Hoyos	Universidad de Magallanes	Participante
Christel	Oberpour	Universidad Santo Tomás	Participante
Carolina	León	Universidad Bernardo O'Higgins	Participante
Monserrat	Lara	Fundación FORECOS	Participante
Bárbara	Saavedra	Wildlife Conservation Society	Participante
Amerindia	Jaramillo	Ministerio del Medio Ambientes	Participante
Roy	Mackenzie	Universidad de Magallanes	Participante
Jason	Sauer	Universidad Austral de Chile	Participante
Alejandra	Figueroa	Capital Biodiversidad	Participante
Andrea	Pino	Universidad Austral de Chile, TESES	Participante
Claudio	Valdovinos Zarges	Universidad de Concepción	Participante
Ecosistemas oceánicos			
Laura	Farías	Universidad de Concepción	Moderadora
Matías	Paredes	Universidad de Chile	Secretario
Mauricio Alejandro	Palacios Subiabre	Universidad Austral de Chile, Ideal	Participante
Gustavo	Chiang	Fundación MERI	Participante
Rodrigo	Hucke-Gaete	Universidad Austral de Chile	Participante
Alejandro	Pérez Matus	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Stefan	Gelcich	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Sylvain	Faugeron	Pontificia Universidad Católica de Chile	Participante
Alejandro	Mora Soto	Universidad de Oxford	Participante
Glaciares			
Humberto	González	Universidad Austral de Chile	Moderador
Maisa	Rojas	Universidad de Chile	Secretaria
Andrés	Rivera	Universidad de Chile	Participante
Jose Luis	Iriarte	Universidad Austral de Chile, Ideal	Participante
Raúl	Cordero	Universidad de Santiago de Chile	Participante
Cesar	Cárdenas	Instituto Antártico Chileno	Participante
Lorena	Rebolledo	Instituto Antártico Chileno	Participante
Otros			
Bárbara	Blanco	Universidad de Chile	Apoyo logístico
Danny	Espín	Universidad de Chile	Apoyo logístico
Soledad	Quiroz	Comité Científico	Organización

Referencias

Abbas, F., H. Hammad, S. Fahad, A. Cerdà, M. Rizwan, W. Farhad,... H. Faiq (2017). Agroforestry: A Sustainable Environmental Practice for Carbon Sequestration Under the Climate Change Scenarios: A Review. *Environmental Science and Pollution Research* 24(12), 11.177-11.191. doi: 10.1007/s11356-017-8687-0

Aitken, D., D. Rivera, A. Godoy-Faúndez & E. Holzapfel (2016). Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile. *Sustainability* 8(2), 128. doi: 10.3390/su8020128

Alfonso, J., R. Cordero, P. Rowe, S. Neshyba, G. Casassa, J. Carrasco,... C. Kang (2019). Elemental and Mineralogical Composition of the Western Andean Snow (18° S–41° S). *Scientific Reports*, 9(1), 1-13. doi: 10.1038/s41598-019-44516-5

Almeida, C., M. Mariano, F. Agostinho, G. Liu & B. Giannetti (2018). Exploring the potential of urban park size for the provision of ecosystem services to urban centres: A case study in São Paulo, Brazil. *Building and Environment*, 144, 450-458. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.08.036

Alvarez-Codoceo, S., C. Cerda & J. Perez-Quezada (2021). Mapping the provision of cultural ecosystem services in large cities: the case of the Andean piedmont in Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening*, 66, 127390. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127390

Álvarez-Garretón, C., A. Lara, J. P. Boisier & M. Galleguillos, (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. doi: 10.3390/f10060473

Arriagada, L., O. Rojas, J. Arumí, J. Munizaga, C. Rojas, L. Farias & C. Vega (2019). A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: A case study in mediterranean Chile. *Science of the Total Environment*, 651(1), 1517-1533. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.237

Astorga, L & H. Burschel (editores) (2019). *Chile necesita un nuevo modelo forestal: Ante los desafíos climáticos, sociales y ambientales*. Santiago: Lom.

Bannister, J., R. Vargas- Gaete, J. Ovalle, M. Acevedo, A. Fuentes- Ramírez, P. Donoso,... C. Smith- Ramírez (2018). Major bottlenecks for the restoration of natural forests in Chile. *Restoration Ecology*, 26(6), 1.039-1.044. doi: 10.1111/rec.12880

Bastviken, D., L. Tranvik, J. Downing, P. Crill & A. Enrich-Prast (2011). Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science,* 331(6013), 50. doi: 10.1126/science.1196808

Barbosa, O. & P. Villagra (2015). Socio-Ecological Studies in Urban and Rural Ecosystems in Chile. En R. Rozzi (ed.), *Ecology and ethics* (pp. 297-311). doi: 10.1007/978-3-319-12133-8_19

Barraza F., F. Lambert, S. MacDonell, K. Sinclair, F. Fernadoy & H. Jorquera (2021). Major atmospheric particulate matter sources for glaciers in Coquimbo Region, Chile. *Environmental Science and Pollution Research,* 28(27), 36.817-36.827. doi: 10.1007/s11356-021-12933-7

Bayraktarov, E., M. Saunders, S. Abdullah, M. Mills, J. Beher, H. Possingham,... C. Lovelock (2015). The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications,* 26(4), 1.055-1.074. doi: 10.1890/15-1077

Bayulken, B., D. Huisingh & P, Fisher (2020). How are Nature Based Solutions Helping in the Greening of Cities in the Context of Crises such as Climate Change and Pandemics? A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125569. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125569

Becerra-Rodas, C., C. Little, A. Lara, J. Sandoval, S. Osorio & J. Nimptsch (2019). The Role of Streamside Native Forests on Dissolved Organic Matter in Forested and Agricultural Watersheds in Northwestern Patagonia. *Forests*, 10(7), 595. doi: 10.3390/f10070595

Bernal, B & W. Mitsch (2013). Carbon sequestration in freshwater wetlands in Costa Rica and Botswana. *Biogeochemistry,* 115(1-3), 77-93. doi: 10.1007/s10533-012-9819-8

Bikomeye, J., C. Rublee & K. Beyer (2021). Positive Externalities of Climate Change Mitigation and Adaptation for Human Health: A Review and Conceptual Framework for Public Health Research. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 18(5), 2.481. doi: 10.3390/ijerph18052481

Birch, J. C., Newton, A. C., Aquino, C. A., Cantarello, E., Echeverría, C., Kitzberger, T., Schiappacasse, I. and N. T. Garavito (2010). Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21.925-21.930. doi: 10.1073/pnas.1003369107

Buschmann, A., R. Stead, M. Hernández-Gonzáles, S. Pereda, J. Paredes & M. Maldonado (2013). Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable. *Revista chilena de historia natural,* 86(3), 251-264. doi: 10.4067/S0716-078X2013000300003

Calisto, J., V. Muñoz & C. Astete (2020). Oceans, climate change and Chile's NDCs. En: F. Salinas (editor), *Analysis of Chile's Nationally Determined Contribution (NDC) and Proposals from the Civil Society for Climate Action* (pp. 94-104). https://www.fima.cl/wordpress/wp-content/uploads/2020/08/Analysis-ndc.pdf

Carte, L., A. Hofflinge & M. Polk (2021). Expanding Exotic Forest Plantations and Declining Rural Populations in La Araucanía, Chile. *Land*, 10(3), 283. doi: 10.3390/land10030283

Carvajal, M. & A. Alaniz (2019). Incendios forestales en Chile central en el siglo XXI: impacto en los remanentes de vegetación nativa según categorización de amenaza y recuperación de cobertura. En C. Smith-Ramírez & F. Squeo (editores), *Biodiversidad y Conservación de los Bosques Costeros de Chile* (pp. 487-504). Osorno: Universidad de Los Lagos.

Castilla J., J. Armesto & M. Martínez-Harms (editores) (2021). *Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos*. Santiago: Ediciones UC.

Cavan, L., A. Belcher, A. Atkinson, S. Hill, S. Kawaguchi, S. McCormack,... P. Boyd (2019). The importance of Antarctic krill in biogeochemical cycles. *Nature Communications*, 10(1), 1-13. doi: 10.1038/s41467-019-12668-7

Cavanagh, R., J. Melbourne-Thomas, S. Grant, D. Barnes, K. Hughes, S. Halfter,... S. Hill (2021). Future risk for Southern Ocean ecosystem services under climate change. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1-21. doi: 10.3389/fmars.2020.615214

CBD, Convenio sobre la Diversidad Biológica (2009). *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation.* CBD/SBSTTA/23/3. https://www.cbd.int/doc/c/1b88/80cc/c57d9d9fcae18649eeb7455b/sbstta-23-03-es.pdf

Cohen-Shacham, E., G. Walters, C. Janzen & S. Maginnis (editores) (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. doi: 10.2305/IUCN.CH.2016.13.en

Cohen-Shacham, E., A. Andrade, J. Dalton, N. Dudley, M. Jones, C. Kumar & G. Walters (2019). Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, 98, 20-29. doi: 10.1016/j.envsci.2019.04.014

Conaf, Corporación Nacional Forestal (2017). *Superficie de usos de suelo regional* [Archivo de datos]. Recuperado de: https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/

Referencias

Conaf, Corporación Nacional Forestal & Conama, Corporación Nacional de Medio Ambiente (2006). *Monitoreo y actualización: Catastro de uso del suelo y vegetación, Región de Magallanes y Antártica Chilena*. Santiago.

Conaf, Corporación Nacional Forestal & Ministerio de Agricultura (2013). *Informe final programa ley del bosque nativo*. https://www.dipres.gob.cl/597/articles-139791_informe_final.pdf

Contreras, L., C. Bulboa, C. Galbán, J. Remonsellez & D. Mella (2016). *Cultivo de Alga Parda Macocystis Piryfera en la zona de Quintero y Puchuncaví: Evaluación de la productividad y potencial uso para la biorremediación de metales pesados y compuestos orgánicos*. Proyecto de investigación.

Contreras, L., M. Medina, S. Andrade, V. Oppliger & J. Correa (2007). Effects of copper on early developmental stages of *Lessonia nigrescens* Bory (Phaeophyceae). *Environmental Pollution*, 145(1), 75-83. doi: 10.1016/j.envpol.2006.03.051

Contreras, L., A. Moenne & J. Correa (2005). Antioxidant responses in *Scytosiphon lomentaria* (phaeophyceae) inhabiting copper- enriched coastal environments 1. *Journal of phycology*, 41(6), 1.184-1.195. doi: 10.1111/j.1529-8817.2005.00151.x

Cordero, R., V. Asencio, S. Feron, A. Damiani, P. Llanillo, E. Sepulveda,... Casassa, G. (2019). Dry-Season Snow cover Losses in the Andes (18–40 S) driven by changes in Large-Scale climate Modes. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. doi: 10.1038/s41598-019-53486-7

Correa, J., N. Lagos, M. Medina, J. Castilla, M. Cerda, M. Ramírez,... L. Contreras (2006). Experimental transplants of the large kelp Lessonia nigrescens (Phaeophyceae) in high-energy wave exposed rocky intertidal habitats of northern Chile: experimental, restoration and management applications. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 335(1), 13-18. doi: 10.1016/j.jembe.2006.02.010

Costanza, R., R. de Groot, P. Sutton, S. van der Ploeg, S. Anderson, I. Kubiszewski, S. Farber & R. Turner (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152-158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

Darwin, C. (1882). *The Voyage of the Beagle: Journal of Researches into the Natural History and Geology of the Countries Visited During the Voyage of HMS Beagle Round the World: Under the Command of Capt. Fitz Roy, R. N.* 2.ª ed. Londres: Murray. doi: 10.1017/CBO9781139103831

De Klein, J. & A. Werf (2014). Balancing carbon sequestration and GHG emissions in a constructed wetland. *Ecological Engineering*, 66, 36-42. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.060

Delegaciones de Argentina y Chile, Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (2020). *Report of the thirty-ninth meeting of the commission* (CCAMLR 39). https://www.ccamlr.org/en/system/files/e-cc-39-rep.pdf

Dinsa, T & D. Gemeda (2019). The Role of Wetlands for Climate Change Mitigation and Biodiversity Conservation. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(7), 1.297. doi: 10.4314/jasem.v23i7.16

Dipres, Dirección de Presupuestos de Chile (2013). *Evaluación de programas gubernamentales: Informe final*. Programa Ley del Bosque Nativo. Ministerio de Agricultura, Conaf.

Doughty, C., J. Roman, S. Faurby, A. Wolf, A. Haque, E. Bakker,... J. Svenning (2016). Global nutrient transport in a world of giants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Unitated States of America*, 113(4), 868-873. https://www.jstor.org/stable/26467502

Drever, C. R., Cook-Patton, S. C., Akhter, F., Badiou, P. H., Chmura, G. L., Davidson, S. J., Desjardins, R. L., Dyk, A., Fargione, J. E., Fellows, M. and Filewod, B. (2021). Natural climate solutions for Canada. *Science Advances*, *7*(23), p.eabd6034. doi: 10.1126/sciadv.abd6034

Duarte, C., W. Dennison, R. Orth & T. Carruthers (2008). The charisma of coastal ecosystems: addressing the imbalance. *Estuaries and Coasts*, 31(2), 233-238. doi: 10.1007/s12237-008-9038-7

Duarte, C., I. Losada, I. Hendriks, I. Mazarrasa & N. Marbà (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961-968. doi: 10.1038/nclimate1970

Duarte, C., J. Middelburg & N. Caraco (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2(1), 1-8. doi: 10.5194/bg-2-1-2005

Dumitru, A., N. Frantzeskaki & M. Collier (2020). Identifying principles for the design of robust impact evaluation frameworks for nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, 112, 107-116. doi: 10.1016/j.envsci.2020.05.024

Elmqvist, T., H. Setälä, S. Handel, S. Van Der Ploeg, J. Aronson, J. Blignaut,... R. De Groot (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current opinion in environmental sustainability*, 14, 101-108. doi: 10.1016/j.cosust.2015.05.001

Erb, K., S. Luyssaert, P. Meyfroidt, J. Pongratz, A. Don, S. Kloster,... A. Dolman (2017). Land management: data availability and process understanding for global change studies. *Global Change Biology*, 23(2), 512-533. doi: 10.1111/gcb.13443

Erwin, K. (2009). Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71-84. doi: 10.1007/s11273-008-9119-1

European Comission, Directorate-General for Research and Innovation (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities'*. doi: 10.2777/765301.

Evers, S., C. Yule, R. Padfield, P. O'Reilly & H. Varkkey (2016). Keep wetlands wet: the myth of sustainable development of tropical peatlands - implications for policies and management. *Global Change Biology*, 23(2), 534-549. doi: 10.1111/gcb.13422

Fargione, J., S. Bassett, T. Boucher, S. Bridgham, R. Conant, S. Cook-Patton,... B. Griscom (2018). Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*, 4(11), 1-14. doi: 10.1126/sciadv.aat1869

Farías, L., K. Ubilla, C. Aguirre, L. Bedriñana, R. Cienfuegos, V. Delgado,... J. Valencia (2019). *Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional de Chile*. Santiago: Comité Científico de Cambio Climático, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Fernández, P., C. Hurd & M. Roleda (2014). Bicarbonate uptake via an anion exchange protein is the main mechanism of inorganic carbon acquisition by the giant kelp M acrocystis pyrifera (L aminariales, P haeophyceae) under variable pH. *Journal of Phycology*, 50(6): 998-1008. doi: 10.1111/jpy.12247

Filbee-Dexter, K., T. Wernberg, S. Grace, J. Thormar, S. Fredriksen, C. Narvaez,... K. Norderhaug (2020). Marine heatwaves and the collapse of marginal North Atlantic kelp forests. *Scientific Reports*, 10(1). doi: 10.1038/s41598-020-70273-x

Fowler, D., M. Coyle, U. Skiba, M. Sutton, J. Neil Cape, S. Reis,... M. Voss (2013). The global nitrogen cycle in the Twentyfirst century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1.621), 1-13. doi: 10.1098/rstb.2013.0164

Referencias

Frantzeskaki, N., T. McPhearson, M. Collier, D. Kendal, H. Bulkeley, A. Dumitru,... L. Pintér (2019). Nature-based solutions for urban climate change adaptation: Linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making. *BioScience,* 69(6), 455-466. doi: 10.1093/biosci/biz042

Friedlander, A., E. Ballesteros, T. Bell, J. Caselle, C. Campagna, W. Goodell,... P. Dayton (2020). Kelp forests at the end of the earth: 45 years later. *PloS one,* 15(3), e0229259. doi: 10.1371/journal.pone.0229259

Fuentes- Castillo, T., R. Scherson, P. Marquet, J. Fajardo, D. Corcoran, M. Román & P. Pliscoff (2019). Modelling the current and future biodiversity distribution in the Chilean Mediterranean hotspot. The role of protected areas network in a warmer future. *Diversity and Distributions*, 25(12), 1.897-1.909. https://www.jstor.org/stable/26801108

Gallant, K., P. Withey, D. Risk, G. van Kooten & L, Spafford (2020). Measurement and economic valuation of carbon sequestration in Nova Scotian wetlands. *Ecological Economics,* 171 (106.619). doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106619

González, P. (2019). *Consumo y mercado de fertilizantes*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27086/2/Consumo_y_mercado_de_los_fertilizantes.pdf

González H., M. Graeve, G. Kattner, N. Silva, L. Castro, J. Iriarte,... C. Vargas (2016). Carbon flow through the pelagic food web in southern Chilean Patagonia: relevance of *Euphausia vallentin*i as key species. *Marine Ecology Progress Series,* 557, 91-110. doi: 10.3354/meps11826

González H. E. et al. (2021) *Visión integrada de datos, información y monitoreo.* Comité Científico para el Cambio Climático, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (en preparación).

González, M., R. Sapiains, S. Gómez-González, R. Garreaud, A. Miranda, M. Galleguillos,... I. Castillo (2020). *Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia* (ANID/FONDAP/15110009). Recuperado del sitio de Center for Climate and Resilience Research: https://www.cr2.cl/incendios/

Graham, M., J. Vasquez & A. Buschmann (2007). Global ecology of the giant kelp Macrocystis: from ecotypes to ecosystems. En R. Gibson, R. Atkinson & J. Gordon (editores), *Oceanography and Marine Biology: An annual review Vol. 45* (pp. 39-88). Miami: CRC Press.

Gramsch, E., A. Muñoz, J. Langner, L. Morales, C. Soto, P. Pérez & M. Rubio (2020). Black carbon transport between Santiago de Chile and glaciers in the Andes Mountains. *Atmospheric Environment*, 232, 117.546. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117546

Grant S., S. Hill, P. Trathan & E. Murphy (2013). Ecosystem services of the Southern Ocean: trade-offs in decision-making. *Antarctic Science,* 25(5), 603-617. doi: 10.1017/S0954102013000308

Griscom, B., J. Adams, P. Ellis, R. Houghton, G. Lomax, D. Miteva,... J. Fargione (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 114(44), 11.645-11.650. doi: 10.1073/pnas.1710465114

Gurney, K & P. Shepson (2021). Opinion: The power and promise of improved climate data infrastructure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(35), e2114115118. doi: 10.1073/pnas.2114115118

Gutiérrez, A., D. Varela, A. Zúñiga, J. Paredes, A. Villarroel, A. Ruiz,... H. Naiman (2016). Desarrollo de tecnologías de cultivo y repoblamiento de *Durvillaea antarctica*, "cochayuyo": Implicancias para la diversificación de la acuicultura y manejo de poblaciones naturales, *VD primer semester 2016* (pp. 88-92). doi: 10.13140/RG.2.1.3440.3445

Hannah, L., P. Roehrdanz, P. Marquet, B. Enquist, G. Midgley, W. Foden,... J. Svenning (2020). 30% land conservation and climate action reduces tropical extinction risk by more than 50%. *Ecography*, 43(7), 943-953. doi: 10.1111/ecog.05166

Hepburn, C., C. Hurd & R. Frew (2006). Colony structure and seasonal differences in light and nitrogen modify the impact of sessile epifauna on the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (L.) C Agardh. *Hydrobiologia*, 560(1), 373-384. doi: 10.1007/s10750-005-1573-7

Henderson, B., P. Gerber, T. Hilinski, A. Falcucci, D. Ojima, M. Salvatore & R. Conant (2015). Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 207, 91-100. doi: 10.1016/j.agee.2015.03.029

Henson, S., C. Beaulieu, T. Ilyina, J. John, M, Long, R. Séférian,... J. Sarmiento (2017). Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems. *Nature Communication*, 8, 14682. doi: 10.1038/ncomms14682

Hernández-Morcillo, M., P. Burgess, J. Mirck, A. Pantera & T. Plieninger (2018). Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science and Policy*, 80, 44-52. doi: 10.1016/j.envsci.2017.11.013

Heusinger, J., D. Sailor & S. Weber (2018). Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios. *Building and Environment,* 131, 174-183. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.003

Hirsh, H., K. Nickols, Y. Takeshita, S. Traiger, D. Mucciarone, S. Monismith & R. Dunbar (2020). Drivers of Biogeochemical Variability in a Central California Kelp Forest: Implications for Local Amelioration of Ocean Acidification. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 125(11). doi: 10.1029/2020JC016320

Hofflinger, A., H. Nahuelpan, À. Boso & P. Millalen (2021). Do Large-Scale Forestry Companies Generate Prosperity in Indigenous Communities? The Socioeconomic Impacts of Tree Plantations in Southern Chile. *Human Ecology*, 49, 619-630. doi: 10.1007/s10745-020-00204-x

Hou-Jones, X., D. Roe & E. Holland (editores) (2021). *Nature-based Solutions in Action: Lessons from the Frontline*. Londres: Bond.

Hoyos-Santillan, J., Mansilla, C. A., (2021). Dinámica del carbono en turberas de la Patagonia chilena. En: E. Domínguez & M. Martínez (editores), *Funciones y Servicios Ecosistémicos de Las Turberas de Sphagnum En La Región de Aysén* (pp. 65-89). https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/67739

Hoyos-Santillan, J., A. Miranda, A. Lara, M. Rojas & A. Sepulveda-Jauregui (2019). Protecting Patagonian peatlands in Chile. *Science,* 366(6470), 1.207-1.208. doi: 10.1126/science.aaz9244

Howard, J., A. Sutton-Grier, D. Herr, J. Kleypas, E. Landis, E. Mcleod,... S. Simpson (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment,* 15(1), 42-50. doi: 10.1002/fee.1451

Hucke-Gaete, R. (2011). Whales might also be an important component in Patagonian fjord ecosystems: comment to Iriarte et al. *Ambio*, 40(1), 104-105. doi: 10.1007/s13280-010-0110-8

IFOP, Instituto de Fomento Pesquero (2019). *Programa de Seguimiento Pesquerías Bajo Régimen de Áreas de Manejo, 2018*. Informe final. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/RepositorioIfop/InformeFinal/P-583011.pdf

INE, Instituto Nacional de Estadísticas (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*. https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf

Ingrao, C., S. Failla & C. Arcidiacono (2020). A comprehensive review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. *Current Opinion in Environmental Science and Health,* 13, 35-45. doi: 10.1016/j.coesh.2019.10.007

IPBES, The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of*

Referencias

the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES/7/10/Add.1). https://www.ipbes.net/news/ipbes-global-assessment-summary-policymakers-pdf

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [version online]. doi: 10.1017/CBO9781107415416

— (2019a). Annex I: Glossary. En R. van Diemen (editor), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 803-829). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/11_Annex-I-Glossary.pdf

— (2019b). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* https://www.ipcc.ch/srccl/

— (2021). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (*Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Nº 6th*). Inter-American Development Bank. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Iriarte, J., H. Gonzalez & L. Nahuelhual (2010). Patagonian Fjord Ecosystems in Southern Chile as a Highly Vulnerable Region: Problems and Needs. *Ambio*, 39, 463-466. doi: 10.1007/s13280-010-0049-9

Jackson, R., K. Lajtha, S. Crow, G. Hugelius, M. Kramer & G. Piñeiro (2017). The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics,* 48, 419-445. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234

Jones, J., A. Almeida, F. Cisneros, A. Iroumé, E. Jobbágy, A. Lara,... J. Villegas (2017). Forests and water in South America. *Hydrological Processes*, 31(5), 972-980. doi: 10.1002/hyp.11035

Kandasamy, S. & B. Nagender Nath (2016). Perspectives on the Terrestrial Organic Matter Transport and Burial along the Land-Deep Sea Continuum: Caveats in Our Understanding of Biogeochemical Processes and Future Needs. *Frontiers in Marine Science,* 3, 259. doi: 10.3389/fmars.2016.00259

Kennedy, H., J. Beggins, C. Duarte, J. Fourqurean, M. Holmer, N. Marbà & J. Middelburg (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4), GB4026. doi: 10.1029/2010GB003848

Khan A., H. Dierssen, T. Scambos, J. Höfer & R. Cordero (2021). Spectral characterization, radiative forcing and pigment content of coastal Antarctic snow algae: approaches to spectrally discriminate red and green communities and their impact on snowmelt. *The Cryosphere*, 15(1), 133-148. doi: 10.5194/tc-15-133-2021

Korhola, A., K. Tolonen, J. Turunen & H. Jungner (1995). Estimating long-term carbon accumulation rates in boreal peatlands by radiocarbon dating. *Radiocarbon*, 37(2), 575-584. doi: 10.1017/S0033822200031064

Krause-Jensen D & C. Duarte (2016). Substancial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9, 737-742. doi: 10.1038/NGEO2790

Krumhansl, K., D. K. Okamoto, A. Rassweiler, M. Novak, J. Bolton, Cavanaugh, K,... J. Byrnes (2016). Global patterns of kelp forest change over the past half-century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13785-13790. doi: 10.1073/pnas.1606102113

Kulakowski, D., R. Seidl, J. Holeksa, T. Kuuluvainen, T. Nagel, M. Panayotov, M. Svoboda, S. Thorn, G. Vacchiano, C. Whitlock, T. Wohlgemuth, P. Bebi (2017). *A walk on the wild side: disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. Forest Ecology and Management*, 388, 120-131. doi: 10.1016/j.foreco.2016.07.037

Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1.492), 815-830. doi: 10.1098/rstb.2007.2185

Lara, A., A. Altamirano, A. Alaniz, C. Álvarez, M. Castillo, M. Galleguillos,... C. Smith (2019). Cambio de uso del suelo en Chile: Oportunidades de mitigación ante la emergencia climática. En M. Sánchez (editor), *Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad* (pp. 236-281). Recuperado de: https://cdn.digital.gob.cl/filer_public/d2/ce/d2ce6fb0-272d-4f6c-aa95-7dd275c32b6b/libro-biodiversidad.pdf

Lehmann, J. (2009). Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach. *Climatic Change*, 97(3), 459-463. doi: 10.1007/s10584-009-9695-y

León-Lobos, P., M. Bustamante-Sánchez, C. Nelson, D. Alarcón, R. Hasbún, M. Way, H. Pritchard & J. Armesto (2020). Lack of adequate seed supply is a major bottleneck for effective ecosystem restoration in Chile: Friendly amendment to Bannister et al. *Restoration Ecology*, 28(2), 277-281. doi: 10.111/rec.13113

Ling, S., C. Cornwall, B. Tilbrook. & C. Hurd (2020). Remnant kelp bed refugia and future phase-shifts under ocean acidification. *PLoS one,* 15(10), e0239136. doi: 10.1371/journal.pone.0239136

Lorenz, K & R. Lal (2018). *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems* [versión e-Book]. doi: 10.1007/978-3-319-92318-5

Lugo, J. (2011). *Diccionario geomorfológico* [versión Adobe Digital Editions]. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/32/32/95-1

Lutz, S. & A. Martin (2014). *Fish Carbon: Exploring Marine Vertebrate Carbon Services* [Monografía]. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/163/original/Fish-Carbon-2014.pdf?1484140288

Lutz, S., H. Pearson, J. Vatter & D. Bhakta (2018). *Oceanic Blue Carbon* [Afiche]. Arendal: GRID-Arendal.

Maltby, E., M. Acreman, M. Blackwell, M. Everard & J. Morris (2013). The challenges and implications of linking wetland science to policy in agricultural landscapes: Experience from the UK National Ecosystem Assessment. *Ecological Engineering*, 56, 121-133. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.086

Mancilla, R., J. Zúñiga, E. Salgado, M. Schiappacasse & R. Chamy (2013). Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in a Mediterranean climate region in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(4), 2-13. doi: 10.2225/vol16-issue4-fulltext-5

Manno C., S. Fielding, G. Stowasser, E. Murphy, S. Thorpe & A. Tarling (2020). Continuous moulting by Antarctic krill drivers major pulses of carbon export in the north Scotia Sea, Southern Ocean. *Nature Communications*, 11(6.051), 2-8. doi: 10.1038/s41467-020-19956-7

Manuschevich, D & C. Beier (2016). Simulating land use changes under alternative policy scenarios for conservation of native forests in south-central Chile. *Land Use Policy*, 51, 350-362. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.08.032

Marquet, P., K. Hodges, J. Jackson & S. Naeem (2019a). Navigating the great transformation in biodiversity and climate. *Science Advances*, 5(11), eaba0969. doi: 10.1126/sciadv.aba0969

Marquet, P., A. Altamirano, M. Arroyo, M. Fernández, S. Gelcich, K. Górski,... C. Smith-Ramirez (editores) (2019b). *Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad*. https://cdn.digital.gob.cl/filer_public/d2/ce/d2ce6fb0-272d-4f6c-aa95-7dd275c32b6b/libro-biodiversidad.pdf

Marquet, P., E. Arellano, R. Arriagada, M. Fernández, A. Gaxiola, C. León, J. Vargas (2021a). *Diseño estratégico de proyecto de evaluación de soluciones basadas en la naturaleza para chile*. Santiago: TNC, CCG.

Referencias

Marquet, P. A., Aurora Gaxiola, Ávila-Thieme M. I., Andrés Pica-Téllez, Vicuña S., Alaniz, A., Etcheberry, G. González, D. Valentina J., Menares, L. (2021b). *Las tres brechas del desarrollo sostenible y el cierre de la brecha ambiental en Chile: Oportunidades para una recuperación post pandemia más sostenible y de bajo carbono en ALC*. Santiago: Cepal.

Martin, A., E. Landis, C. Bryson, S. Lynaugh, A. Mongeau & S. Lutz (2016). *Blue Carbon - Nationally Determined Contributions Inventory. Appendix to: Coastal blue carbon ecosystems. Opportunities for Nationally Determined Contributions*. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/367/original/Blue-Carbon-NDC-Appendix.pdf?1505387683

Melton, J., R. Wania, E. Hodson, B. Poulter, B. Ringeval, R. Spahni,... J. Kaplan (2013). Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: Conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences,* 10(2), 753-788. doi: 10.5194/bg-10-753-2013

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación & Comité Científico COP25 (2019). *Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones*. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/03/Resumen-para-tomadores-de-decisiones.pdf

MMA, Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2017). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017- 2030*. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Estrategia_Nac_Biodiv_2017_30.pdf

— (2018). Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf

— (2019). Informe del Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile 1990-2016. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/2018_NIR_CL.pdf

— (2021). Estrategia climática de largo plazo. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf

Mitsch, W., B. Bernal, A. Nahlik, Ü. Mander, L. Zhang, C. Anderson, C,... H. Brix (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28(4), 583-597. doi: 10.1007/s10980-012-9758-8

Möller, P & A. Muñoz-Pedreros (2014). Legal protection assessment of different inland wetlands in Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 87(1), 1–13. doi: 10.1186/s40693-014-0023-1

Mora-Soto, A., M. Palacios, E. Macaya, I. Gómez, P. Huovinen, A. Pérez-Matus,... M. Macias-Fauria (2020). A high-resolution global map of Giant kelp (Macrocystis pyrifera) forests and intertidal green algae (Ulvophyceae) with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(4), 694. doi: 10.3390/rs12040694

Morales G., Esteban (2014). *Miradas al territorio submarino de Chile*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Moreno-García, M & I. Baena (2019). The Microclimatic Effect of Green Infrastructure (GI) in a Mediterranean City: the Case of the Urban Park of Ciutadella (Barcelona, Spain). *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(3), 100-108. doi: 10.48044/jauf.2019.009

Muñiz, I & C. Rojas (2019). Urban form and spatial structure as determinants of per capita greenhouse gas emissions considering possible endogeneity and compensation behaviors. *Environmental Impact Assesment Review*, 76, 79-87. doi: 10.1016/j.eiar.2019.02.002

Murray, B., L. Pendleton, W. Jenkins & S. Sifleet (2011). *Green payments for blue carbon: Economic incentives for protecting threatened coastal habitats* [Reporte NI R 11-04]. Recuperado del sitio de Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions: https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/blue-carbon-report-paper.pdf

Myllyvirta, L. (2020). *Analysis: Coronavirus temporarily reduced China's CO2 emissions by a quarter*. https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-has-temporarily-reduced-chinas-co2-emissions-by-a-quarter

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

NBS Coalition (2019). The Nature-Based Solutions for Climate Manifesto, 2019. Developed for the UN Climate Action Summit 2019. *UN Secretary General Climate Action Summit*. https://www.unep.org/es/coalicion-de-soluciones-basadas-en-la-naturaleza

Nicol, S., A. Bowie, S. Jarman, D. Lannuzel, K. Meiners & P. Van Der Merwe (2010). Southern Ocean iron fertilization by baleen whales and Antarctic krill. *Fish and Fisheries*, 11(2), 203-209. doi: 10.1111/j.1467-2979.2010.00356.x

Odepa, Oficina de Estudio y Políticas Agrarias (2019). *Panorama Agricultura Chilena*. Recuperado de: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf

Odepa, Oficina de Estudio y Políticas Agrarias & Infor, Instituto Forestal (2010). *Potencial de mitigación del cambio climático asociado a la Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal* [Informe Final]. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2010/01/EstudioMitigacionCambioClimatico.pdf

Oyarzo-Miranda, C., N. Latorre, A. Meynard, J. Rivas, C. Bulboa & L. Contreras-Porcia (2020). Coastal pollution from the industrial park Quintero bay of central Chile: Effects on abundance, morphology, and development of the kelp Lessonia spicata (Phaeophyceae). *PloS one*, 15(10), e0240581. doi: 10.1371/journal.pone.0240581

Palacios, M., D. Osman, J. Ramírez, P. Huovinen & I. Gómez (2021). Photobiology of the giant kelp Macrocystis pyrifera in the land-terminating glacier fjord Yendegaia (Tierra del Fuego): A look into the future?. *Science of the Total Environment*, 751, 141810. doi: j.scitotenv.2020.141810

Paustian, K., J. Lehmann, S. Ogle, D. Reay, G. Robertson & P. Smith (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532(797), 49-57. doi: 10.1038/nature17174

Pedersen, M., K. Filbee-Dexter, N. Frisk, Z. Sárossy & T. Wernberg (2021). Carbon sequestration potential increased by incomplete anaerobic decomposition of kelp detritus. *Marine Ecology Progress Series*, 660, 53-67. https://www.int-res.com/articles/meps_oa/m660p053.pdf

Peiwen, Lu & D. Stead (2013). Understanding the notion of resilience in spatial planning: A case study of Rotterdam, The Netherlands. *Cities*, 35, 200-212. doi: 10.1016/j.cities.2013.06.001

Pendleton, L, D. Donato, B. Murray, S. Crooks, W. Jenkins, S. Sifleet,... A. Baldera (2012). Estimating Global "Blue Carbon" Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS one*, 7(9), e43542. doi: 10.1371/journal.pone.0043542

Pérez-Matus, A., S. Carrasco, S. Gelcich, M. Fernández & E. Wieters (2017). Exploring the effects of fishing pressure and upwelling intensity over subtidal kelp forest communities in Central Chile. *Ecosphere,* 8(5), e01808. doi: 10.1002/ecs2.1808

Perez- Quezada, J. F., J. L. Celis- Diez, C. E. Brito, A. Gaxiola, M. Nuñez- Avila, F. I. Pugnaire & J. J. Armesto (2018). Carbon fluxes from a temperate rainforest site in southern South America reveal a very sensitive sink. *Ecosphere*, 9(4), p.e02193. doi: 10.1002/ecs2.2193

Peters, J., D. Iribarren & J. Dufour (2015). Biomass pyrolysis for biochar or energy applications? A life cycle assessment. *Environmental science & technology*, 49(8), 5.195-5.202. doi: 10.1021/es5060786

Pfister, C., H. Berry & T. Mumford (2018). The dynamics of Kelp Forests in the Northeast Pacific Ocean and

Referencias

the relationship with environmental drivers. *Journal of Ecology*, 106(4), 1.520-1.533. doi: 10.1111/1365-2745.12908

Picón, C., C. Contreras, S. Reyes-Paecke, F. De la Barrera, A. Berrizbeitía & R. Truffello (agosto, 2020). *Cerros isla: piezas clave para la planificación ecológica de ciudades*. Presentación de Workshop 1, Santiago. Resumen https://www.cedeus.cl/exitoso-workshop-sobre-cerros-isla-piezas-claves-para-la-planificacion-ecologica-de-las-ciudades/

Pörtner, H., R. Scholes, J. Agard, E. Archer, A. Arneth, X. Bai, Barnes,... H. Ngo (2021). *IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC*. doi: 10.5281/zenodo.4659158

Rehbein, J., G. Encalada & J. Barbosa (2020). *Propuesta de hoja de ruta para el carbono azul en Chile*. Washington, D. C.: The World Bank.

Reed, D., A. Rassweiler & K. Arkema (2008). Biomass rather than growth rate determines variation in net primary production by giant kelp. *Ecology*, 89(9), 2.493-2.505. doi: 10.1890/07-1106.1

Retamal, C. A. (2015). *Cuantificación de servicios ecosistémicos urbanos en cerros isla: El proyecto de parque urbano para el cerro Chena, Santiago, Chile*. Tesis del Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales, Facultad de arquitectura, diseño y estudios urbanos, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Reyes-Paecke, S., J. Gironas, O. Melo, S. Vicuna & J. Herrera (2019). Irrigation of green spaces and residential gardens in a Mediterranean metropolis: Gaps and opportunities for climate change adaptation. *Landscape and Urban Planning*, 182, 34-43. doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.10.006

Roig Monge, E. (2014). La necesidad de legislación sobre los hidratos de gas en Chile. *Revista de Derecho (Coquimbo)*, 21(1), 221-251. doi: 10.4067/S0718-97532014000100007

Rojas, C., J. Munizaga, O. Rojas, C. Martínez & J. Pino (2019b). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, 80, 47-56. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.09.036

Rojas, C., K. Podvin & O. Barbosa (2019a). Desafíos y oportunidades para un desarrollo urbano sustentable, equitativo y resiliente. En: D. Gútierrez (editor), *Biodiversidad, Género y Cambio Climático: Propuestas basadas en conocimiento. Iniciativa Latinoamericana y el Caribe* (pp. 19-26). https://www.capitalbiodiversidad.cl/wp-content/uploads/2020/01/PolicybriefsCompilado_10-01-20-1.pdf

Rojas, M., P. Aldunce, L. Farías, H. González, P. A. Marquet, J. C. Muñoz, R. Palma-Behnke, A. Stehr y S. Vicuña (editores) (2019). *Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones*. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Rojas, O., M. Zamorano, K. Saez, C. Rojas, C. Vega, L. Arriagada & C. Basnou (2017). Social perception of ecosystem services in a coastal wetland post-earthquake: A case study in Chile. *Sustainability*, 9(11), 1983. doi: 10.3390/su9111983

Roleda, M & C. Hurd (2012). Seaweed responses to ocean acidification. En: C. Wiencke & K. Bischof (editores), *Seaweed biology: Novel insights into ecophysiology, ecology and utilization* (pp. 407-431). https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-28451-9

Roman, J & J. McCarthy (2010). The whale pump: Marine mammals enhance primary productivity in a coastal basin. *PLoS one*, 5(10), e13255. doi: 10.1371/journal.pone.0013255

Rosa-Schleich, J., J. Loos, O. Mußhoff & T. Tscharntke (2019). Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems – A review. *Ecological Economics*, 160, 251-263. doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.03.002

Rosman, J., M. Denny, R. Zeller, S. Monismith & J. Koseff (2013). Interaction of waves and currents with kelp forests (Macrocystis pyrifera): Insights from a dynamically scaled laboratory model. *Limnology and oceanography*, 58(3), 790-802. doi: 10.4319/lo.2013.58.3.0790

Romero, H., M. Méndez & P. Smith (2012). Mining development and environmental injustice in the atacama desert of Northern Chile. *Environmental Justice*, 5(2), 70-76. doi: 10.1089/env.2011.0017

Rowe, P., R. Cordero, S. Warren, E. Stewart, S. Doherty, A. Pankow,... S. Neshyba (2019). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Scientific reports*, 9(4.008), 1-16. doi: 10.1038/s41598-019-39312-0

Saavedra, F., S. Kampf, S. Fassnacht & J. Sibold (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere*, 12(3), 1027-1046. doi: 10.5194/tc-12-1027-2018

Sala, E., J. Mayorga, D. Bradley, R. Cabral, T. Atwood, A. Auber,... J. Lubchenco (2021). Protecting the Global Ocean for Biodiversity, Food and Climate. *Nature*, 592, 397-402. doi: 10.1038/s41586-021-03371-z.

Sallée, J., R. Matear, S. Rintoul & A. Lenton (2012). Localized subduction of anthropogenic carbon dioxide in the Southern Hemisphere oceans. *Nature Geoscience*, 5(8), 579-584. doi: 10.1038/ngeo1523

Schiappacasse, N., L. Díaz-Robles, F. Cereceda- Balic & P. S. Schwartau (2013). Health impacts in South-central Chile due to misuse of wood-burning stoves. *Electronic Journal of Energy & Environment*, 1(3). doi: 10.7770/ejee-V1N3-art685

Schlegel, B., C. Little, M. Urrutia, G. Hernández & R. Pasten (2020). Incorporando la multifuncionalidad en la evaluación económica de proyectos de restauración de bosques nativos siempreverdes en el sur de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR Chile*, 26(1), 23-40. https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/29900/articulo2-cifor-26-1.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Schueftan, A., & A. D. González (2015). Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. *Energy Policy*, 79, 48-57. doi: 10.1016/j.enpol.2015.01.008

Seddon, N., A. Chausson, P. Berry, C. Girardin, A. Smith & B. Turner (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1.794), 20190120. doi: 10.1098/rstb.2019.0120

Sernapesca, Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (2020). *Fiscalización en pesca y acuicultura: informe de actividades 2020*. http://www.sernapesca.cl/sites/default/files/ifpa_2020_0.pdf

Stanley, P., J. Rowntree, D. Beede, M. DeLonge & M. Hamm (2018). Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*, 162, 249-258. doi: 10.1016/j.agsy.2018.02.003

Sun, R., A. Chen, L. Chen & Y. Lü (2012). Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing. *Ecological Indicators*, 20, 57-64. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.02.006

TESES, Núcleo Transdisciplinario en Estrategias Socio-Ecológicas para la Sostenibilidad de los Bosques Australes (diciembre 2020). *Identificación de superficies potenciales de bosque nativo para el incremento de secuestro de carbono*. Exposición presentada en la Cumbre Social por la Acción Climática, Santiago.

Thiel, M., Macaya, E. C., Acuña, E., Arntz, W. E., Bastias, H., Brokordt, K., Camus, P. A., Castilla, J. C., Castro, L. R., Cortés, M. & C. P. Dumont (2007). The Humboldt Current System of Northern and Central Chile: oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review,* 45, 195-344. doi: 10.1201/9781420050943.ch6

Referencias

Thorslund, J., J. Jarsjo, F. Jaramillo, J. Jawitz, S. Manzoni, B. Basu,... G. Destouni (2017). Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering*, 108, 489-497. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.07.012

Torralba, M., N. Fagerholm, P. Burgess, G. Moreno & T. Plieninger (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230, 150-161. doi: 10.1016/j.agee.2016.06.002

Torres, R., S. Pantoja, N. Harada, H. González, G. Daneri, M. Frangopulos,... M. Fukasawa (2011). Air sea CO_2 fluxes along the coast of Chile: From CO_2 outgassing in central northern upwelling waters to CO_2 uptake in southern Patagonian fjords. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 116(C9), 150-161. doi: 10.1029/2010JC006344

UICN, Unión Internacional para la Conversación de la Naturaleza (2020). *Orientación para usar el Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza: Un marco fácil de usar para la verificación, diseño y ampliación de las soluciones basadas en la naturaleza* [versión Adobe Digital Editions]. doi: 10.2305/IUCN.CH.2020.09.es

Vásquez, J., S. Zuñiga, F. Tala, N. Piaget, D. Rodríguez & J. Vega (2014). Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 1.081-1.088. doi: 10.1007/s10811-013-0173-6

Vásquez, J. A. (2016). The brown seaweeds fishery in Chile. Fisheries and aquaculture in the modern world. *IntechOpen*, 123-141. doi: 10.5772/62876

Vergara-Asenjo, G., B. Schlegel, C. Little, M. Martin & R. Mujica (2019). ¿Degradación o degradado? Necesidad de una propuesta conceptual para recuperar la funcionalidad y capacidad productiva de los bosques nativos de la zona centro sur de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR Chile*, 25 (1), 69-80. https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/29148/articulo5-cifor-25-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Villa, J & B. Bernal (2018). Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering*, 114, 115-128. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.037

Westermeier, R., P. Murúa, D. Patiño, L. Muñoz, C. Atero & D. Müller (2014). Repopulation techniques for Macrocystis integrifolia (Phaeophyceae: Laminariales) in Atacama, Chile. *Journal of Applied Phycology*, 26, 511-518. doi: 10.1007/s10811-013-0069-5

Westermeier, R., P. Murúa, J. Patiño, L. Muñoz & D. Müller (2016). Holdfast fragmentation of Macrocystis pyrifera (integrifolia morph) and Lessonia berteroana in Atacama (Chile): a novel approach for kelp bed restoration. *Journal of Applied Phycology*, 28, 2.969-2.977. doi: 10.1007/s10811-016-0827-2

Westermeier, R., P. Murúa, D. Patiño, L. Muñoz, A. Ruiz, C. Atero & D. Müller (2013). Utilization of holdfast fragments for vegetative porpagation of Macrocystis integrifolia in Atacama, Northen Chile. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 639-642. doi: 10.1007/s10811-012-9898-x

Wilson, R., N. Glasser, J. Reynolds, S. Harrison, P. Anacona, M. Schaefer & S. Shannon (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275-291. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.004

Xiang, Y., J. Jin, H. Ping & M. Liang (2008). Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency. *Agricultural Sciences in China*, 7(4), 469-479. doi: 10.1016/S1671-2927(08)60091-7

Xu, S., X. Liu, X. Li & C. Tian (2019). Soil organic carbon changes following wetland restoration: A global meta-analysis. *Geoderma*, 353, 89-96. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.06.027

Yang, H., J. Tang, C. Zhang, Y. Dai, C. Zhou, P. Xu,... X. Chen (2020). Enhanced Carbon Uptake and Reduced Methane Emissions in a Newly Restored Wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(1). doi: 10.1029/2019JG005222

Zedler, J & S. Kercher (2005). Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39-74. doi: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144248

Zickfeld, K., Azevedo, D., Mathesius, S., & Matthews, H. D. (2021). Asymmetry in the climate–carbon cycle response to positive and negative CO_2 emissions. *Nature Climate Change*, 11, 613-617. doi: 10.1038/s41558-021-01061-2

Zúñiga-Jara, S., F. Tala, A. Vega, N. Piaget & J. Vásquez (2009). Valor económico de los bosques de Algas Pardas en las costas III Y IV Región de Chile. *Gestión Ambiental*, 18, 63-86. https://www.ceachile.cl/revista/cdn/GA_18_Zuniga.pdf

COMITÉ
CIENTÍFICO
DE CAMBIO
CLIMÁTICO

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación
Gobierno de Chile

Euroclima+

Financiado por
la Unión Europea

NACIONES UNIDAS
CEPAL