

ANÁLISIS PARA LA PREVENCIÓN DE CAMBIOS DE RÉGIMEN Y EL FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA EN LOS ECOSISTEMAS DEL ARCHIPIÉLAGO DE TIERRA DEL FUEGO

ANALYSIS FOR THE PREVENTION OF REGIME SHIFTS AND STRENGTHENING RESILIENCE IN THE ECOSYSTEMS OF TIERRA DEL FUEGO ARCHIPELAGO

PATRICIA VILLARROEL SÁEZ¹

Resumen: *Esta investigación identifica los principales elementos de los ecosistemas para abordar con base científica, desde la ecología, la gestión sustentable de los mismos y de los servicios ecosistémicos que estos proveen. Debido a que muchos ecosistemas están siendo cada vez más afectados por perturbaciones de origen antrópico, es necesario visibilizar este enfoque para prevenir cambios desfavorables que se pudiesen estar generando.*

La metodología propuesta busca identificar factores impulsores del cambio, mecanismos de retroalimentación que los eviten o sustenten, regímenes alternos, umbrales para el cambio de régimen ecosistémico y puntos de influencia dentro del sistema para implementar opciones de gestión.

Tierra del Fuego surge como un importante ejemplo para un estudio de caso, por la singularidad y vulnerabilidad de sus ecosistemas. En particular, se analizan sus tres ecosistemas más representativos: los bosques subantárticos, las turberas y los ecosistemas ribereños.

*Entre los impulsores del cambio se encuentran el cambio de régimen de los incendios forestales, la invasión del *Castor canadensis*, el drenaje de turberas y la extracción de turba. Los mecanismos de retroalimentación pueden mantener la estabilidad o llevar a comportamientos impredecibles a los ciclos de deforestación-regeneración del bosque subantártico (*Nothofagus spp.*), las funciones de fuente o sumidero de carbono de las turberas, y los regímenes lótico y léntico de*

1 Patricia Villarroel Sáez es magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Ambiente de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, e Ingeniera Civil Bioquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Actualmente es perito judicial en nómina de las diecisiete cortes de apelaciones de Chile, en la especialidad Ingeniería Ambiental y subespecialidades Contaminación y Energías Renovables, para el bienio 2024-2025. Desde junio de 2023 es miembro del grupo asesor Methodological Advisory Group (MAG) para la campaña *Race to Resilience*, iniciativa de los líderes climáticos de Naciones Unidas High-Level Climate Champions. Correo electrónico: patricia.villarroel.s@mail.pucv.cl.

Artículo recibido el 20 de septiembre de 2023 y aceptado el 8 de enero de 2024.

las aguas. Para no llevar a estos ecosistemas a un cambio de régimen desfavorable o irreversible, se deberían respetar ciertos umbrales funcionales: la capacidad de carga para sostener a la población de castores, el nivel freático de las turberas y el régimen metabólico en los ecosistemas ribereños. Estos son clave para la creación de resiliencia y la gestión sustentable de los servicios ecosistémicos: hábitats de especies nativas, sumideros de carbono y regulación del clima.

Palabras claves: *Tierra del Fuego, bosque subantártico, turberas, sumidero de carbono, servicios ecosistémicos, resiliencia.*

Abstract: *This research identifies the main elements of ecosystems to address scientifically, particularly from ecology, their sustainable management and the sustainable management of ecosystem services they provide. As many ecosystems are increasingly affected by anthropogenic disturbances it is necessary to make this approach visible in order to prevent unfavorable potential changes. In this context, Tierra del Fuego emerges as an important example to be used as a case study due to the uniqueness and vulnerability of its ecosystems. The proposed methodology aims to identify drivers, feedback mechanisms preventing or sustaining ecosystem changes, alternate regimes, thresholds for regime shifts, and leverage points within the system to intervene and implement management options. By applying these concepts, the three most representative ecosystems of Tierra del Fuego are analyzed: sub-antarctic forests, peatlands, and what connects them both- the freshwater streams that constitute riparian ecosystems.*

*Some drivers of change identified include the alteration of wildfire regimes, the invasion of exotic species *Castor canadensis*, the drainage of peatlands, and the extraction of peat. Feedback mechanisms could either maintain a stable state or lead to unpredictable behavior in the deforestation-regeneration cycles of the sub-antarctic forest (*Nothofagus* spp.), the carbon source/sink functions of peatlands, and the lotic and lentic regimes of freshwater. To prevent unfavorable or irreversible regime shifts in these ecosystems, some functional thresholds should be considered: the carrying capacity that sustains the beaver population, the water table of peatlands and the metabolic regime in riparian ecosystems. These points are key to building ecosystem resilience and sustainably managing ecosystem services such as habitats for native species, carbon sinks and climate regulation.*

Keywords: *Tierra del Fuego, sub-antarctic forest, peatlands, carbon sink, ecosystem services, resilience.*

I. INTRODUCCIÓN

Considerando el dedicado trabajo de investigadores especialistas en las diversas áreas del quehacer ambiental y los esfuerzos transdisciplinarios de múltiples actores realizados durante décadas, este trabajo tiene por objetivo

colaborar en la integración de saberes respecto al funcionamiento ecosistémico, especialmente en zonas vulnerables de alto valor ecológico y con creciente riesgo de exposición de los objetos de protección ambiental, en el contexto de la triple crisis planetaria², y, en particular, ante los efectos acelerados del cambio climático global, dado que esta integración y su comunicación son aún muy escasas.

La presente investigación utiliza los conceptos más actuales en ecología y estudio de los ecosistemas para abordar con base científica la gestión sustentable de los mismos, bajo la premisa de que un cambio de régimen ecosistémico desfavorable que se evita corresponde a uno o más servicios ecosistémicos que se mantienen, reduciendo el impacto socioambiental.

El archipiélago de Tierra del Fuego³, ubicado al sur y al este del estrecho de Magallanes, en el extremo sur de Sudamérica, representa un ejemplo de ecosistema especialmente vulnerable. La finalidad de este trabajo es lograr un entendimiento más integral de sus dinámicas y contribuir a incrementar la resiliencia del territorio y la población que lo habita, a través del aprendizaje de experiencias y conocimientos que puedan ser transmitidos, compartidos y aplicados idealmente mediante principios de resiliencia⁴ adicionales, como la participación y la gobernanza policéntrica.

Tierra del Fuego surge entonces como un importante estudio de caso, por la singularidad y vulnerabilidad de sus ecosistemas, específicamente con foco en los bosques subantárticos de especies del género *Nothofagus*, las turberas y los ecosistemas ribereños invadidos por la especie exótica *Castor canadensis* (en adelante, “el castor”). En primer lugar, se presentan los antecedentes sobre estos ecosistemas, destacando la importancia de sus servicios ecosistémicos. Luego se identifican los principales elementos en el funcionamiento de los ecosistemas y se define el concepto de resiliencia, junto con su implicancia para los sistemas socioecológicos.

2 Triple crisis planetaria: amplia evidencia científica muestra que se han sobrepasado los umbrales para los límites de comportamiento predecible y estable en al menos tres sistemas planetarios: clima (cambio climático), integridad de la biosfera (pérdida acelerada de biodiversidad) y flujos biogeoquímicos (ciclo del nitrógeno).

3 El archipiélago de Tierra del Fuego se encuentra entre los paralelos 52° 28' y 56° de latitud sur y los meridianos 63° 44' y 74° 45' de longitud oeste. Sus límites son el estrecho de Magallanes por el norte, el océano Pacífico por el oeste, el Atlántico por el este y el paso o mar de Drake por el sur.

4 BIGGS y otros (2012) p. 424.

Aplicando estos conceptos, se analizan los ecosistemas mencionados con una metodología adaptada de la estructura que muestra la base de datos Regime Shifts Database⁵ del centro de investigación Stockholm Resilience Centre, que busca identificar impulsores del cambio de régimen ecosistémico, mecanismos de retroalimentación que los regulen, magnifiquen o sustenten, umbrales de cambio, posibles regímenes alternos y puntos de influencia dentro del sistema para su intervención exitosa. A partir del análisis surgen propuestas de gestión sustentable, en términos de monitoreo de umbrales para evitar o revertir cambios desfavorables en los servicios ecosistémicos, con el objetivo último de fortalecer su resiliencia y favorecer su protección. Entre ellas, se encuentran las siguientes: sustentar el hábitat de especies nativas subantárticas únicas en el planeta, conservando la biodiversidad; actuar como sumidero de carbono y archivo paleoambiental, y regular el ciclo del agua y el clima.

II. ANTECEDENTES

1. Descripción del área de estudio: archipiélago de Tierra del Fuego

Tierra del Fuego es un archipiélago que se encuentra al sur y al este del estrecho de Magallanes, en el extremo sur de Sudamérica, siendo la Isla Grande de Tierra del Fuego la que ocupa mayor superficie, con 48.000 km² (aproximadamente un 70% del archipiélago)⁶. El archipiélago está dividido geopolíticamente por el límite entre la República Argentina y la República de Chile, teniendo cada país soberanía sobre parte del territorio, incluida la Isla Grande de Tierra del Fuego.

El área de estudio, señalada en la figura 1, abarca el territorio argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego, en el que se encuentran los departamentos de Río Grande, Tolhuin y Ushuaia (provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur), e incluye la Isla de los Estados. El territorio chileno dentro del área de estudio comprende las comunas de Porvenir, Primavera y Timaukel en la provincia de Tierra del Fuego (Isla Grande y otras) y Cabo de Hornos (Isla Navarino y otras) en la provincia Antártica Chilena (Región de Magallanes y Antártica Chilena).

⁵ <https://www.regimeshifts.org>

⁶ FRANGI y otros (2005) p. 2.

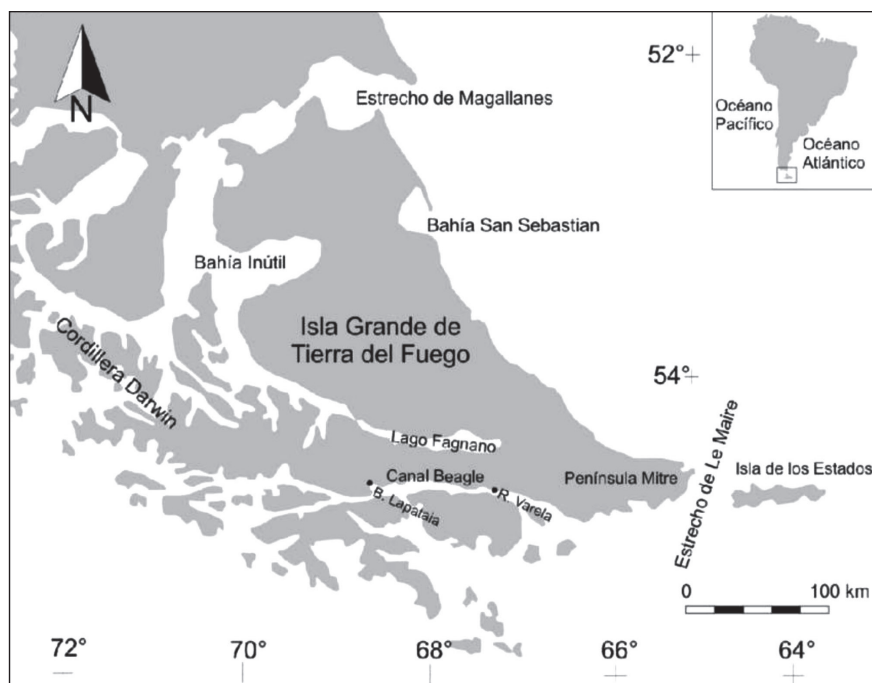


Figura 1. Mapa del archipiélago de Tierra del Fuego publicado por Ponce y otros, 2011.

2. Bosques subantárticos

Los bosques subantárticos de Tierra del Fuego son los ecosistemas forestales más australes del planeta. Conformados únicamente por especies nativas, estos bosques poseen en general una baja diversidad biológica⁷⁻⁸, posiblemente por la influencia climática de los desplazamientos anticiclónicos del sistema antártico en esta latitud relativamente alta⁹⁻¹⁰. La biodiversidad arbórea de estos bosques se concentra principalmente en tres especies del género *Nothofagus*: la lenga (*N. pumilio*), el coigüe de Magallanes (*N. betuloides*) y el ñire o ñirre (*N. antarctica*)¹¹. Además, se

7 FRANGI y otros (2005) p. 14.

8 RUGGIRELLO y otros (2023a) p. 1.

9 PISANO (1997) p. 10.

10 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) p. 3.

11 FRANGI y otros (2005) p. 2.

ha observado que este estrés climático podría ser causante de un menor crecimiento diametral y en altura, y menor inmunidad y tiempo de vida de estos mismos árboles en latitudes más bajas¹². Estos bosques se asientan bien en pendientes donde sirven de control de la erosión por viento y lluvias¹³. Estas características hacen que este ecosistema sea particularmente vulnerable ante perturbaciones antrópicas, con un estado de equilibrio dinámico que depende fuertemente de los sistemas hídrico, clima y suelo, especialmente por la regulación y retención de agua, materia orgánica y nutrientes¹⁴.

Se estima que el bosque nativo subantártico cubre más de 1.200.000 hectáreas (ha) en todo el territorio del archipiélago. En la parte chilena de Tierra del Fuego, tiene mayor presencia en las comunas de Timaukel (Isla Grande, más de 400.000 ha) y Cabo de Hornos (Isla Navarino, casi 200.000 ha). En territorio argentino cubrirían más de 600.000 ha¹⁵. La singularidad de estos ecosistemas, debida a su localización, influencia climática extrema y modelado glaciar histórico adquiere gran relevancia al representar un conjunto de indicadores de procesos adaptativos y evolutivos únicos a nivel global¹⁶, que deberían ser monitoreados y estudiados, en línea con las acciones climáticas y de protección de la biodiversidad. Entre los servicios ecosistémicos que proveen estos bosques, se encuentran los siguientes:

- Captar dióxido de carbono de la atmósfera, producir biomasa forestal y funcionar como reservorio o sumidero de carbono (*carbon sink*), lo que regula el clima.
- Mantener la calidad del suelo y el ciclo de nutrientes, necesarios para sustentar la biodiversidad del bosque, su regeneración y la cadena trófica.
- Controlar la erosión eólica y pluvial, especialmente en zonas altas y de pendientes, protegiendo del suelo y sirviendo como regulador del ciclo hidrológico, y aportando superficie de evapotranspiración y de absorción de agua por las raíces.

12 PISANO (1997) p. 12.

13 ITURRASPE y URUILOLO (2000) p. 6.

14 PISANO (1997) pp. 10-16.

15 FRANGI y otros (2005) p. 2.

16 PISANO (1997) pp. 10-16.

– Ser hábitat natural de flora y fauna nativa única en el planeta, aportando diversidad biológica y redundancia ecosistémica para fortalecer la resiliencia del mismo.

3. *Ecosistemas ribereños*

El régimen hidrológico de un ecosistema acuático representa un conjunto de variables que definen su comportamiento en cuanto a sus caudales, tiempos de residencia del agua y nivel freático, entre otras. Los ecosistemas de agua dulce se clasifican en lóticos y lénticos, según sea el régimen de sus corrientes. Un ecosistema de agua dulce con régimen lótico también se conoce como ribereño, ya que presenta un curso de agua que fluye natural y continuamente en una dirección determinada, como un río o arroyo. En cambio, los ecosistemas lénticos presentan un régimen de aguas casi inmóviles o estancadas, como los estanques, las lagunas, los embalses y los lagos, también conocidos como ecosistemas lacustres.

Con el retroceso de los glaciares en Tierra del Fuego, luego de la última deglaciación del Pleistoceno, las corrientes del nuevo sistema hidrológico convergieron hacia el estrecho de Magallanes, bahía Inútil, bahía San Sebastián, el lago Fagnano y el canal Beagle, dando origen a distintos sistemas lacustres, algunos ya desaparecidos y otros transformados en turberas. El lago Fagnano presenta la principal cuenca lacustre de la Isla Grande de Tierra del Fuego, segunda cuenca hídrica en extensión, después del río Grande, que constituye la cuenca más significativa en extensión y caudal, cuya administración está dividida por el límite entre Argentina y Chile. Además, se identifican en este territorio las cuencas de turberas (mayormente hacia el sur) y de estepa (hacia el norte), estas últimas de menor caudal y reservorios limitados¹⁷. En las cuencas de los ríos del sector este de la Isla Grande, las turberas llegan a cubrir sobre el 80% del área total, donde son las principales reguladoras de los flujos hídricos¹⁸.

Entre las funciones que tienen las corrientes de agua dulce de un ecosistema ribereño, se encuentran controlar el nivel freático y mantener en equilibrio la carga de nutrientes. Su interacción dinámica en el largo plazo

17 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) pp. 5, 9 y 11.

18 LEÓN y otros (2021) p. 7.

promueve la estabilidad de estos ecosistemas. De esta manera, se tiene que los servicios ecosistémicos proporcionados son los siguientes:

- Transportar y distribuir sedimentos, materia orgánica y nutrientes a lo largo de la cuenca, atravesando distintos ecosistemas y regulando los ciclos hidrológico y biogeoquímico.

- Ser hábitat de comunidades acuáticas y fuente de alimentación de aves y otros animales, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y mantención de la cadena trófica.

- Ser fuente de agua para consumo humano y animal, transportando y distribuyendo el recurso hídrico proveniente del deshielo en montañas y glaciares.

- Mantener el intercambio gaseoso en los procesos de respiración y fotosíntesis del ecosistema y el balance de energía entre la atmósfera y las superficies de los cuerpos de agua, nieve, hielo, suelo y vegetación, regulando el clima.

4. *Turberas*

Las turberas son particularmente importantes debido a su rol como sumideros de grandes cantidades carbono por unidad de superficie (hasta 30 kg/m³) y como reguladoras de los flujos de agua repentinos o estacionales provenientes de las precipitaciones, el derretimiento de la nieve acumulada en las montañas y el deshielo de los glaciares¹⁹⁻²⁰.

La captura de dióxido de carbono en las turberas se produce por fotosíntesis en sus especies vegetales. Luego esa materia orgánica (hojas, ramas y raíces) se descompone lenta y parcialmente, acumulándose como turba. La descomposición parcial genera emisiones de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), ambos gases de efecto invernadero. Sin embargo, en el balance ecosistémico normal, la tasa captura/emisión neta favorece a la captura, quedando establecido un servicio ecosistémico de sumidero de carbono²¹⁻²². Gracias a su gran capacidad de retención de agua, las turberas en Tierra del Fuego pueden interceptar hasta el 100% de las precipitaciones

19 LEÓN y otros (2021) p. 5.

20 ITURRASPE y URQUIULO (2000) pp. 7 y 13.

21 ITURRASPE (2010) p. 7.

22 ITURRASPE y URQUIULO (2021) pp. 169 y 180.

estivales en condiciones normales, contribuyendo al escurrimiento de un mínimo caudal superficial, ya que la mayor parte de lo recibido se convierte en flujo de evapotranspiración²³.

En general, las turberas pueden clasificarse en dos grandes tipos: las ombrotróficas u ombrogénicas (*bogs*), y las minerotróficas o geogénicas (*fens*). En las turberas ombrotróficas, las plantas que las componen solo reciben agua de las precipitaciones, lo que determina su ambiente ácido y un bajo contenido de nutrientes. En ellas dominan los musgos del género *Sphagnum* y presentan la característica de ser sumideros de carbono de largo plazo, al ser capaces de acumular grandes cantidades de turba.

Por su parte, las turberas minerotróficas tienen un nivel freático estable y cercano a la superficie del suelo, por lo que pueden recibir aportes de las aguas subterráneas cuando las precipitaciones no son suficientes, además de aprovechar aportes nutricionales por estar en contacto con el subsuelo mineral. Este balance hídrico y nutricional les permite mantener una acidez moderada, con una mayor diversidad de flora, donde conviven los musgos y las plantas vasculares, siendo estas últimas las dominantes. Por ello, con una mayor productividad primaria, acumulan más carbono en el corto plazo. Sin embargo, en el largo plazo estas turberas acumulan menos turba que las dominadas por *Sphagnum* u ombrotróficas, que pueden mantener las condiciones ambientales para una baja tasa de descomposición²⁴⁻²⁵⁻²⁶. Tanto el musgo como la turba son ampliamente valorados como recursos explotables; sin embargo, a diferencia del musgo, la turba es considerada un recurso fósil no renovable, apto para su explotación minera²⁷. El manejo sustentable de las turberas busca conciliar la actual separación del ecosistema entre componentes bióticos y abióticos, ya que ello vulnera su funcionalidad y amenaza su existencia.

Ejemplos de turberas dominadas por el musgo *Sphagnum magellanicum* en Tierra del Fuego son la turbera Karukinka en territorio chileno y las turberas Andorra y Terra Australis en territorio argentino²⁸.

23 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) p. 9.

24 ITURRASPE (2010) pp. 3 y 9.

25 OSPINA y MOOR (2017) (s.p.).

26 LEÓN y otros (2021) p. 12.

27 LEÓN y otros (2021) pp. 1 y 13.

28 VAN BELLEN y otros (2016) p. 490.

En el territorio chileno del archipiélago, las principales turberas se encuentran en la provincia de Tierra del Fuego, con más de 26.400 ha, y en la provincia Antártica Chilena, con 67.200 ha²⁹.

En la Isla Navarino, comuna de Cabo de Hornos, el Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad (SIMBIO) del Ministerio del Medio Ambiente contabiliza más de 21.900 ha de turberas costeras y más de 12.500 ha de turberas interiores. Esta isla se encuentra categorizada como área prioritaria para la conservación, para los efectos de la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente de Chile³⁰. En la comuna de Timaukel (provincia de Tierra del Fuego), la iniciativa privada de conservación Parque Karukinka protege casi 300.000 ha de bosque nativo y turberas, representando estas últimas casi un 25% de esta área³¹.

Pero es en la parte argentina del archipiélago donde se encuentra la mayor cantidad de turberas, con más de 200.000 ha, concentrándose principalmente en la península de Mitre, al extremo sudoriental de la Isla Grande³². Aquí, las turberas constituyen el principal mecanismo de almacenamiento de agua de las cuencas, ya que las precipitaciones no llegarían a los cauces superficiales de no ser por su función ecosistémica reguladora de los flujos hídricos. Esta península constituye la principal reserva y más extensa zona de turberas activas y prístinas de Sudamérica.

En el sector cordillerano, las turberas funcionales se ubican preferentemente en los valles de origen glaciario, como el valle Tierra Mayor, valle Carbajal y valle del río Lapataia, entre otros, y también en las cercanías de los cursos de agua de escorrentía. Además, es posible encontrarlas en ecosistemas de estepa, donde permanecen inactivas, es decir, predomina el material fósil o turba por sobre el desarrollo vegetal³³. En las figuras 2 y 3 se ilustran las áreas de turberas en el archipiélago de Tierra del Fuego (Chile y Argentina, respectivamente).

29 DOMÍNGUEZ y VEGA (2015) p. 72.

30 CHILE, *Ley N° 19.300*, artículo 11, letra d).

31 WCS CHILE (2019).

32 GROOTJANS y otros (2014) pp. 1 y 2.

33 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) p. 9.

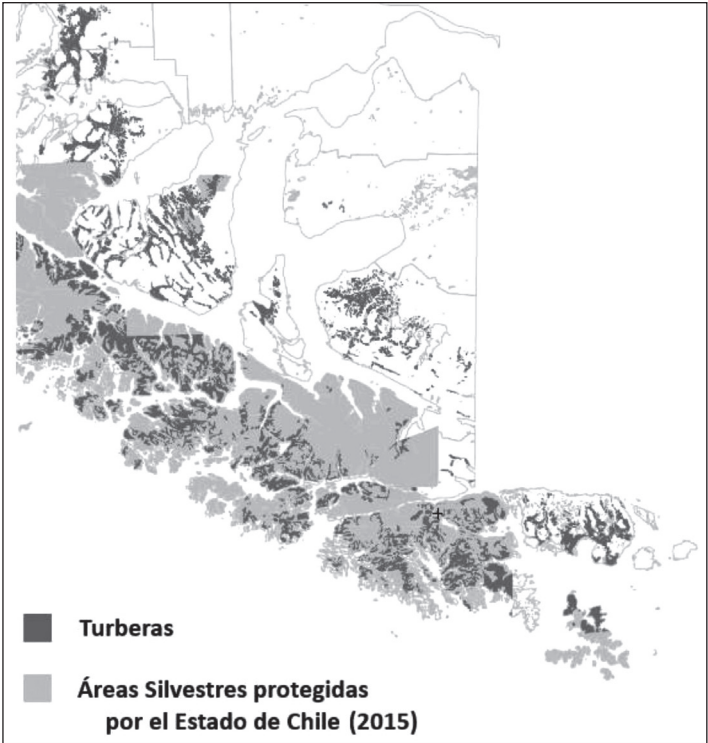


Figura 2. Distribución de turberas al sur y al este del estrecho de Magallanes, República de Chile. Adaptado de Domínguez y Vega (2015).



Figura 3. Distribución de turberas predominantemente en la península de Mitre, provincia de Tierra del Fuego, República Argentina. Adaptado de Iturraspe (2010).

Entre las funciones ecosistémicas destacadas³⁴⁻³⁵⁻³⁶⁻³⁷⁻³⁸ de las turberas están las siguientes:

- Ser hábitat para fauna nativa y migratoria: aves, anfibios, guanacos, etc., conservando la biodiversidad endémica.
- Proveer de agua dulce para consumo humano y agropecuario.
- Regular la hidrología de las cuencas. Constituyen un componente estructural de las cuencas hidrográficas dado que, por su enorme capacidad de retención de agua, sirven como verdaderas esponjas para mitigar inundaciones repentinas y controlar los flujos estacionales de agua proveniente del derretimiento de la nieve acumulada y el derretimiento de glaciares, liberando posteriormente el agua retenida de forma lenta y constante. Previenen la erosión por exceso de escorrentía ayudando a mantener el agua en las cuencas hidrográficas para el abastecimiento humano y agropecuario.
- Acumular materia orgánica sirviendo como sumideros de carbono a largo plazo.
- Regulación del clima a nivel global y mitigación del cambio climático.
- Servir como importante registro paleoambiental e insumo científico que permite estudiar y reconstruir patrones hidrológicos y dinámicas del clima y biodiversidad asociada.

5. *Funcionamiento ecosistémico*

El estudio de ecosistemas considera los componentes bióticos y abióticos de la naturaleza con un enfoque proceso-funcional, centrado en los flujos y el procesamiento de materia y energía como un sistema. De esta manera, se observa que sus estructuras, sus funciones y la dinámica de relaciones existentes entre los diversos componentes presentan comportamientos predecibles, con mecanismos de retroalimentación (*feedbacks*) que refuerzan y aseguran la continuidad de estas dinámicas.

34 ITURRASPE (2010) pp. 1 y 12.

35 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) pp. 3 y 7.

36 LEÓN y otros (2021) pp. 1 y 15.

37 CR2, CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (2020).

38 VAN BELLEN y otros (2016) p. 490.

Entonces, cuando un ecosistema presenta un comportamiento característico estable —estado que se mantiene en el tiempo de manera natural—, se logra establecer un régimen ecosistémico.

Un cambio de régimen ecosistémico (*regime shift*) ocurre cuando el comportamiento predecible del sistema (respuesta lineal) se vuelve impredecible (respuesta no lineal), lo cual es desencadenado por una serie de cambios leves pero continuos en variables internas o externas del ecosistema, que se incrementan o decrecen hasta atravesar un punto crítico de no retorno (*tipping point*). Los cambios de regímenes son bruscos, repentinos, de gran envergadura y pueden afectar tanto la estructura como la funcionalidad del ecosistema y sus relaciones.

Un ecosistema también puede funcionar en regímenes alternos (*alternate regimes*). Dos regímenes ecosistémicos alternos, A y B, están separados por un umbral (*threshold*) que, al ser cruzado, causa la desestabilización del régimen A, llevando al ecosistema a estabilizarse en un nuevo régimen B, donde el equilibrio dinámico es diferente. Una vez en este régimen, podría nuevamente ocurrir un cruce de umbral en el sentido opuesto, alternando el ecosistema entre ambos regímenes (por ejemplo, estacionalmente).

La figura 4 ilustra el cambio de régimen ecosistémico de un estado estable A a otro estado B, una vez que se cruza el umbral de tolerancia del sistema ante sobresaltos y perturbaciones, llevándolo a un comportamiento impredecible y generalmente desfavorable.

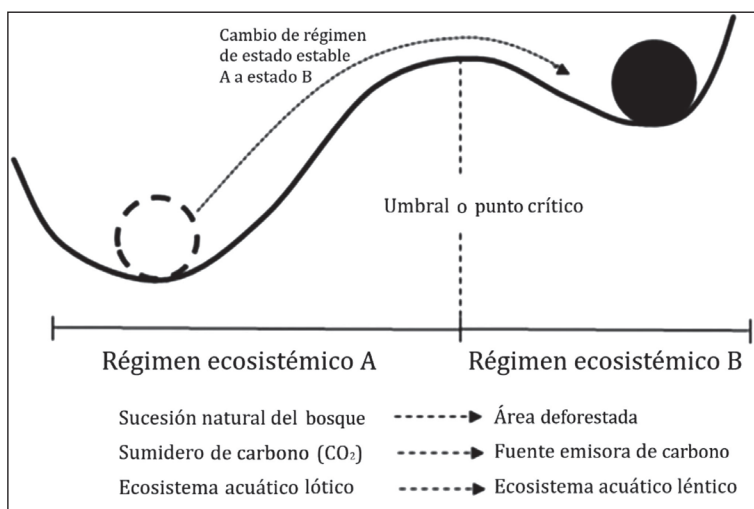


Figura 4. Ilustración del cambio de régimen ecosistémico, adaptada de Chemello y otros (2018).

Mientras más se conoce la dinámica de un ecosistema, más probable es que se puedan identificar sus puntos de influencia (*leverage points*), es decir, aquellas variables, estructuras o mecanismos donde es posible intervenir mínimamente y con ello lograr cambios significativos en la dinámica para prevenir un cambio de régimen, mitigar los efectos de perturbaciones o intentar revertir un régimen desfavorable. Para ello, es imprescindible determinar cuáles son los factores impulsores del cambio (*drivers*), ya que estos constituyen las causas de las perturbaciones introducidas a los ecosistemas y, gestionándolas adecuadamente, se puede lograr un manejo sustentable de los servicios ecosistémicos y aumentar su capacidad de resiliencia³⁹⁻⁴⁰.

6. Resiliencia y sistemas socioecológicos

La resiliencia (*resilience*) de un ecosistema consiste en su capacidad para responder ante las perturbaciones, recuperarse y seguir proporcionando servicios ecosistémicos después de un daño en su estructura o pérdida de funcionalidad.

Cuando se considera a las personas como parte de este ecosistema, tanto por ser un factor clave impulsor del cambio como por su dependencia de los servicios ecosistémicos disponibles, se habla de un sistema socioecológico, y su resiliencia está dada por su capacidad para sostener el conjunto de servicios ecosistémicos, esto es, para mantener un régimen deseable de estabilidad del sistema frente a las perturbaciones⁴¹⁻⁴²⁻⁴³⁻⁴⁴.

III. METODOLOGÍA

1. Estructura de análisis: cambio de régimen ecosistémico

Una vez ubicada el área de estudio y ya caracterizados los bosques subantárticos, las turberas y los ecosistemas ribereños de Tierra del Fuego,

39 BIGGS y otros (2018) pp. 2, 4, 5 y 12.

40 ROCHA y otros (2015) p. 11.

41 BIGGS y otros (2018) pp. 1, 3 y 4.

42 HANSEN (2014) p. 1.

43 BIGGS y otros (2012) p. 423.

44 CARPENTER y otros (2006) pp. 8 y 9.

se realiza un análisis basado en una adaptación metodológica de la estructura que muestra la base de datos Regime Shifts Database, publicada por investigadores del Stockholm Resilience Centre⁴⁵⁻⁴⁶, la cual proporciona un marco referencial para identificar los elementos presentes en cambios de regímenes ecosistémicos.

Analizando los antecedentes de cada ecosistema e integrando evidencia científica, se busca explorar posibles relaciones causales entre variables estudiadas y procesos de cambio, con más o menos nivel de certeza (observadas, medidas o especuladas), pudiendo revelar la presencia de factores impulsores del cambio de régimen ecosistémico, mecanismos de retroalimentación, umbrales de cambio o la existencia de regímenes alternos (estacionales, por ejemplo), así como puntos de influencia donde intervenir los ecosistemas en favor de la mantención de sus servicios ecosistémicos.

El análisis aborda las principales perturbaciones introducidas a los ecosistemas ribereños, bosques subantárticos y turberas; entre ellas, la acción de la especie exótica invasora *Castor canadensis* (el castor), y la intervención y deterioro de turberas para la extracción de musgo y turba. Muchas de estas relaciones y mecanismos son desconocidos, aunque ello no impide analizar sus efectos y reconocer que existe un umbral de tolerancia ante las perturbaciones que, de ser sobrepasado, resultará inevitablemente en un cambio de régimen ecosistémico, mientras que, comprendiendo los mecanismos de respuesta, se logra fortalecer la resiliencia para proteger los servicios ecosistémicos.

IV. ANÁLISIS

1. *Impulsores del cambio*

Los impulsores del cambio son eventos o actividades externas, naturales o antropogénicas que causan cambios en los ecosistemas, ya sea en uno o más de sus procesos, componentes, funciones o servicios ecosistémicos. Sobresaltos (*shocks*) naturales como inundaciones e incendios forestales son enfrentados por los ecosistemas con adaptaciones evolutivas que les

45 BIGGS y otros (2018) p. 1.

46 ROCHA y otros (2015) p. 1.

permiten resistir y restablecerse mediante mecanismos de retroalimentación negativa o procesos de regeneración, como es el caso de la sucesión natural del bosque.

Entre los factores externos impulsores del cambio ecosistémico en Tierra del Fuego se encuentran los siguientes:

- El fuego y el cambio de régimen de los incendios forestales en Chile.
- La tala de bosque nativo para explotación maderera.
- La construcción de diques y estanques con árboles nativos por el castor.
- La construcción de canales angostos en áreas de bosque nativo y turberas por el castor.
- Inundación de bosque nativo y turberas por el castor, afectando suelos y nutrientes.
- La extracción de musgo y turba de las turberas.
- El drenaje de las turberas para su explotación económica.
- El cambio climático global.

a) El fuego y el cambio de régimen de los incendios forestales en Chile

Los cambios en el régimen de los incendios forestales en Chile⁴⁷ son cada año más evidentes y, lamentablemente, Tierra del Fuego no es la excepción, experimentando su último gran incendio en el verano austral de 2023 (fin de febrero y principios de marzo), el cual se inició en la comuna de Primavera (Chile), duró diez días y consumió más de 2.700 ha.

Con anterioridad, a fines de noviembre de 2022, un incendio forestal iniciado en las cercanías de Tolhuin (extremo oriental del lago Fagnano, Argentina) se extendió durante más de cinco meses y consumió unas 12.000 ha de bosque subantártico y hábitats de fauna nativa en una zona de reserva forestal conocida como el Corazón de la Isla. Ambos incendios fueron arduamente combatidos contra fuertes rachas de viento de hasta 80 km/h y 90 km/h, respectivamente.

Anteriormente, en enero de 2022, un incendio que se inició en un predio forestal de la comuna de Timaukel (Chile) y que duró más de dos semanas consumió unas 1.357 ha y amenazó con alcanzar las casi 300.000 ha de bosque nativo y turberas del Parque Karukinka, área de conser-

⁴⁷ VILLAGRA y PAULA (2021) p. 5.

vacación privada administrada por Wildlife Conservation Society (WCS) Chile⁴⁸.

Los incendios en esta zona austral se caracterizaban por ser poco frecuentes, pero de impacto severo en los ecosistemas, al quemarse grandes extensiones de bosque nativo y materia orgánica del suelo, incluidas las turberas. Los fuertes vientos dominantes en el archipiélago y las condiciones más secas provocadas por el cambio climático global inciden en el aumento de la frecuencia y severidad de estos incendios, los cuales además impactan por su extensión espacial (avance dentro de la Isla Grande) y temporal (varias semanas, hasta meses).

En esta zona, el fuego no se origina de forma natural, como sí ocurre en otros territorios boscosos con condiciones climáticas distintas, como el oeste de Canadá y Alaska en Norteamérica⁴⁹.

b) Tala de bosque nativo para explotación maderera

Otro agente impulsor del cambio ecosistémico en Tierra del Fuego es la tala indiscriminada de bosque nativo, que afecta especialmente a los bosques de lenga, la especie de mayor interés económico de la zona.

La actividad extractiva de madera se intensificó hacia la segunda mitad del siglo XX, y, a mediados de los años noventa, en Argentina se presentan las primeras propuestas y discusiones sobre planes de manejo sustentable con tratamientos silviculturales⁵⁰. Con el correr de los años, pese a que tanto Argentina⁵¹ como Chile⁵² tienen una Ley de Bosque Nativo, no se ha logrado proteger estos ecosistemas únicos en el planeta, denunciándose actualmente prácticas de tala ilegal en predios privados, explotación no sustentable en recintos autorizados y proyectos de urbanización y viales que amenazarían extensas áreas de bosque subantártico en Tierra del Fuego, como el Corredor Costero del Beagle (más de 130 km).

48 El Parque Natural Karukinka, ubicado en la Isla Grande de Tierra del Fuego, en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, fue donado a la Wildlife Conservation Society (WCS) y es administrado por WCS Chile.

49 RUGGIRELLO (2022) p. 8.

50 FRANGI y otros (2005) p. 67.

51 ARGENTINA, *Ley N° 26.331*.

52 CHILE, *Ley N° 20.283*.

c) Impactos generados por los castores

Por otra parte, la invasión del castor⁵³ ha desencadenado una serie de perturbaciones en los bosques ribereños de lenga, coigüe y ñire, donde habita.

Los castores modifican los ecosistemas principalmente por las acciones de destruir la vegetación al alimentarse y roer el bosque ribereño, por la construcción de diques y generación de estanques, y por cavar y construir canales angostos para moverse, incluso en las turberas. Los efectos de estas tres actividades principales se observan como cambios en la hidrología de los cursos de agua, transformando ecosistemas acuáticos lóticos en lénticos para el caso de los estanques, causando el drenaje de las turberas en el caso de la construcción de canales angostos y modificando la geomorfología y el paisaje del sitio colonizado⁵⁴⁻⁵⁵, lo que en definitiva impacta negativamente en los servicios ecosistémicos en su conjunto.

Cuando una colonia de castores se asienta en un bosque ribereño, roen insistentemente las cortezas de los árboles llegando a disminuir el diámetro de sus troncos de tal manera que los árboles semirroidos no alcanzan a llevar sus nutrientes desde las raíces hasta las copas, acabando muertos o cayendo por debilitamiento físico de su estructura (tala).

Los castores utilizan troncos y ramas para construir diques que desvían los cursos naturales de agua dulce, reteniéndola y generando estanques donde se acumulan sedimentos, materia orgánica y nutrientes, con lo cual alteran no solo la hidrología y la morfología del ecosistema ribereño, sino también el ciclo biogeoquímico de los nutrientes⁵⁶⁻⁵⁷. Además, con la construcción de diques y canales los castores aumentan la conectividad

53 Cabe recordar que la introducción de la especie exótica *Castor canadensis* (nativa de Norteamérica) se realizó en 1946 a orillas del lago Fagnano, en la Isla Grande de Tierra del Fuego (territorio argentino). En ese ecosistema se introdujeron 20 castores (10 parejas reproductoras) provenientes de Canadá, con la finalidad de promover la actividad económica peletera en la zona. Casi 80 años después, la población de castores presente en el Archipiélago de Tierra del Fuego y en el sur de Sudamérica continental (Región de Magallanes, Chile) se estima entre 70.000 y 110.000 individuos. Cfr. CERDA Y OTROS (2022) pp. 24 y 28; PROYECTO GEF CASTOR (2022) (s.p.).

54 GARCÍA y RODRÍGUEZ (2018) p. 594.

55 LAUREL y WOHL (2019) p. 342.

56 LIZARRALDE y otros (2004) p. 355.

57 GARCÍA y RODRÍGUEZ (2018) p. 601.

hidrológica vertical y lateral, mientras que disminuyen la conectividad longitudinal⁵⁸⁻⁵⁹.

También modifican el nivel freático y, con ello, las características del suelo⁶⁰. Esta modificación en la conectividad hidrológica de los ecosistemas constituye la base para impulsar todos los cambios posteriores en el paisaje y en la cuenca a nivel geomorfológico, biogeoquímico y ecosistémico⁶¹.

Al construir un dique, los castores desvían la corriente de agua dulce y cambian el régimen del flujo de lótico a léntico, formando lo que se conoce como un estanque de castor (*beaver pond*). Estos estanques llegan a convertirse en ecosistemas acuáticos ricos en nutrientes, que sirven de hábitat para nuevas poblaciones y comunidades, incluso albergando sitios de anidación para aves migratorias⁶².

En el territorio chileno de Tierra del Fuego, el Proyecto GEF Castor (2022) llegó a contabilizar más de 31.500 diques construidos por castores, que impactan directamente en ecosistemas acuáticos, bosques subantárticos y turberas, mientras que una investigación del Centro Austral de Investigaciones Científicas CADIC-CONICET de Argentina utilizó la detección satelital (2012-2019) para determinar la existencia de un total de 206.203 diques de castor en un área de 73.000 km², con 100.951 en el territorio argentino y 105.252 en Chile⁶³.

En resumen, los impactos generados por los castores sobre los cursos de agua son los siguientes:

- Aumentan el tiempo de residencia del agua⁶⁴.
- Afectan los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes⁶⁵.
- Alteran el nivel freático y con ello, las características del suelo⁶⁶.

58 LAUREL y WOHL (2019) pp. 342 y 343.

59 LARSEN y otros (2021) p. 32.

60 ARISMENDI y otros (2008) p. 153.

61 LARSEN y otros (2021) pp. 3, 37 y 40.

62 LIZARRALDE y otros (2004) p. 354.

63 HUERTAS y otros (2020) p. 8.

64 LARSEN y otros (2021) pp. 38 y 39.

65 GARCÍA y RODRÍGUEZ (2018) pp. 594 y 601.

66 ARISMENDI y otros (2008) p. 153.

- Modifican el régimen hidrológico de lótico a léntico⁶⁷⁻⁶⁸.
- Disminuyen la conectividad hidrológica longitudinal y aumentan la conectividad lateral y vertical⁶⁹.

La intervención de los castores sobre los ecosistemas ribereños produce una remoción de sedimentos que atenúa la luz y aumenta la turbidez de la corriente. Al formar los estanques, el transporte de estos sedimentos se ve afectado, provocando su retención y, junto con ello, el almacenamiento de nutrientes y materia orgánica. Por ejemplo, se ha encontrado una concentración de nitrógeno mil veces mayor en los estanques de castor que en los sedimentos de las corrientes rápidas. También el oxígeno disuelto se reduce; sin embargo, se logra restablecer rápidamente aguas abajo de los diques.

En estas aguas lénticas y de luz atenuada se ven más favorecidas las especies pelágicas (más superficiales) por sobre organismos bentónicos (asociados al fondo), lo que se traduce en una modificación de la estructura ecosistémica, la cadena trófica y las dinámicas de intercambio de recursos, provocándose además un aumento de macroinvertebrados⁷⁰.

Los procesos metabólicos de un ecosistema están determinados por los flujos de materia y energía que reciben y entregan. Si bien los regímenes metabólicos de ecosistemas lóticos son menos estudiados que los lénticos, los ecosistemas ribereños pueden caracterizarse por sus tasas de respiración, fotosíntesis y productividad primaria. La acción de los castores en las corrientes subantárticas provoca un aumento de la productividad primaria y tasa de respiración del ecosistema, disminuyendo las condiciones heterotróficas, especialmente aguas abajo del dique de castor.

La extensión temporal y espacial de estas perturbaciones son los principales impulsores del cambio en los regímenes metabólicos de estos ecosistemas ribereños, y su importancia radica en que el régimen metabólico constituye una caracterización del patrón temporal de un conjunto relevante de variables lentas, es un indicador de la sensibilidad ante los cambios en el ambiente y sus posibles respuestas ecosistémicas⁷¹⁻⁷².

67 GARCÍA y RODRÍGUEZ (2018) p. 594.

68 LARSEN y otros (2021) pp. 1, 27 y 37.

69 LARSEN y otros (2021) p. 40.

70 GARCÍA y RODRÍGUEZ (2018) pp. 594 y 602.

71 BERNHARDT y otros (2018) pp. 101, 104 y 105.

72 GARCÍA y otros (2022) p. 8.

d) La extracción de musgo y turba de las turberas

En el caso de las turberas de Tierra del Fuego, los principales impulsores de los cambios estructurales y funcionales tanto de los componentes bióticos como abióticos del ecosistema son los siguientes:

- Actividad extractiva de musgo y turba de las turberas para su uso agrícola y bioenergético, principalmente⁷³⁻⁷⁴⁻⁷⁵.
- Drenaje del agua retenida en el humedal para la extracción de turba y para habilitar suelo agrícola⁷⁶.
- Modificación de la hidrología y morfología por acción del castor (diques y canales).
- Avance de la urbanización (Ushuaia, Argentina)⁷⁷.
- Incendios⁷⁸.
- Cambio climático global.

Los humedales y turberas no han significado una barrera para la expansión del hábitat del castor, ya que esta especie exótica invasora ha sido capaz de modificar estos ecosistemas mediante la construcción de canales angostos que desvían los flujos de agua y drenan ciertas áreas de la turbera para luego inundar otras, mediante la construcción de diques en las zonas adyacentes al bosque ribereño⁷⁹. En Chile, del total del área invadida e impactada directamente por los castores en Tierra del Fuego, casi un 35% corresponde a ecosistemas del tipo humedal, entre ellos las turberas^{80, 81}, y su presencia ha sido detectada en todos los tipos de turbera de la región⁸².

Hasta febrero de 2024, tanto en Chile como en Argentina la turba era considerada un recurso fósil, no renovable, que podía ser explotado para su uso agrícola y energético, siendo dicha actividad regulada por el Código

73 DOMÍNGUEZ y VEGA (2015) pp. 21, 36 y 151.

74 EPEL y otros (2022) pp. 278 y 281.

75 WCS CHILE (2019) (s.p.).

76 DOMÍNGUEZ y VEGA (2015) pp. 165 y 320.

77 EPEL y otros (2022) p. 280.

78 RUGGIRELLO (2022) p. 9.

79 ITURRASPE y URCIUOLO (2021) p. 176.

80 CERDA y otros (2022) p. xvi.

81 PROYECTO GEF CASTOR (2022) (s.p.).

82 DOMÍNGUEZ y VEGA (2015) pp. 117 y 323.

de Minería de cada país⁸³⁻⁸⁴. En efecto, en Chile, la extracción de turba era considerada una actividad de carácter industrial y los proyectos de extracción debían someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), a diferencia de la extracción del musgo, que era considerada una actividad del tipo artesanal, bajo la competencia del Ministerio de Agricultura⁸⁵.

Sin embargo, los procesos de extracción de musgo y turba (componentes biótico y abiótico, respectivamente) deben ser diferenciados adecuadamente para su gestión sustentable. Por ello, luego de una larga discusión política, académica y ciudadana sobre iniciativas para la protección legal de las turberas como ecosistemas complejos y de alta relevancia ambiental, el 10 de abril de 2024 se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.660, sobre Protección Ambiental de las Turberas.

La referida ley prohíbe la extracción de turba en todo el territorio nacional y establece un plan de manejo sustentable para el musgo *Sphagnum magellanicum* con el fin de que no se modifique su función y estructura. Además, y en línea con la prohibición, elimina del artículo 10, letra i), de la Ley N° 19.300, la extracción de turba como tipología de proyecto con ingreso al SEIA.

Con la extracción de turba se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono y metano a la atmósfera (gases de efecto invernadero), mientras que el área afectada, previamente drenada, pierde su calidad de reguladora del ciclo hidrológico, comprometiendo el servicio ecosistémico de provisión de agua para consumo humano y agrícola⁸⁶⁻⁸⁷. Al mismo tiempo, se pierde una importante área de sumidero de carbono, quedando un terreno potencialmente apto para actividades agropecuarias, es decir, se produce un cambio en el uso de suelo por modificación del ecosistema.

83 LEÓN y otros (2021) pp. 1, 13 y 14.

84 GIOMI y otros (2022) p. 509.

85 AGÜERO (2013) p. 8. A través del Decreto Supremo N° 25/2018, el Ministerio de Agricultura de Chile disponía medidas para la protección del musgo *Sphagnum magellanicum*, estableciendo las condiciones necesarias para su explotación sustentable, entre las cuales destaca la prohibición de drenar el área de cosecha y la exigencia de mantener la cobertura del musgo en un mínimo del 30% del área intervenida.

No obstante, dicho decreto no se hacía cargo de la actividad industrial extractiva que dañaba ambos componentes de las turberas, musgo y turba.

86 ITURRASPE y URQUIULO (2021) pp. 180 y 182.

87 ITURRASPE (2010) p. 13.

Las turberas de Tierra del Fuego, como ecosistemas del tipo humedal, dependen del agua que proviene del deshielo de las montañas y glaciares para mantenerse funcional y estructuralmente. El principal campo de hielo de la zona está en la cordillera de Darwin (lado chileno), que se estima que estaría perdiendo unos 1,7 km² de hielo al año por efectos del cambio climático. Los deshielos de estas montañas permiten la existencia de turberas asociadas, principalmente en los valles, identificables hasta las bahías Yendegaia y Lapataia por el sur⁸⁸. En territorio argentino, el glaciar Martial es una de las principales fuentes de agua para abastecer a la ciudad de Ushuaia, ubicada a orillas del canal Beagle. También se observa que está desapareciendo abruptamente por causa del cambio climático, junto con otros del tipo glaciares de circo, característicos de la zona. En el caso de las turberas del valle de Andorra, su función ecosistémica de regulación hidrológica del agua proveniente del glaciar Vinciguerra por el arroyo Grande resulta fundamental en la provisión de agua para Ushuaia. Por lo mismo, y dado el rápido retroceso de estos glaciares, todo el ecosistema –tanto el glaciar como las turberas asociadas– fue declarado Sitio Ramsar en el año 2009. Estas turberas regulan y amortiguan las crecidas de caudal estacionales por su gran capacidad de absorción y lenta liberación posterior, manteniendo constante y seguro el abastecimiento hídrico local. Dado el acelerado retroceso de los glaciares en Tierra del Fuego, la conservación de turberas es fundamental para la regulación de esas cuencas hidrológicas⁸⁹⁻⁹⁰.

2. Mecanismos de retroalimentación

Los mecanismos de retroalimentación son procesos internos de los ecosistemas que o bien refuerzan, o bien degradan la resiliencia del régimen o estado estable en que se encuentran. Mientras que la retroalimentación negativa es un mecanismo de estabilización de las dinámicas del ecosistema cuyo funcionamiento mitiga y/o contrarresta los efectos de las perturbaciones, el mecanismo de retroalimentación positiva amplifica el efecto del cambio en el ecosistema ante una perturbación menor, desestabilizándolo y/o degradándolo.

88 DOMÍNGUEZ y VEGA (2015) pp. 114, 281, 302 y 303.

89 ALLENDE (2022) (s.p.).

90 FERNÁNDEZ (2023) (s.p.).

Estos sistemas complejos poseen variables internas para controlar las dinámicas del sistema, pero no poseen mecanismos de retroalimentación para controlar los impulsores de cambio externos, lo cuales ocasionan cambios en variables lentas del sistema y cuyos efectos se observarán en el largo plazo⁹¹. La Figura 5 ejemplifica con un diagrama de bucle causal los mecanismos de retroalimentación global.

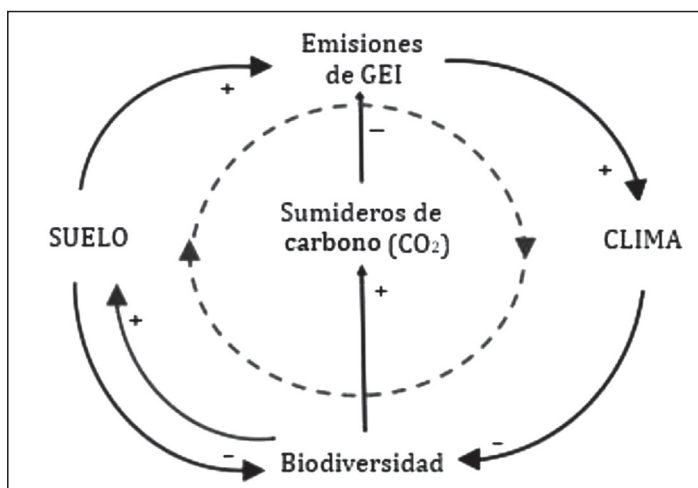


Figura 5. Diagrama de bucle causal para mecanismos de retroalimentación global. Elaboración propia.

Para tratar de identificar la existencia (o no) de mecanismos de retroalimentación que sustenten la resiliencia en los ecosistemas analizados, se presentan algunos ejemplos y observaciones que se basan en investigaciones relacionadas donde ha sido posible obtener datos que permiten proponer hipótesis al respecto.

Un ejemplo de resiliencia ecosistémica ante incendios forestales (sobresaltos externos) es el bosque pirenaico en Europa, el cual ha sido estudiado con datos paleoecológicos, encontrándose evidencia de varios ciclos de deforestación-regeneración (D-R) que responderían a mecanismos (susceptibles de interpretarse como de retroalimentación negativa) en tres niveles distintos del ecosistema que, a pesar de llegar a un 60% de deforestación, permitieron que el ciclo D-R iniciara nuevamente sin nunca llegar a atravesar el umbral hacia la deforestación completa (cambio de régimen ecosistémico)⁹².

91 WALKER y otros (2012) pp. 2 y 3.

92 RULL y VEGAS-VILARRÚBIA (2023) pp. 13-15.

Los mecanismos de resiliencia de estos bosques presentan los siguientes niveles:

- Resiliencia del ecosistema como grupo voluminoso de árboles (*bulk resilience*).
- Resiliencia por tipo de bosque con patrones de distribución persistentes con características de mosaico (*mosaic resilience*).
- Resiliencia de la comunidad a nivel taxonómico con similar abundancia relativa y régimen ecosistémico (*community resilience*).

En este caso, la distribución espacial de los diversos tipos de bosque en forma de mosaicos (conjuntos de parches) resultó ser el mecanismo más robusto para evitar el cambio de régimen y mantener al ecosistema dentro del ciclo D-R, explicado desde la ecología de poblaciones y comunidades como un modelo que responde a una dinámica metacomunitaria, la cual destaca la importancia del flujo de individuos entre parches del mosaico para la persistencia de las poblaciones y entre comunidades para la sobrevivencia del bosque⁹³⁻⁹⁴. Cada uno de estos mecanismos de resiliencia podría asimilarse a un conjunto de mecanismos de retroalimentación negativa (variables internas) que estabilizan el ecosistema, restablecen su dinámica natural y mitigan los efectos de las perturbaciones externas, permitiendo la continuidad del bosque.

En el caso del bosque subantártico de Tierra del Fuego, como ya se ha mencionado, la diversidad biológica de árboles es baja, predominando tres especies del género *Nothofagus* (lenga, coigüe de Magallanes y ñire). Además, en estas latitudes dichas especies son dominantes en todas las fases del proceso de sucesión natural, a diferencia de lo que ocurre en latitudes más altas (como en el bosque valdiviano), donde se presentan en las primeras etapas y luego van siendo reemplazadas por otras especies⁹⁵. Por ello, es extremadamente importante identificar y conocer los posibles mecanismos de retroalimentación negativa y las estrategias de resiliencia de la lenga, el coigüe de Magallanes y el ñire en Tierra del Fuego, para fortalecerlos y proteger sus servicios ecosistémicos.

Habiéndose establecido las dinámicas de estos ecosistemas en el Holoceno medio, luego de los sucesivos períodos glacial-interglacial del Pleistoceno,

93 RULL y VEGAS-VILARRÚBIA (2023) pp. 9 y 13.

94 BUSTAMANTE (2022) pp. 1 y 24.

95 PISANO (1997) p. 11.

y bajo un clima frío y húmedo con influencias de la Antártica⁹⁶⁻⁹⁷, se sabe que estos bosques subantárticos no han evolucionado adaptativamente con los incendios, ya que, a diferencia de lo que ocurre en latitudes altas del hemisferio norte, en Tierra del Fuego no hay fuentes de ignición naturales, como las tormentas eléctricas. Sin embargo, sí se han observado importantes mecanismos de regeneración en el ñire, como el rebrote desde las raíces de árboles quemados⁹⁸⁻⁹⁹, lo que le permite ser considerado una especie pionera en áreas no boscosas, capaz de generar las condiciones ecosistémicas para el establecimiento de otras especies del género *Nothofagus*¹⁰⁰.

A partir de los estudios más recientes sobre la capacidad de regeneración de la lenga ante incendios forestales en Tierra del Fuego, más comunes y frecuentes en la actualidad por la mayor presencia de población y fuentes de ignición antrópicas, se podría suponer que precisamente este tipo de árbol nativo de crecimiento lento no presentaría el tipo de resiliencia ecosistémica a nivel de mosaico ante el impacto de los incendios forestales, ya que muestra tanto una muy baja capacidad para regenerarse en los sitios incendiados como también una gran dificultad para regenerarse a medida que crece la distancia a los árboles sobrevivientes y no afectados¹⁰¹.

Esta falta de adaptación sugiere que este ecosistema podría salir fácilmente del equilibrio dinámico de regeneración natural luego de un incendio forestal, llevándolo a un cambio de régimen ecosistémico, probablemente irreversible, que convierta el bosque denso en espaciado, con mayor regeneración del ñire, por ejemplo, o directamente en un arbustal o pastizal¹⁰²⁻¹⁰³. Los mecanismos naturales de mantención estarían determinados por el equilibrio dinámico entre el clima, la hidrología y los procesos del suelo (fuertes vientos, evapotranspiración, descomposición foliar, humificación de la materia orgánica, retención de agua y circulación de nutrientes)¹⁰⁴.

96 FRANGI Y OTROS (2005) p. 3.

97 PISANO (1997) p. 10.

98 RUGGIRELLO y otros (2023b) p. 2.

99 RUGGIRELLO (2022) p. 8.

100 MARTÍNEZ y otros (2006) p. 151.

101 RUGGIRELLO y otros (2023a) p. 1.

102 RUGGIRELLO y otros (2023b) p. 10.

103 RUGGIRELLO (2022) p. 8.

104 PISANO (1997) p. 10.

Otros estudios sobre la presencia e impacto de la especie exótica invasora *Castor canadensis* en el bosque subantártico de Tierra del Fuego indicarían que los castores han tenido una mayor preferencia por la lenga que por el coigüe de Magallanes o el ñire. Este último a su vez presentaría una alta plasticidad genómica, condición fundamental que le permitiría adaptarse a la presencia del castor en zonas más húmedas, como las turberas, o más extremas, como la estepa magallánica¹⁰⁵⁻¹⁰⁶. No obstante, la evidencia científica sugiere que, en general, las especies de *Nothofagus* –dominantes en Tierra del Fuego– carecerían de mecanismos adaptativos de regeneración ante la acción modificadora del castor¹⁰⁷⁻¹⁰⁸.

En el caso de los bosques de Norteamérica, ecosistema nativo del castor, algunos tipos de árboles utilizados por el castor habrían desarrollado un posible mecanismo de retroalimentación negativa consistente en la presencia de un compuesto fenólico en sus troncos con un efecto disuasivo en el castor, el cual preferiría los troncos de mayor diámetro y menor concentración del compuesto, permitiendo que los individuos más jóvenes –de menor diámetro y mayor concentración– no sean atacados y tengan la posibilidad de seguir desarrollándose¹⁰⁹. Sin embargo, estudios científicos¹¹⁰⁻¹¹¹ muestran que en Tierra del Fuego el castor realiza una tala selectiva de individuos arbóreos de lenga, con preferencia por diámetros menores a veinticinco centímetros y altura de hasta dos metros, para la construcción de diques, los cuales se contabilizan como individuos muertos, mientras que preferirían los diámetros más grandes solo para desgastar su dentadura, por lo cual se contabilizan como árboles dañados, si es que no terminan muertos con las inundaciones provocadas por la formación de los estanques de castor (*beaver ponds*). La inundación del terreno además destruiría la capacidad del bosque para mantener un banco de semillas¹¹². De esta manera, los árboles más jóvenes mueren y las semillas se pierden, disminuyendo considerablemente

105 HUERTAS y otros (2020) pp. 14 y 15.

106 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) p. 12.

107 MARTÍNEZ y otros (2006) p. 152.

108 BALDINI y otros (2008) pp. 163 y 168.

109 LIZARRALDE y otros (2004) p. 355.

110 ARISMENDI y otros (2008) p. 151.

111 BALDINI y otros (2008) pp. 166 y 167.

112 ARISMENDI y otros (2008) p. 153.

su población y, al ser de crecimiento lento, los sobrevivientes no tienen la capacidad de regenerarse lo suficientemente rápido como para mantener el ecosistema en un régimen estable.

En el territorio chileno de Tierra del Fuego, se estiman en más de 27.000 las hectáreas impactadas directamente por la acción de esta especie invasora, donde aproximadamente un 46% del área afectada corresponde a ecosistemas de bosque subantártico de especies del género *Nothofagus*¹¹³⁻¹¹⁴.

En Norteamérica, las dinámicas ecosistémicas han evolucionado a un régimen cíclico conocido¹¹⁵ que presenta estructuras, funciones y mecanismos de retroalimentación que le permiten mantenerse en equilibrio ecosistémico a través de los años, pese a la acción aparentemente destructiva de esta especie animal. Sin embargo, en Chile, los bosques ribereños de lenga, coigüe de Magallanes y ñire no presentan estas capacidades, ni han desarrollado mecanismos adaptativos que les permitan regenerarse ante los impactos producidos tanto por la tala para la construcción de diques como por las inundaciones provocadas por la formación de los estanques de castor.

Pese a los resultados y sugerencias aportados por varios estudios científicos, aún falta mucha información sobre las poblaciones de castores y sus dinámicas en estos ecosistemas exóticos. Se desconoce a ciencia cierta cómo el castor se ha adaptado, en términos de sus tasas de reproducción y mortalidad, dinámica de crecimiento y expansión territorial de colonias. Sin embargo, se reconoce su plasticidad ecosistémica a través de todo el archipiélago de Tierra del Fuego, mientras que su presencia en el continente demanda una gestión del control de la invasión a nivel multisectorial, ya que se estima que la amenaza podría acrecentarse con el cambio climático, que favorecería a sus preferencias ecosistémicas¹¹⁶⁻¹¹⁷⁻¹¹⁸.

En cuanto a los mecanismos que mantienen a los ecosistemas ribereños, se tiene que la hidrología de Tierra del Fuego se caracteriza en parte por la presencia de glaciares de circo y la acumulación de nieve estacional en sus montañas. Las aguas provenientes del deshielo de los glaciares y el derreti-

113 CERDA y otros (2022) p. 35.

114 PROYECTO GEF CASTOR (2022) (s.p.).

115 LAUREL y WOHL (2019) p. 343.

116 CERDA y otros (2022) pp. 69-71.

117 MOLINA y otros (2018) p. 14.

118 HUERTAS y otros (2020) p. 15.

miento de las nieves estacionales generan cursos de agua dulce que transportan sedimentos, materia orgánica y nutrientes a lo largo de las cuencas y los distribuyen a través de distintos ecosistemas ribereños aguas abajo, a la vez que sirven de principal fuente para la provisión de agua dulce para consumo humano y agrícola. Estos ecosistemas ribereños se complementan con ecosistemas lacustres, humedales y turberas¹¹⁹ que regulan las crecidas de caudal y distribuyen los flujos de manera continua y estable¹²⁰.

Los cursos de agua corriente corresponden a ecosistemas ribereños de régimen lótico, el cual queda determinado por su capacidad de transportar y almacenar más o menos materia orgánica, ya que con ello se establece la forma en que se sustenta la cadena trófica, la respiración y la productividad primaria del ecosistema (flujos de materia y energía).

Lo anterior se debería a que los ecosistemas ribereños no basarían su productividad primaria y cadena trófica solo en fuentes autóctonas de materia orgánica, sino que además pueden recibir, a través de las corrientes de agua, suministros alóctonos desde otros ecosistemas, aguas arriba. En este sentido, la vegetación ribereña, en especial la presencia de densas copas de árboles, es determinante y fundamental para el sustento de las cadenas tróficas ricas, con altas tasas de respiración del ecosistema, mientras que los ecosistemas ribereños con poca vegetación y sombra (aguas claras) necesitan de la materia orgánica disuelta que transportan y distribuyen las corrientes, suministro que no siempre es constante, y puede presentarse en pulsos de frecuencia regular o impredecible. Por lo tanto, el régimen lótico mantiene el balance entre los patrones estacionales y los patrones de recuperación ante perturbaciones en los flujos de materia y energía¹²¹.

En Tierra del Fuego, cuando los castores intervienen los ecosistemas ribereños, a través de la construcción de diques, disminuyen la conectividad hidrológica longitudinal y aumentan la conectividad vertical y lateral¹²²⁻¹²³, inundando planicies y formando estanques de castor. Con ello, cambian el régimen del flujo de lótico a léntico, e incrementan las tasas metabólicas de las corrientes intervenidas. Estos nuevos ecosistemas de planicies

119 ITURRASPE y URCIUOLO (2000) pp. 2 y 3.

120 LEÓN y otros (2021) pp. 2 y 3.

121 BERNHARDT y otros (2018) pp. 106 y 107.

122 LAUREL y WOHL (2019) pp. 42 y 43.

123 LARSEN y otros (2021) p. 38.

inundadas en régimen léntico podrían mantenerse por un mecanismo de retroalimentación positiva que ha sido propuesto dado el aumento en la conectividad hidrológica que producen los castores al construir canales angostos que desvían los flujos de agua y les permiten moverse con mayor facilidad, ampliando su radio de acción, a la vez que van incrementando el nivel de complejidad de la red de canales y caminos que siguen los flujos, algunos discontinuos, y otros con zonas drenadas, pudiendo potencialmente soportar una población mayor¹²⁴⁻¹²⁵.

En el caso de las turberas, entre los mecanismos que sostienen las funciones de descomposición lenta de la materia orgánica y acumulación de carbono en forma de turba se encuentran un nivel freático alto con la consecuente condición de anoxia y la acidez del medio, junto con una baja temperatura del suelo. La radiación solar, la temperatura y la altura que presenta la superficie de la turbera respecto al nivel freático determinan las especies dominantes, la productividad primaria y las tasas de emisión de metano y de secuestro de carbono¹²⁶⁻¹²⁷⁻¹²⁸.

Para las turberas dominadas por musgos *Sphagnum* –dependientes del agua de lluvia–, son estos los que presentan la capacidad funcional de regular el nivel freático dentro de un rango estrecho y mantener un ambiente ácido al descomponerse lentamente formando ácidos orgánicos, limitando el flujo de nutrientes y desfavoreciendo así el crecimiento de otras plantas. Con ello también evitan la competencia por luz y espacio, disminuyendo la temperatura bajo el suelo. La perturbación más importante que experimentan las turberas en su dinámica ecosistémica es la disminución del nivel freático. En el caso de las turberas dominadas por plantas y con acceso al agua de la napa, el transporte de los nutrientes sería el mecanismo determinante en la regulación de su concentración. Sin embargo, estos tipos de turberas presentan características hidrológicas y de concentración de nutrientes muy contrastantes en los distintos ambientes de Tierra del Fuego donde se pueden observar, teniendo incluso grandes variaciones en el nivel freático. Además, si una turbera dominada por musgos *Sphagnum* recibe la perturbación de

124 GARCÍA y otros (2022) p. 8.

125 POLVI y WOHL (2012) pp. 342, 343 y 345.

126 LEÓN y otros (2021) pp. 6, 8 y 12.

127 SALIMI y otros (2021) p. 5165.

128 OSPINA y MOOR (2017) (s.p.).

un flujo de agua rico en nutrientes desde fuera del ecosistema, se podría dañar al musgo y propiciar el crecimiento invasivo de plantas vasculares¹²⁹⁻¹³⁰.

Desde el punto de vista del cambio en el uso de suelo, las perturbaciones introducidas, tanto por el drenaje, la extracción de musgo y de turba, como por la construcción de diques y canales por los castores que inundan áreas naturales de turberas, amenazan su función ecosistémica de sumideros de carbono, ya que impactan negativamente en los mecanismos que mantienen el nivel freático del ecosistema y reducen el área funcional de sumidero. La pérdida de estructura y funcionalidad de estos ecosistemas pueden derivar en un cambio de régimen ecosistémico desde sumidero neto a fuente emisora de carbono¹³¹⁻¹³².

3. Umbrales, regímenes alternos y cambio de régimen ecosistémico

Cuando los impulsores del cambio (externos) interactúan con la dinámica del ecosistema, lo más probable es que este responda mediante sus mecanismos de retroalimentación negativa para reorganizarse y mitigar los efectos de las perturbaciones. Si la respuesta no es suficiente para mantener la estabilidad del sistema, los impulsores pueden causar modificaciones a las variables controladoras o lentas, las cuales, mientras más se aproximan al punto de inflexión donde se saca al sistema del régimen estable, provocan una mayor fluctuación de las variables rápidas en respuesta a las perturbaciones, empujando a todo el sistema a atravesar el umbral hacia un nuevo régimen alterno¹³³.

Dados los antecedentes presentados y el análisis de los posibles mecanismos de retroalimentación (variables internas) que mantienen estables a los ecosistemas en Tierra del Fuego, así como de los principales factores (variables externas) impulsores del cambio de régimen en cada uno de ellos, a continuación se presentan las propuestas sobre cuáles serían los umbrales que se deben tener presentes para mantener a los ecosistemas estables ante las perturbaciones que los podrían llevar a un cambio de régimen desfavo-

129 LEÓN y otros (2021) pp. 6, 9 y 13.

130 OSPINA y MOOR (2017) (s.p.).

131 LEIFELD y otros (2019) p. 945.

132 SALIMI y otros (2021) p. 5163.

133 WALKER y otros (2012) p. 3.

able o a desarrollar un estrés ecológico al enfrentarse permanentemente al cambio entre regímenes alternos.

Tomando como referencia la cosecha forestal en Tierra del Fuego, los umbrales de existencias para la regeneración natural y manejo sustentable del bosque de lenga se han propuesto con base en los indicadores de densidad del bosque y altura de los árboles, ponderada en una media de 1,5 metros de altura¹³⁴. En cuando a la densidad del bosque de lenga, otra métrica propuesta para evaluar la recuperación del bosque de ñire ante la degradación por tala y pastoreo consiste en considerar como escasa la recuperación si se contabilizan menos de 50 individuos por hectárea, y considerar como buena una recuperación de entre 50 y 300 individuos por hectárea.

Con respecto al impacto por la acción del fuego, se observó que el área recuperada a 80 años de ocurrido un incendio en un bosque de ñire tiene aproximadamente un tercio (33%) de la edad de la cobertura del dosel de la parte no quemada. Este sería considerado el umbral mínimo de recuperación, atribuido —entre otros factores— a que el ñire prioriza el crecimiento en altura, para luego ir aumentando el diámetro (área basal) con el tiempo. Lo anterior ha sido observado en árboles con diámetros desde los cinco centímetros y alturas mayores a 1,3 metros. Las áreas quemadas del ecosistema boscoso cambiaron de régimen, pareciéndose más a pastizales o sabanas, por lo que ya no son capaces de proveer los servicios ecosistémicos del bosque, incluido el servir de hábitat para otras especies nativas¹³⁵.

Con respecto a la acción de los castores, uno de los impactos sobre los ecosistemas lóticos, siempre que se mantenga esta perturbación, es la generación de mecanismos de retroalimentación de largo plazo, creando un paisaje de hábitats acuáticos lénticos y terrestres en estado de sucesión perpetua. Este cambio de régimen lótico a léntico también incide en el comportamiento del ecosistema acuático como fuente o sumidero de materia orgánica, dependiendo de la relación entre el flujo de agua entrante, las concentraciones de nutrientes retenidos y los flujos de salida¹³⁶. Otro mecanismo que determinaría el régimen hidrológico es el nivel freático, el cual representaría un umbral del cambio entre regímenes alternos seco y

134 PAREDES y otros (2023) p. 3.

135 RUGGIRELLO y otros (2023b) p. 10.

136 LARSEN y otros (2021) pp. 21 y 25.

húmedo en una corriente de agua intermitente¹³⁷. A su vez, las áreas abandonadas por los castores producen pastizales fértiles llamados praderas de castor, con una alta productividad primaria¹³⁸. Si se erradicara definitivamente el castor, podría esperarse en algunos ecosistemas ribereños una disminución de las tasas de respiración y productividad primaria (mayores condiciones heterotróficas) al cabo de diez años¹³⁹.

En Tierra del Fuego, la evidencia muestra que, en áreas ribereñas impactadas por largo tiempo, los bosques de especies *Nothofagus* no se regeneraron ni aparecieron otras especies de arbustos de baja altura asociadas al bosque. Tampoco hubo regeneración en áreas que ya no están inundadas (abandonadas). El impacto de los castores sobre la dinámica de los ecosistemas los transformó en praderas de castor dominadas por hierba y juncos, por lo que se considera que el bosque subantártico de *Nothofagus* no podrá soportar el impacto de esta especie invasora en el largo plazo¹⁴⁰⁻¹⁴¹. Además, la preferencia de los castores por la lenga e individuos arbóreos de características aproximadas de menos de 2 metros de altura y diámetros menores a 25 centímetros¹⁴², dificulta la regeneración natural del bosque, comprometiéndola¹⁴³. Estudios sobre la presencia de la especie invasora en ecosistemas del hemisferio norte (nativos del castor) reportaron una densidad de saturación de 1,25 colonias por kilómetro cuadrado, con un valor de 0,9 colonias activas por kilómetro cuadrado como la capacidad de carga. En Tierra del Fuego, luego de 15 años de estudios, se encontraron densidades de 4 y hasta 5 colonias por kilómetro cuadrado, y colonias activas con un valor de 0,7 por kilómetro cuadrado. Esto indicaría que en varios de los sitios estudiados la población de castores estaría cercana a la capacidad de carga¹⁴⁴.

Considerando estos datos como referencia, se podrían establecer los umbrales para el manejo sustentable de estos ecosistemas y plantear las opciones más adecuadas para su protección, como lo son el control de la

137 ZIPPER y otros (2022) p. 1.

138 LIZARRALDE y otros (2004) pp. 354 y 355.

139 GARCÍA y otros (2022) pp. 2 y 9.

140 BALDINI y otros (2008) p. 163.

141 MARTÍNEZ y otros (2006) p. 152.

142 ARISMENDI y otros (2008) pp. 149 y 151.

143 BALDINI y otros (2008) p. 167.

144 LIZARRALDE y otros (2004) p. 355.

expansión geográfica o la erradicación definitiva del castor. Un resumen de los umbrales ecosistémicos propuestos se presenta a continuación:

- Mantenimiento de un nivel freático funcional para los ecosistemas ribereños.
- Recuperación del régimen metabólico de ecosistemas ribereños en al menos diez años.
- Capacidad de carga para sostener a la población de castores: 0,9 colonias activas por kilómetro cuadrado.
- Densidad de saturación para sostener a la población de castores: 1,25 colonias por kilómetro cuadrado.
- Densidades medias de recuperación: entre 50 y 300 individuos arbóreos por hectárea.
- Protección preferencial de árboles de la especie *N. pumilio* (lenga) de hasta 1,5 m de altura (idealmente hasta 2 m) y hasta 25 cm de diámetro, con extensión al *N. betuloides*.
- Contención del castor en el archipiélago y erradicación del territorio continental.

Con una población creciente y sin depredadores naturales en Tierra del Fuego, el castor expande su distribución espacial año a año, observándose incluso en la península de Brunswick, Patagonia continental¹⁴⁵. Esta invasión está llevando a los ecosistemas de bosques subantárticos al límite de su capacidad de carga, ya que estos carecerían de mecanismos de adaptación ante los efectos de la deforestación e inundaciones provocadas por la construcción de diques. Esta falta de resiliencia afecta de manera potencialmente irreversible a los servicios ecosistémicos que estos bosques proveen y plantea un posible cambio de régimen del sistema socioecológico en su conjunto, impulsado por acciones antropogénicas y reforzado por el cambio climático.

Además, las altas temperaturas, eventos extremos como sequías e inundaciones con alteraciones en los flujos de nutrientes o régimen metabólico de las aguas, todos pueden contribuir a un cambio potencial en la composición vegetal (y microbiana) de la superficie de las turberas hacia comunidades con diferente sensibilidad de descomposición y, con ello, a una modificación en los flujos de carbono (acumulación y emisión) cuyas consecuencias se desconocen en el largo plazo, ya que las alzas de temperatura inciden en la

145 MOLINA y otros (2018) p. 9.

mortalidad de las plantas (juncos y musgos *Sphagnum spp.*) e intensifican la liberación de dióxido de carbono.

Por otra parte, el drenaje de turberas para la explotación de la turba también genera emisiones por la descomposición de los componentes bióticos, mientras que el incremento del área drenada significa una disminución del área de almacenamiento, cambiando el balance neto de carbono de sumidero a fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. Un alto nivel freático con condiciones de anoxia, un pH bajo y la baja temperatura del suelo favorecen la lenta descomposición de la materia orgánica, permitiendo la acumulación del carbono en forma turba. En este sentido, el manejo de los niveles de agua en las turberas permite regular las condiciones que favorecen las bajas tasas de descomposición y los flujos naturales de dióxido de carbono y metano en las turberas y, con ello, mantener su función de sumidero¹⁴⁶⁻¹⁴⁷⁻¹⁴⁸.

Por lo anterior, se propone que para que los ecosistemas de turberas no se transformen en emisores de carbono, retroalimentándose positivamente con el cambio climático, las alzas de temperatura y cada vez menos agua disponible, el umbral que separa los regímenes ecosistémicos de sumidero y emisor de carbono debiese quedar constituido por un rango natural y estrecho del nivel freático estacional, característico para cada tipo de turbera presente en Tierra del Fuego, lo cual merece estudios y análisis futuros detallados, aunque ello no limita las actuales opciones de gestión, como la restauración y el manejo hidrológico.

4. Puntos de influencia y opciones de gestión de cambios de régimen

Existen unos pocos puntos clave donde es posible intervenir el ecosistema para influenciar el comportamiento de variables, mecanismos de retroalimentación y/o respuestas ante impulsores del cambio, con el objetivo de manipular la dinámica del sistema y restaurar alguna función ecosistémica dañada, aumentar la resiliencia del régimen deseable o estimular la dinámica hacia un cambio de régimen más favorable (es decir, reducir la resiliencia del régimen no deseado o desfavorable). Estos son los puntos de influencia,

146 SALIMI y otros (2021) p. 5165.

147 LEÓN y otros (2021) pp. 6, 7 y 12.

148 LEIFELD y otros (2019) p. 945.

caracterizados por que con tan solo una mínima intervención en ellos se puede lograr un impacto en una proporción mucho mayor, siendo incluso posible revertir un cambio de régimen desfavorable (cuando aún no se ha cruzado el umbral de irreversibilidad)¹⁴⁹.

Los cambios de régimen ecosistémico, si bien ocurren rápida y abruptamente, tienen la capacidad de afectar la provisión de servicios ecosistémicos largamente en el tiempo, impactando a varias generaciones. Las modificaciones antropogénicas introducidas en los ecosistemas pueden ser intensificadas por las respuestas que estos mismos generan, creándose fuertes mecanismos de retroalimentación recíproca entre la sociedad y los servicios ecosistémicos. De esta manera, se puede llegar a configurar una espiral descendente hacia la degradación del ecosistema¹⁵⁰. Las variables de control son aquellas identificadas para manipular el sistema y, así, lograr los objetivos de cambio propuestos o deseados. Las estrategias de influencia pueden elegir controlar variables en distintos niveles ecosistémicos, produciendo patrones de interacción particulares con el resto del sistema y obteniendo diferentes resultados¹⁵¹.

Las opciones de gestión ante cambios de régimen ecosistémico pueden agruparse en dos tipos de acciones: por una parte, aquellas acciones destinadas a prevenir un cambio de régimen ecosistémico, correspondientes a intervenciones realizadas para mantener los regímenes favorables y evitar cambios de régimen desfavorables, mejorando la resiliencia existente; y, por otra, las acciones para la restauración de regímenes deseables, reduciendo la resiliencia del régimen alterno desfavorable mediante intervenciones para transformarlo y restaurar el régimen anterior.

Los cambios en los servicios ecosistémicos y sus implicancias para el bienestar humano pueden abordarse mediante la evaluación de escenarios que consideren sus riesgos y costos. Estos escenarios pueden incluir la construcción de resiliencia a través de incrementar la diversidad en las respuestas del sistema, la gestión adaptativa y el uso de tecnologías limpias¹⁵²⁻¹⁵³⁻¹⁵⁴.

149 BIGGS y otros (2018) pp. 2, 5 y 6.

150 CARPENTER y otros (2006) p. 6.

151 WALKER y otros (2012) p. 1.

152 BIGGS y otros (2018) pp. 4, 10 y 11.

153 HANSEN (2014) p. 7.

154 CARPENTER y otros (2006) pp. 6, 8 y 10.

No obstante, las estrategias enfocadas en la gestión de servicios ecosistémicos pueden presentar a menudo barreras institucionales para la transformación, entre ellas las diferencias de escalas espaciales, temporales y organizacionales entre sistemas sociales y ecológicos, y la falta de comprensión de los factores impulsores del cambio, haciendo que solo se manipulen una o muy pocas variables bien conocidas, orientadas a la obtención de una solución específica solamente, sin considerar que los sistemas socioecológicos generan resultados determinados por la interacción de muchas variables y que, por lo tanto, la implementación de cambios en este nivel requiere un modelo mental orientado hacia la innovación, la flexibilidad y la aceptación de la incertidumbre.

Entonces, para el éxito de la gestión de cambios ecosistémicos se hace necesario considerar las interacciones entre las personas y el ecosistema, las múltiples variables involucradas y los distintos objetivos propuestos, así como las escalas de dichas interacciones y la gradualidad en la implementación de un sistema de gestión flexible e innovador¹⁵⁵. Con base en lo anterior, este trabajo formula las siguientes propuestas de gestión sustentable, en términos de monitoreo de umbrales para evitar o revertir cambios desfavorables en los servicios ecosistémicos, con el objetivo último de fortalecer su resiliencia y favorecer su protección.

*a) Incremento de la resiliencia
imitando una sucesión natural y adaptativa*

Fortalecimiento de la diversidad biológica natural, la redundancia y la resiliencia ecosistémicas, a través de la reforestación con especies nativas, iniciando con el ñire, ya que es la especie pionera en el proceso de sucesión natural de las especies *Nothofagus* presentes en la zona. Además de contar con un mecanismo distintivo de regeneración ante el fuego, el ñire resulta ser una especie no preferida por el castor, lo que daría cierta ventaja para dar paso posteriormente a la reforestación con lenga y coigüe de Magallanes, utilizando como variables de control la protección preferencial de los árboles de hasta 1,5 m de altura y hasta 25 cm de diámetro, y densidades medias de recuperación de entre 50 y 300 individuos arbóreos por hectárea.

De esta manera, se utiliza una estrategia de influencia que genera resiliencia a nivel de densidad forestal, de paisaje (mosaico) y de comunidad

155 HANSEN (2014) pp. 6 y 8.

(distribución proporcional de especies *Nothofagus*), que además podría contribuir a fortalecer los mecanismos de regeneración tras incendios forestales.

*b) Erradicación total del castor de la zona
continental y contención de la expansión del castor
en el archipiélago de Tierra del Fuego*

Con miras a la erradicación progresiva y definitiva del castor de las islas, utilizando como variables de control en la contención de la expansión el umbral de capacidad de carga (0,9 colonias activas por kilómetro cuadrado) y la densidad de saturación (1,25 colonias por kilómetro cuadrado) para las zonas con colonias de castor activas en los ecosistemas ribereños. En este nivel, solo es posible actuar bajo un escenario en el cual ya se hayan resuelto las problemáticas de gestión subyacentes al sistema socioecológico mayor en el cual está inmerso el cambio de régimen ecosistémico potencial.

En el Proyecto GEF Castor se proponen y evalúan cuatro escenarios de gestión para la invasión del castor, con la posibilidad de implementación en un plazo de 15 años. El primero de estos escenarios es la opción de no hacer nada en cuanto a gestionar la invasión, lo cual fue evaluado como una pérdida para el Estado de Chile de más de 260.000.000 de dólares al año 2040, además del daño ambiental inconmensurable. Los demás escenarios contemplan el control del crecimiento de la población de castores (priorizado y no priorizado) y la erradicación. Si bien el escenario de erradicación del castor se presenta como la opción de mayor costo-eficiencia¹⁵⁶⁻¹⁵⁷, cada uno presenta variables socioeconómicas y culturales que requieren de un análisis mucho más profundo y participativo para la identificación de barreras y oportunidades de implementación, lo cual sobrepasa el alcance de este trabajo, por lo que se recomienda su estudio específico posterior.

*c) Gestión integral de las cuencas
hidrológicas para la protección de caudales ecosistémicos,
flujos de nutrientes y niveles freáticos funcionales*

Esto es especialmente importante en Tierra del Fuego, dada la configuración de los sistemas hidrológicos integrados de la zona, donde las turberas

156 CERDA y otros (2022) pp. 44, 45 y 75.

157 PROYECTO GEF CASTOR (2022) (s.p.).

se pueden encontrar asociadas a glaciares, escorrentías estacionales e incluso a ecosistemas ribereños de la estepa Magallánica.

Actualmente, tanto en Argentina como en Chile, la gestión de estos ecosistemas se realiza reduciéndolos a sus componentes bióticos y abióticos, quedando cada recurso natural –renovable y no renovable– bajo la competencia de un ente regulador diferente (recurso hídrico, vegetal o mineral), con la consecuente pérdida de funcionalidad y sustentabilidad (degradación del ecosistema). Pese a los conflictos regulatorios y aparentes incompatibilidades sectoriales¹⁵⁸, un primer punto de apoyo firme y de avance importante en la gestión integral de cuencas lo constituyen las contribuciones realizadas por iniciativas de conservación, tanto públicas como privadas.

Por ejemplo, en 2009, el sistema de cuenca hidrológica formada por el glaciar Vinciguerra y las turberas asociadas del valle de Andorra –que proveen de agua a la ciudad de Ushuaia, Argentina– fue declarado sitio de importancia internacional Ramsar, lo que sienta las bases para que el ecosistema pueda ser gestionado de manera sustentable, priorizando la conservación y provisión de servicios ecosistémicos. Más tarde, en 2015, el Ministerio de Minería de Chile, por medio del Decreto N° 16/2015¹⁵⁹, declaró las 75.000 hectáreas de turberas del Parque Karukinka (privado), ubicado en la Isla Grande de Tierra del Fuego, comuna de Timaukel, como área de interés para la investigación científica y de resguardo para efectos mineros. Si bien las iniciativas de conservación no intervienen directamente en las variables ecológicas del sistema, sí inciden en la estructura que soporta la dinámica existente hasta ese momento y que determina el tipo de gestión del sistema socioecológico, pudiendo iniciarse una transformación gradual.

d) Restauración ecológica de las turberas intervenidas

Con base en ejemplos de iniciativas internacionales, que incluyen en algunos casos la integración cultural de los pueblos originarios que ancestralmente han preservado estos humedales¹⁶⁰. A nivel ecosistémico, se aplican técnicas para manejar el nivel del agua bloqueando ciertos flujos de escorrentía, para subir así el nivel y modificar con ello las concentraciones

158 GIOMI y otros (2022) p. 509.

159 CHILE, MINISTERIO DE MINERÍA, Decreto Supremo N° 16/2015.

160 WCS CHILE (2022) (s.p.).

de nutrientes y la acidez; técnicas de rehumedecimiento; mecanismos de estimulación del crecimiento de masa vegetal o musgo sobre balsas de turba flotante, entre otros, para mantener las funciones reguladoras naturales en equilibrio, restableciendo las especies de plantas dominantes, el flujo de nutrientes, el intercambio gaseoso y la superficie funcional de sumidero de carbono. Dentro de todas las diferentes técnicas de restauración, los principios básicos más importantes son revertir el drenaje de origen antrópico y mantener la saturación de agua que permita la formación del componente biótico y la biodiversidad asociada a este¹⁶¹⁻¹⁶².

Para zonas de turberas ya convertidas en fuentes emisoras de carbono, la restauración de áreas drenadas podría contribuir a su carbono neutralidad. Por lo tanto, la restauración y la gestión del agua de las turberas representan claramente un punto de influencia y una opción de manejo ecosistémico tanto a nivel de conservación de la biodiversidad como a nivel de acción climática¹⁶³⁻¹⁶⁴. Entre las dificultades para actuar sobre las turberas intervenidas en Tierra del Fuego se encuentran la falta de inventario de turberas y la no declaración de faenas abandonadas¹⁶⁵.

e) Inclusión de las comunidades en la gestión sustentable de su ecosistema

Frente al cambio de régimen de los incendios en Chile, que actualmente llegan a superar la capacidad humana para combatirlos (han alcanzado una nueva categoría, de sexta generación), se hace necesario gestionar las acciones sobre el territorio tratándolo como un sistema socioecológico, incluyendo a comunidades resilientes en la prevención, planificación, mitigación y adaptación a los impactos de los incendios forestales. Las acciones orientadas a la restauración de los ecosistemas nativos y al control de especies invasoras como el castor deberían tomarse bajo este mismo enfoque¹⁶⁶. Este punto de influencia se encuentra en el nivel de abstracción más alto (o más profundo, según el modelo de representación de iceberg), que corresponde a los mo-

161 OSPINA Y MOOR (2017) (s.p.).

162 BUCKMASTER y otros (2014) p. 9.

163 LEIFELD y otros (2019) p. 945.

164 SALIMI y otros (2021) p. 5164.

165 ITURRASPE (2017) p. 6.

166 VILLAGRA y PAULA (2021) p. 13.

delos mentales que construyen las estructuras que soportan las dinámicas y los patrones observables en un sistema socioecológico complejo. Los cambios en este nivel tienen el mayor potencial de transformación dentro de la gobernanza del sistema terrestre y, aunque requieren de una planificación cuidadosa, tienen una alta probabilidad de resultar en cambios transformacionales eficientes que reflejen la urgencia de los desafíos complejos que enfrentamos hoy¹⁶⁷.

V. DISCUSIÓN

El enfoque de análisis ecosistémico nos permite identificar relaciones de causalidad entre los distintos procesos naturales y factores antropogénicos, y los impactos sobre los ecosistemas vulnerables y sus implicancias para la resiliencia de los servicios ecosistémicos. Aunque el detalle de los mecanismos involucrados en la dinámica de las variables del cambio ecosistémico requiere investigaciones más profundas, ello no impide modelar los efectos del cambio, comprendiendo que existen umbrales de tolerancia ante las perturbaciones que no deben ser sobrepasados si se quiere conservar las funciones del ecosistema que hacen posible la provisión de servicios ecosistémicos.

El análisis de los ecosistemas más representativos de Tierra del Fuego como estudio de caso resulta útil para agrupar, visualizar y comprender un conjunto de datos cualitativos y cuantitativos que dan cuenta de su vulnerabilidad, capacidad de adaptación y oportunidades de gestión sustentable para incrementar su resiliencia. El fortalecimiento de la diversidad biológica de los bosques subantárticos a través de la reforestación con especies nativas utilizando un enfoque de resiliencia ecosistémica a nivel de paisaje, como la estrategia de mosaico o la protección preferencial de individuos arbóreos según umbrales de diámetro y altura, por ejemplo, sirve para mantener densidades medias de recuperación para la regeneración de los bosques, afectados principalmente por los incendios forestales y la construcción de diques e inundación por la acción de castor. Los umbrales de capacidad de carga y densidad de saturación (colonias por kilómetro cuadrado) pueden ser utilizados como variables de control para la contención de la expansión del castor en el archipiélago de Tierra del Fuego, con miras a la erradica-

167 BOLTON (2022) p. 2429.

ción progresiva y definitiva, mientras que el punto de influencia más alto (abstracción a nivel de modelo mental) consiste en la erradicación pronta y total del castor de la zona continental (Región de Magallanes).

Finalmente, el análisis de las interconexiones entre los componentes bióticos y abióticos de las turberas, junto con las relaciones interdependientes entre cuencas hidrológicas y ecosistemas ribereños, muestra la vulnerabilidad de estos ecosistemas y, con ello, la necesidad de mantener un nivel freático funcional y un régimen metabólico estable en los cursos de agua, para no alterar el ciclo de los nutrientes que proveen a los distintos ecosistemas que atraviesan. Tanto la gestión integral de las cuencas como la restauración ecológica de las turberas mediante técnicas para manejar el nivel del agua pueden contribuir a la conservación, construcción de resiliencia y gestión sustentable de los ecosistemas de Tierra del Fuego.

VI. CONCLUSIONES

Aunque el conocimiento de los mecanismos involucrados en su autorregulación sea parcial, ecosistemas tan vulnerables como los de Tierra del Fuego deben ser gestionados teniendo en cuenta los principios precautorio y preventivo¹⁶⁸, ya que, de ser sobrepasados los umbrales de cambio de régimen, se pone en alto riesgo la provisión de servicios ecosistémicos primordiales en este territorio, como el abastecimiento de agua. Con ello, se debe procurar mantener un nivel freático funcional y un régimen metabólico estable en cursos de agua y turberas, mientras que el monitoreo de umbrales de diámetro y altura arbórea resulta muy necesario para la regeneración de los bosques afectados por incendios y la acción de los castores. Los umbrales de capacidad de carga y densidad de saturación de la población de estos últimos deben ser atendidos en la contención de la expansión geográfica del castor.

El estudio de los regímenes ecosistémicos, sus umbrales de cambio y los impactos ambientales que las perturbaciones antropogénicas ocasionan en su funcionamiento, se devela como fundamental e imprescindible para la construcción de resiliencia y la gestión sustentable de los ecosistemas de Tierra del Fuego.

168 La Ley Marco de Cambio Climático de Chile (CHILE, *Ley N° 21.455* de 2022) incluye a los principios precautorio y preventivo entre los principios que deben inspirar los instrumentos de implementación y aplicación de esta ley.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLENDE, Jesús (2022): Alarma por el dramático fenómeno que pondrá fin a los glaciares de Tierra del Fuego: para cuándo se prevé, *La Nación* (15 de septiembre). Disponible en: <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/alarma-por-el-dramatico-fenomeno-que-pondra-fin-a-los-glaciares-de-tierra-del-fuego-para-cuando-se-nid15092022/>. Fecha de consulta: 15 de julio de 2023.
- AGÜERO, Teresa (2013): Musgo *Sphagnum*: manejo sostenible del recurso (Santiago, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile).
- ARISMENDI, Iván y otros (2008): “Impacto del castor en la estructura de bosques ribereños de *Nothofagus pumilio* en Tierra del Fuego, Chile”, *Bosque*, vol. 29: pp. 146-154.
- BALDINI, Aida y otros (2008): “Impacto del castor (*Castor canadensis*, Rodentia) en bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) de Tierra del Fuego, Chile”, *Bosque*, vol. 29, N° 2: pp. 162-169.
- BERNHARDT, Emily y otros (2018): “The metabolic regimes of flowing waters”, *Limnology and Oceanography*, vol. 63: pp. 99-118.
- BIGGS, Reinette y otros (2012): “Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services”, *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 37: pp. 421-448.
- (2018): “The Regime Shifts Database: a framework for analyzing regime shifts in socialecological systems”, *Ecology and Society*, vol. 23, N° 3: art. 9.
- BOLTON, Mitzi (2022): “A system leverage points approach to governance for sustainable development”, *Sustainability Science*, vol. 17: pp. 2427-2457.
- BUCKMASTER, Cris y otros (2014): *Global Peatland Restoration demonstrating Success* (Edimburgo, IUCN National Committee, United Kingdom Peatland Programme).
- BUSTAMANTE, Ramiro (2022): “Modelos metapoblacionales y su importancia en ecología: más allá de Richard Levins”, *Revista de Modelamiento Matemático de Sistemas Biológicos*, vol. 2, N° 1: pp. 21-25.
- CARPENTER, Stephen y otros (2006): “Scenarios for ecosystem services: an overview”, *Ecology and Society*, vol. 11, N° 1: art. 29.

- CERDA, Claudia y otros (2022): *Valoración económica y sociocultural del impacto del castor en Tierra del Fuego y resto de la Región Magallánica* (Santiago, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile).
- CHEMELLO, Silvia y otros (2018): “Regime shifts and alternative stable states in intertidal rocky habitats: State of the art and new trends of research”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 214: pp. 57-63.
- CR², CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (2020): *Turberas de la Patagonia: El ecosistema de más de 18 mil años que es clave para alcanzar la carbono neutralidad (La Tercera)*. Disponible en: <https://www.cr2.cl/turberas-de-la-patagonia-el-ecosistema-de-mas-de-18-mil-anos-que-es-clave-para-alcanzar-la-carbono-neutralidad-la-tercera>. Fecha de consulta: 3 de agosto de 2023.
- DOMÍNGUEZ, Erwin y VEGA, Débora (2015): *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes* (Punta Arenas, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Kampenaike).
- EPELE, Luis y otros (2022): “Patagonian Wetlands: Vertientes, Vegas, Mallines, Turberas, and Lagunas”, en: MATALONI, Gabriela y QUINTANA, Rubén (2022): *Freshwaters and Wetlands of Patagonia, Ecosystems and Socioecological Aspects*, 1ª edición (Cham, Springer Nature Switzerland AG) pp. 267-294.
- FERNÁNDEZ, F. (2023): “Glaciares observados por Darwin en viaje por Tierra del Fuego aceleran su deshielo: pierden unos 5 km cuadrados al año”, *EMOL* (6 de junio). Disponible en: <https://www.emol.com/noticias/Tecnologia/2023/06/06/1097226/colosales-glaciares-desaparecen-patagonia.html>. Fecha de consulta: 3 de agosto de 2023.
- FRANGI, Jorge y otros (2005): “Ecología de los bosques de Tierra del Fuego”, en: GOYA, Juan y otros (2005), *Ecología y manejo de los bosques de Argentina* (La Plata, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata).
- GARCÍA, Victoria y RODRÍGUEZ, Patricia (2018): “Efecto del castor en el metabolismo del perifiton y en variables limnológicas de ríos y arroyos fueguinos”, *Ecología Austral*, vol. 28: pp. 593-605.
- GARCÍA, Victoria y otros (2022): “Ecosystem metabolism in sub-Antarctic streams and rivers impacted by non-native beaver”, *Aquatic Sciences*, vol. 84, N° 54.

- GIOMI, Karina y otros (2022): “Political Ecology, Water Valuations and Feasibility of Water Law Deliberation in the Province of Tierra del Fuego, AIAS (1993-2016)”, en: MATALONI, Gabriela y QUINTANA, Rubén (2022): *Freshwaters and Wetlands of Patagonia, Ecosystems and Socioecological Aspects*, 1ª edición (Cham, Springer Nature Switzerland AG) pp. 489-525.
- GROOTJANS, Ab y otros (2014): “Mires and mire types of Peninsula Mitre, Tierra del Fuego, Argentina”, *Mires and Peat*, vol. 14: pp. 1-20.
- HANSEN, Winslow (2014): “Generalizable principles for ecosystem stewardship-based management of social-ecological systems: lessons learned from Alaska”, *Ecology and Society*, vol. 19, N° 4: art. 13.
- HUERTAS, Alejandro y otros (2020): “Mapping the status of the North American beaver invasion in the Tierra del Fuego archipelago”, *Plos One*, vol. 15, N° 4: pp. 1-19.
- ITURRASPE, Rodolfo y URCIUOLO, Adriana (2000): “Clasificación y caracterización de cuencas de Tierra del Fuego”, en: *Actas de la Conferencia: XVIII Congreso Nacional del Agua* (Termas de Río Hondo, Santiago del Estero).
- ITURRASPE, Rodolfo (2010): *Las turberas de Tierra del Fuego y el cambio climático global* (Buenos Aires, Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales, Oficina Argentina de Wetlands International-LAC).
- (2017): *Peatland restoration by rewetting in Tierra del Fuego, Argentina* (Universidad de Tierra del Fuego, Argentina). Disponible en: <https://www.ramsar.org/document/peatland-restoration-rewetting-tierra-del-fuego-argentina>. Fecha de consulta: 12 de julio de 2023.
- ITURRASPE, Rodolfo y URCIUOLO, Adriana (2021): “The Ecosystem Services Provided by Peatlands in Patagonia”, en: PERI, Pablo y otros (2021): *Ecosystem Services in Patagonia*, 1ª edición (Cham, Springer Nature Switzerland AG) pp. 155-186.
- LARSEN, Annegret y otros (2021): “Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems”, *Earth-Science Reviews*, vol. 218: pp. 1-46.
- LAUREL, DeAnna y WOHL, Ellen (2019): “The Persistence of Beaver-Induced Geomorphic Heterogeneity and Organic Carbon Stock in River Corridors: Beaver-induced heterogeneity”, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 44: pp. 342-353.

- LEIFELD, Jens y otros (2019): “Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 (Abstract)”, *Nature Climate Change*, vol. 9: pp. 945-947.
- LEÓN, Carolina y otros (2021): “Peatlands of Southern South America: a review”, *Mires and Peat*, vol. 27: art. 3.
- LIZARRALDE, Marta y otros (2004): “Invader species in Argentina: a review about the beaver (*Castor canadensis*) population situation on Tierra del Fuego ecosystem”, *Interciencia*, vol. 29, N° 7: pp. 352-356.
- MARTÍNEZ, Guillermo y otros (2006): “Understorey succession in *Nothofagus* forests in Tierra del Fuego (Argentina) affected by *Castor canadensis*”, *Applied Vegetation Science*, vol. 9: pp. 143-154.
- MOLINA, Rodrigo y otros (2018): “Estado actual de la distribución del castor *Castor canadensis* Kuhl 1820 (Rodentia) en el área continental de la región de Magallanes, Chile”, *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, vol. 46, N° 3: pp. 7-15.
- OSPINA, Daniel y MOOR, Helen (2017): “Peatland transitions”, en: *Regime Shifts Database* (Estocolmo, Stockholm Resilience Centre, Stockholm University). Disponible en: <https://www.regimeshifts.org/item/470-peatland-transitions>. Fecha consulta: 2 de julio de 2023.
- PAREDES y otros (2023): “Dinámica de la regeneración natural de lenga en el corto plazo luego de la cosecha forestal en bosques de producción de Tierra del Fuego”, en: *VIII Congreso Forestal Latinoamericano, V Congreso Forestal Argentino* (27 al 30 de marzo).
- PISANO, Edmundo (1997): “Los bosques de Patagonia austral y Tierra del Fuego chilenas”, *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Cs. Naturales (Chile)*, vol. 25: pp. 9-19.
- POLVI, Lina y WOHL, Ellen (2012): “The beaver meadow complex revisited – the role of beavers in post-glacial floodplain development”, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 37: pp. 332-346.
- PONCE, Juan y otros (2011): “Evolución del paisaje y de la vegetación durante el Cenozoico tardío en el extremo sudeste del archipiélago fueguino y canal Beagle”, en: ZANGRANDO, Atilio y otros (2011): *Los cazadores-recolectores del extremo oriental fueguino: arqueología de península Mitre e Isla de los Estados*, 1ª edición (Buenos Aires: Sociedad Argentina de Antropología) pp. 31-64.

- PROYECTO GEF CASTOR (2022): *Fortalecimiento y desarrollo de instrumentos para el manejo, prevención y control del castor (Castor canadensis), una especie exótica invasora en la Patagonia chilena* (Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile). Disponible en: <https://gefcastor.mma.gob.cl/>. Fecha de consulta: 3 de julio de 2023.
- ROCHA, Juan y otros (2015): “Regime Shifts in the Anthropocene: Drivers, Risks, and Resilience”, *Plos One*, vol. 10, N° 8: pp. 1379-1383.
- RUGGIRELLO, Matthew (2022): “Los incendios forestales en Tierra del Fuego”, *La Lupa*, N° 21: pp. 7-9.
- RUGGIRELLO, Matthew y otros (2023a): “*Nothofagus pumilio* regeneration failure following wildfire in the sub-Antarctic forests of Tierra del Fuego, Argentina”, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2023, 6-2023, pp. 1-10. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/223762>. Fecha de consulta: 31 de julio de 2023.
- (2023b): “Drivers of post-fire *Nothofagus antarctica* forest recovery in Tierra del Fuego, Argentina”, *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 11: pp. 1-12.
- RULL, Valentí y VEGAS-VILARRÚBIA, Teresa (2023): “Resilience of Pyrenean Forests after Recurrent Historical Deforestations”, *Forests*, vol. 14, N° 567: pp. 1-17.
- SALIMI, Shokoufeh y otros (2021): “Response of the peatland carbon dioxide sink function to future climate change scenarios and water level management”, *Global Change Biology*, vol. 27, N° 20: pp. 5154-5168.
- SIMBIO, SISTEMA DE INFORMACIÓN Y MONITOREO DE BIODIVERSIDAD (2023): *Sitio Prioritario (Ley 19.300 art. 11, letra d) “Isla Navarino”*. Disponible en: <https://simbio.mma.gob.cl/AreaProtegida/Details/1424>. Fecha de consulta: 22 de julio de 2023.
- VAN BELLEN, Simon y otros (2016): “Late-Holocene climate dynamics recorded in the peat bogs of Tierra del Fuego, South America”, *The Holocene*, vol. 26, N° 3: pp. 489-501.
- VILLAGRA, Paula y PAULA, Susana (2021): “Wildfire Management in Chile: Increasing Risks Call for More Resilient Communities”, *Environment Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 63, N° 3: pp. 4-14.
- WALKER, Brian y otros (2012): “Drivers, ‘slow’ variables, ‘fast’ variables, shocks, and resilience”, *Ecology and Society*, vol. 17, N° 3: art. 30.

- WCS CHILE (2022): *Turberas de la Patagonia, la urgencia de trabajar en su conservación*. Disponible en: <https://programs.wcs.org/chile/Nosotros/Noticias/ID/18225/Turberas-de-la-Patagonia-la-urgencia-de-trabajar-en-su-conservacion.aspx>. Fecha de consulta: 1 de agosto de 2023.
- (2019): *Milenarias turberas de Karukinka y su aporte para la adaptación al cambio climático*. Disponible en: <https://chile.wcs.org/Nosotros/Noticias/ID/12202/Milenarias-turberas-de-Karukinka-y-su-aporte-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico.aspx>. Fecha de consulta: 1 de agosto de 2023.
- ZIPPER, Sam y otros (2022): “Alternative stable states and hydrological regime shifts in a large intermittent river”, *Environmental Research Letters*, vol. 17, N° 7: pp. 1-13.

NORMAS CITADAS

a) De leyes no codificadas:

- ARGENTINA, Ley N° 26.331 (26.12.2007): *Establécese los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos*.
- CHILE, Ley N° 19.300 (09.03.1994): *Aprueba Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente*.
- CHILE, Ley N° 20.283 (30.07.2008): *Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal*.
- CHILE, Ley N° 21.455 (13.06.2022): *Ley Marco de Cambio Climático*.
- CHILE, Ley N° 21.660 (10.04.2024): *Sobre Protección Ambiental de las Turberas*.

b) De decretos:

- CHILE, MINISTERIO DE MINERÍA, Decreto Supremo N° 16 (29.07.2015): *Declara lugar de interés científico para efectos mineros área ubicada en región de Magallanes, Provincia de Tierra del Fuego, comuna de Timaukel*.
- CHILE, MINISTERIO DE AGRICULTURA, Decreto Supremo N° 25 (02.02.2018): *Dispone medidas para la protección del musgo Sphagnum magellanicum*.