MESA **CRIÓSFERA Y ANTÁRTICA**

Criósfera chilena y Antártica: Recomendaciones desde la evidencia científica

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

COP25 CHILE 2019

COMITÉ CIENTÍFICO DE **CAMBIO CLIMÁTICO**

Criósfera Chilena y Antártica: Recomendaciones desde la evidencia científica

MESA **CRIÓSFERA Y ANTÁRTICA**

COMITÉ CIENTÍFICO DE **CAMBIO CLIMÁTICO**

AUTORES

Coordinador mesa Criósfera y Antártica
Humberto E. González[1,2]

Coautores
Deniz Bozkurt[3,4], Francisco Cereceda-Balic[5,6], Raúl Cordero[7], Francisco Fernandoy[8,9], José Luis Iriarte[1,2], Shelley MacDonell[10], James McPhee[3], Elie Poulin[3,11], Andrés Rivera[12], Maisa Rojas[3,4] y Marius Schaefer.[1]

1 Universidad Austral de Chile
2 Centro de investigación dinámica de ecosistemas marinos de altas latitudes (IDEAL-FONDAP)
3 Universidad de Chile
4 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2
5 Universidad Técnica Federico Santa María
6 Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM)
7 Universidad de Santiago de Chile
8 Universidad Andrés Bello
9 Centro de investigación para la Sustentabilidad (CIS)
10 Centro de Estudio Avanzados en Zonas Aridas (CEAZA)
11 Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)
12 Centro de Estudios Científicos (CEC)

Contribuciones
Claudia Andrade, Gustavo Blanco, Francisca Bown, Fabio Bozzeda, César Cárdenas, Leyla Cárdenas, Jorge Carrasco, Angélica Casanova-Katni, Gino Cassasa, Lohengrin Cavieres, Pedro Cid, Camille Dutree, Laura Farías, Camila Fernández, Luis Valentín Ferrada, Máximo Frangopulos, José Garcés-Vargas, Ricardo Giesecke, María Angélica Godoi, Iván Gómez, Marcelo González, Álvaro González-Reyes, Juan Höfer, Fabrice Lambert, Carina Lange, Jean Charles Leclerc, Marcelo Leppe, Andrés Mancilla, Francisco Matus, Mireia Mestre, Alejandra Mora, Irlanda Mora, Laura Nahuelhual, Jorge Navarro, Andrea Piñones, Gemita Pizarro, Lorena Rebolledo, José Retamales, Militza Rodríguez, Rodolfo Sapiains, Eduardo Schiappacasse, Alfredo Soto, Alejandra Stehr, Nicole Trefault, Nelson Valdivia, Ximena Vergara y Rodrigo Zamora.

Logística y apoyo
Daniela Benavente, Felipe Guarda y Andrea Navarro.

Edición: Cartógrafo.cl SpA
Diseño: www.negro.cl
Foto portada: Ricardo Giesecke

Citar como:
González, H. E., D. Bozkurt, F. Cereceda-Balic, R. Cordero, F. Fernandoy, J. L. Iriarte, S. MacDonell, J. McPhee, E. Poulin, A. Rivera y M. Schaefer (2019). *Criósfera Chilena y Antártica: Recomendaciones desde la evidencia científica*. Comité científico COP25, mesa Criósfera y Antártica, 46 páginas.

Acrónimos utilizados en este informe

AMP: Área Marina Protegida

BBC: Bomba Biológica de Carbono

BFC: Bomba Física de Carbono

CCAMLR: Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos *(Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)*

GEI: Gases de efecto invernadero

INACh: Instituto Antártico Chileno

IPCC: Panel Intergubernamental para el Cambio Climático

NDC: Contribuciones Determinadas a nivel Nacional

PA: Península Antártica

PANCC: Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (2017-2022)

PNACC: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2014)

SANT: Región Subantártica

SCAR: Comité Científico para la Investigación Antártica (*Scientific Committee on Antarctic Research*)

PROCESO

La mesa Criósfera y Antártica hizo un llamado a la participación de los investigadores de estas áreas del conocimiento para delinear un plan de trabajo que incluya un diagnóstico de la situación de la criósfera y la Antártica, definir áreas críticas y proyecciones en diferentes escenarios de cambio climático.

Se llevaron a cabo tres talleres durante 2019, en la Universidad Austral de Chile, en Valdivia, el 3 de junio; en la Universidad de Magallanes, en Punta Arenas, el 17 de julio, y en el Palacio de La Moneda, en dependencias del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, en Santiago, el 4 de septiembre. Su objetivo fue proveer de insumos científicos para las diferentes instancias definidas en la agenda climática 2019.

La información recopilada en los tres talleres, además de la revisión de la literatura y reportes sirvió para la elaboración del presente informe.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, al Ministerio del Medio Ambiente, a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, a la Unión Europea, a la Universidad Austral de Chile, a la Universidad de Magallanes, al Instituto Antártico Chileno y al Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (FONDAP-IDEAL), por el decidido apoyo en distintas etapas del trabajo de la mesa Criósfera y Antártica.

La información recabada y las contribuciones de los autores durante los talleres realizados en Valdivia, Punta Arenas y Santiago son la base de este reporte. Sin embargo, se debe dejar constancia que no necesariamente todos los participantes comparten los comentarios y sugerencias plasmados en el reporte. Tampoco los contenidos representan necesariamente a las universidades, centros de investigación u otras instituciones acá mencionadas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen ejecutivo 7

Principales recomendaciones 8

Introducción 9

Situación actual de cambios científicos observados. 14

Efectos del cambio climático en sistemas de altas latitudes: teleconexiones 14

La criósfera 15

Sistemas marinos antárticos (oceánicos y costeros), con énfasis en la península Antártica. 20

Brechas en la investigación científica 23

Investigación sobre la contribución hídrica de glaciares 23

Investigación en glaciares rocosos 24

Investigación en gases de efecto invernadero 24

Investigaciones en otras áreas 24

Actualización de las NDC de Chile: Brechas y recomendaciones 26

Mitigación 26

Adaptación 27

Fortalecimiento y construcción de capacidades 28

Financiamiento 32

Recomendaciones de política pública 33

Potenciar a Chile como país centinela del cambio climático . . 33

Potenciar la investigación científica en la península Antártica y Antártica occidental 33

Consolidar instituciones públicas y privadas de investigación . 34

Promover un programa de educación escolar y cívica sobre el cambio climático 34

Calcular la huella de carbono y el costo social y ecosistémico de la actividad humana 34

Mejorar la gobernanza. 35

Conclusiones 39

Referencias. 41

FIGURAS

Figura 1. Pérdidas de "Agua Equivalente" (correspondientes al hielo continental) estimadas entre 2002 y 2019 por la misión *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). . . . 10

Figura 2. Balance de masa promedio de glaciares en los Andes. 10

Figura 3. Tendencia de cobertura de nieve. 11

Figura 4. Concentraciones promedio de carbono negro medidas en la nieve de los Andes chilenos. 12

Figura 5. Cambios en intensidad del viento, estimados como la diferencia entre los promedios de los períodos 2000-2019 y 1951-1980 14

Figura 6. Distribución de áreas y balances de masa de glaciares en los Andes de Chile y Argentina. 17

Figura 7. Representación de la pérdida global de hielo de glaciares en los últimos 70 años 18

Figura 8. Cambios temporales en las áreas del glaciar Echaurren y balance de masa acumulativo de los glaciares Echaurren, Guanaco y Mocho 19

Figura 9. Balance de masa superficial, descarga de hielo y masa total en diversas regiones de la Antártica 20

Figura 10. Temperatura superficial del aire medida en diversas estaciones a lo largo de la península Antártica. 21

Figura 11. Dominancia de pellets fecales de krill en el secuestro de carbono de la Antártica y la posible reducción de este flujo debido al cambio climático. 22

Resumen ejecutivo

Chile es uno de los países más vulnerables al cambio climático, principalmente, debido a su configuración biogeográfica. Sus efectos ya se están manifestando, principalmente por una prologada y extensa sequía. En este contexto, es urgente la adopción de medidas de mitigación y adaptación para enfrentar los impactos actuales y los adversos escenarios futuros que predicen los modelos climáticos.

La criósfera antártica y andina incluye los hielos continentales y marinos permanentes o estacionales, localizados en la península Antártica (PA) y en la región Subantártica (SANT), junto con el macizo Andino en su conjunto. La criósfera alberga una especial biodiversidad que sustenta una serie de subsistemas ecológicos (p. ej., vegas, bofedales, turberas, glaciares, permafrost, lagos subglaciales, tundras marinas, etc.) y servicios ecosistémicos vitales (agua, recreación, regulación climática, biodiversidad, alimento, turismo, etc.), los que están seriamente amenazados por el cambio climático, con negativas consecuencias para el medio ambiente, el clima y la sociedad (reducción del bienestar humano).

La criósfera antártica y andina está siendo muy afectada por el alza global de la temperatura (IPCC, 2019). La pérdida de hielo continental en la Antártica se aceleró más de seis veces en las últimas cuatro décadas, mientras que el 87 % de los glaciares andinos monitoreados en territorio nacional exhiben algún grado de retroceso. Hoy, el hielo perdido por la Antártica es promotor de aproximadamente el 10 % del alza global en el nivel de mar; entretanto, el derretimiento de los glaciares andinos, especialmente aquellos en los Campos de Hielo patagónicos, es el responsable de cerca del 3 % del alza global en el nivel de mar.

Resulta vital asumir compromisos ambiciosos e inmediatos, por cuanto los escenarios climáticos futuros indican que es urgente una transformación en nuestra forma de adaptarnos, en nuestros patrones de vida y de uso de nuestros recursos. Esto, para poder alcanzar las metas de crecimiento sustentable que considere las dimensiones medioambientales, culturales, sociales y económicas.

La investigación científica en la PA, SANT y los Andes chilenos es deficitaria en áreas como en el estudio del acoplamiento entre la atmósfera - océano, atmósfera - criósfera y la modelación de procesos biológicos, biogeoquímicos y climáticos. Estas brechas contrastan con la importancia de las regiones de altas latitudes como centinela y controlador del clima regional y global. Es importante mejorar la colaboración científica entre instituciones públicas, privadas y academia, en el uso y manejo integrado de los datos.

Además, se observa una deficitaria gobernanza en la toma de decisiones sobre las políticas públicas, por ejemplo, respecto al uso sustentable y/o protección de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos que provee la criósfera. Posibles mejoras incluyen la articulación de un servicio de biodiversidad y áreas protegidas, un sistema nacional de monitoreo de largo plazo y gestión de información climática y ambiental, y avanzar hacia mecanismos de Gestión Integrada del Territorio (GIT). Se requiere dotar al Estado de capacidades técnicas para anticiparse a las posibles consecuencias del cambio climático y potenciar instancias virtuosas de alianzas entre la academia y el sector público/privado. Falta incrementar y mejorar la educación sobre temas climáticos, cívicos y legales acerca del cambio climático, a todo nivel, desde escolar a gubernamental.

PRINCIPALES RECOMENDACIONES

Chile es el país más cercano geográficamente a la Antártica, lo que le otorga una posición estratégica. Si le sumamos la gran extensión de la criósfera patagónica y la presencia y relevancia de la criósfera andina mediterránea, la criósfera chilena abarca una extensa cobertura latitudinal. Esta región es muy vulnerable al cambio climático, pero también, reguladora (parcialmente) del clima regional y global. Todo lo cual la hacen un sistema único, un laboratorio natural para estudiar el cambio climático para Chile y el mundo.

De igual modo, los estudios de estresores multifactoriales en el océano Austral (acidificación, calentamiento, *freshening*, etc.), han demostrado efectos negativos en la diversidad, distribución y crecimiento de especies marinas. Las recomendaciones para una mejor compresión de la criósfera, que permitan protegerla de mejor forma, son las siguientes:

1. Posicionar a Chile como referente mundial en investigación científica (tanto de la Antártica como del sistema cordillerano de los Andes).
2. Facilitar la colaboración científica a nivel nacional e internacional entre centros de investigación, proporcionar la logística de trabajo y acercar la ciencia antártica a la sociedad. El Centro Antártico Internacional (CAI) podría aglutinar estas demandas desde la región de Magallanes.
3. Aprovechar las ventajas comparativas de Chile para constituirse en un laboratorio natural del cambio climático al albergar la mayor cantidad de glaciares y la costa más larga de Sudamérica, lo que acentúa las interacciones/acoplamientos criósfera-océano, y de estas con la Antártica:
4. Chile es el país más cercano a la península Antártica;
5. Cubre una extensa cobertura latitudinal que abarca casi todo el hemisferio sur;
6. Es muy vulnerable al cambio climático; y
7. Es un regulador del clima regional y global.

La criósfera de Chile continental incluye todo tipo de glaciares y las coberturas nivales a lo largo de la cordillera de los Andes. Se caracteriza por albergar la tercera reserva de agua dulce más grande del planeta (símil a embalses naturales), la que está fuertemente desplazada a la zona sur de Chile (las regiones de Aysén y Magallanes incluyen el ~90 % de la superficie de glaciares). Estas reservas están fuertemente amenazadas por el calentamiento global, con incrementos considerables en pérdida de masa de glaciares. Las recomendaciones para la criósfera continental incluyen:

1. Considerar medidas de protección legal para los glaciares de Chile, adicionales a las consideradas en la normativa medioambiental en rigor (futura Ley de Protección de Glaciares).
2. Aumentar la ambición en los compromisos de Chile para que el incremento máximo de la temperatura no sobrepase los 1.5 °C, dado el riesgo de perder completamente los glaciares del norte Chile y hasta la mitad de los del centro-sur a fines de siglo.
3. Potenciar los estudios con respecto al ecosistema (*i. e.*, interrelación entre sistemas terrestres y marinos) y subsistemas de componentes interconectados (criósfera-océano-atmósfera). Se requiere centros especializados en temas de la criósfera (tanto andina como de la Antártica) que considere plataformas de monitoreo permanente y un repositorio de toda la información de monitoreo y estudios relacionados con la criósfera y los ecosistemas de montaña para uso público y compartido.
4. Estimular la cooperación en ciencia, tecnología e innovación de la academia con los sectores público y privado interesados. El sector productivo y la academia disponen de recursos, equipos y capital humano; sin embargo, se requiere facilitar e incrementar los mecanismos que faciliten esta interacción.
5. Desarrollar un plan ambicioso de educación y difusión de la relevancia de la criósfera en el contexto de los servicios ecosistémicos que provee, desde locales a globales (desde regulador del clima hasta el bienestar humano), y que llegue a todos los estratos de la sociedad: a nivel escolar, universitario, ciudadano y sectores público, privado y gubernamental.
6. En cuanto a mitigación, fomentar medidas que tengan un impacto directo sobre la criósfera y el océano Austral. Con respecto a los glaciares, se propone disminuir los contaminantes climáticos de vida media corta (carbono negro, CH_4, O_3, etc.), con la múltiple función de proteger desde la salud de las personas y evitar su impacto negativo sobre glaciares.
7. Para el océano Austral se debe proteger el proceso natural de exportación de carbono a zonas profundas del océano, a través de la bomba biológica de carbono. Esto, protegiendo a las especies clave en este proceso (p. ej., krill, ballenas, etc.).

Introducción

Chile ha sido catalogado como un territorio altamente vulnerable al cambio climático y la Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), presentada en cumplimiento con el Acuerdo de París en 2015, plantea una serie de medidas y avances en los ámbitos de la mitigación, adaptación, el fortalecimiento y construcción de capacidades, desarrollo y la transferencia de tecnologías y financiamiento (INDC, 2015). Aunque el pilar de mitigación de las NDC es el más visible, incluye elementos asociados y fortalecimiento de capacidades que permiten vislumbrar una necesidad urgente hacia mejorar nuestra capacidad científica. En el caso de la criósfera, esto es relevante para generar, por un lado, herramientas de análisis más certeros acerca de la variabilidad espacio-temporal de procesos oceanográficos y atmosféricos y, por otro lado, establecer sinergias entre investigadores e instituciones. Una base de información científica robusta es vital para poder acometer los desafíos de mitigación y adaptación que se vienen y entregar los insumos necesarios a los estamentos de toma de decisiones.

La cumbre climática realizada en París en 2015 (COP21), y que concluyó con el Acuerdo de París, estableció como objetivo a largo plazo *mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2* °C *con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1.5* °C. Para lograr este objetivo se debe movilizar a la comunidad internacional a tomar decisiones inmediatas, drásticas, decididas, ambiciosas, integrales y mancomunadas. Desde entonces, los tres Informes Especiales producidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2018, 2019a, 2019b) refuerzan la idea de que limitar el calentamiento a 1.5 °C es necesario para evitar un sin número de impactos negativos. Más aún, el informe sobre calentamiento de 1.5 °C (IPCC, 2018) indica que, para lograr este objetivo, a nivel global debemos alcanzar la carbono neutralidad (producción neta cero de GEI) al año 2050.

Es urgente y necesario tomar acciones e para minimizar los efectos del cambio climático en el ámbito de la mitigación, así como de la adaptación (Petersberg, 2019). Estas acciones deben ser emprendidas a nivel nacional, en el marco de las NDC, pero ahora sincronizadas a nivel supranacional, por ejemplo, a través de la Global Commission on Adaptation of InsuResilience Global Partnership. Claramente estas iniciativas deben incorporar decididamente una línea de financiamiento, donde el tema del cambio climático sea incorporado en los presupuestos nacionales.

Desde un comienzo el IPCC (FAR, 2001) reconoció que la criósfera sería especialmente afectada por el cambio climático con consecuencias multisistémicas que los sucesivos informes han ido confirmando (IPCC 2013, 2019). Por ejemplo, la pérdida de hielo continental en la Antártica se aceleró más de seis veces en las últimas cuatro décadas y es, actualmente, responsable de aproximadamente el 10 % del alza global del nivel de mar (Rignot *et al.,* 2019). Estas pérdidas son particularmente significativas en el sector occidental de la Antártica (ver Figura 1).

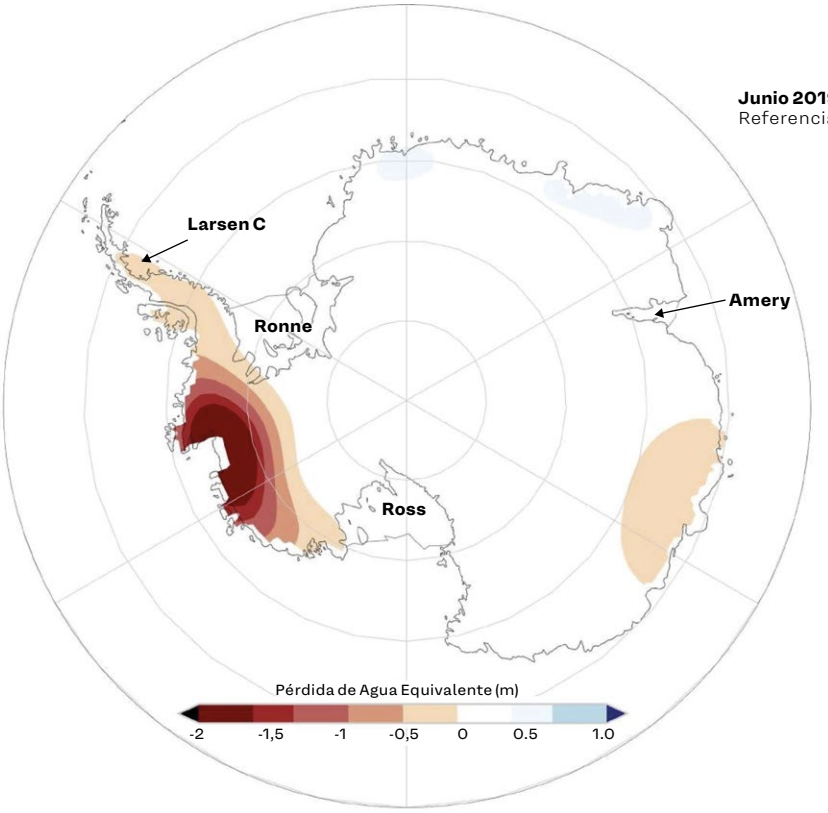

Figura 1. Pérdidas de "Agua Equivalente" (correspondientes al hielo continental) estimadas entre 2002 y 2019 por la misión *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). Las mayores pérdidas se observaron en la Antártica occidental, cerca de la desembocadura en el mar de Amundsen de los enormes glaciares Pine Island y Thwaites. (Adaptada de Cordero *et al*., 2019a).

Excluyendo la Antártica, la mayor parte de la criósfera en el hemisferio sur está en los Andes. Aunque la cordillera abarca más de 7000 kilómetros a lo largo de Sudamérica, la mayor parte de la criósfera andina se encuentra en territorio nacional (Hammond *et al*., 2018). Chile alberga cerca del 80 % de la superficie total de los glaciares de Sudamérica y la mayoría exhibe retrocesos y pérdidas significativas de masa (Figura 2). Tras Groenlandia y Antártica, la mayor contribución a alza de nivel del mar proviene de Alaska, seguido de los glaciares de los Andes del Sur, que pierden alrededor de 34 gigatonelada (Gt) de hielo por año (Zemp *et al.,* 2019). Las pérdidas se aceleraron desde 2010 en Chile Central (26°-45° S) probablemente como consecuencia de la sequía que afecta la zona (Boisier *et al.,* 2018).

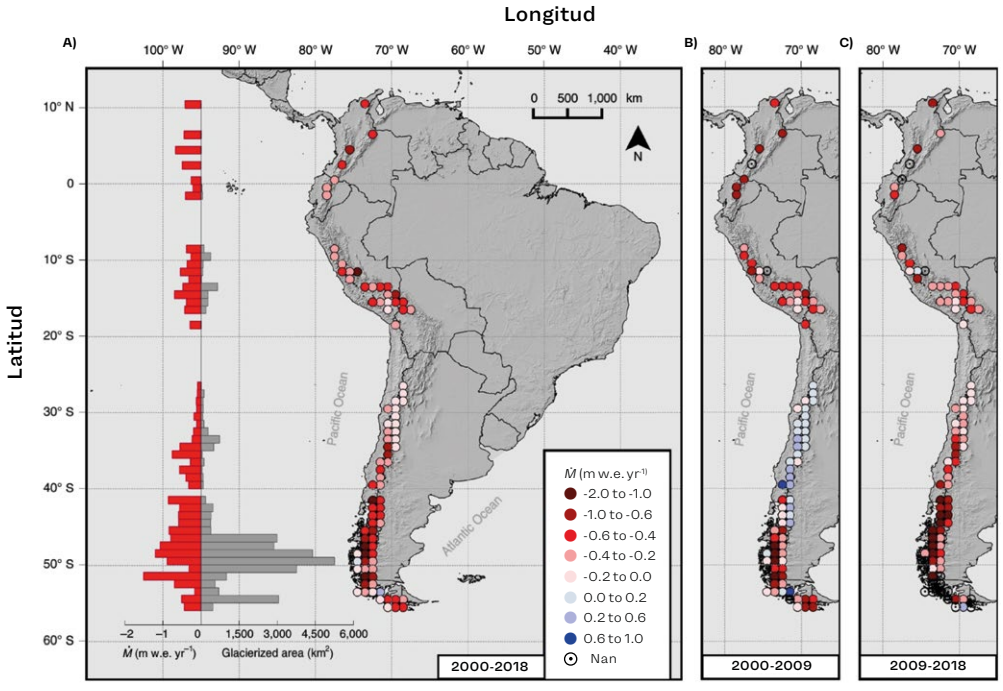

Figura 2. Balance de masa promedio de glaciares en los Andes (promedio de 1° x 1° de latitud y longitud) en tres períodos de tiempo: (A) 2000-18; (B) 2000-09; (C) 2009-18. Los histogramas representan el área con glaciares (barras grises) y la tasa media de cambio de elevación (barras rojas) que corresponde a la pérdida de masa de glaciares ($\dot{M}$) en metros de agua equivalente por año (m w.e.yr^{-1}), en función de la altitud (Adaptado de Dussaillant *et al.*, 2019).

La cobertura de nieve andina también presenta importantes retrocesos. El promedio en la última década de la superficie cubierta de nieve (entre Putre y el volcán Osorno), es alrededor de un 20 % menor que el promedio de la superficie nevada durante las dos décadas precedentes. Esto significa que se han perdido al menos 1200 kilómetros cuadrados de la superficie nevada típica durante el verano entre Putre y el volcán Osorno (Cordero *et al*., 2019b). Estimaciones basadas en información satelital, indican que prácticamente toda la cordillera exhibe una tendencia a la disminución en su superficie nevada (Figura 3). El área cubierta de Nieve está retrocediendo algo más de 10 % por década en la zona central, pero la tendencia es mucho más acentuada hacia el extremo norte del país (Saavedra *et al*., 2017; Cortés & Margulis, 2017; Cordero *et al*, 2019b).

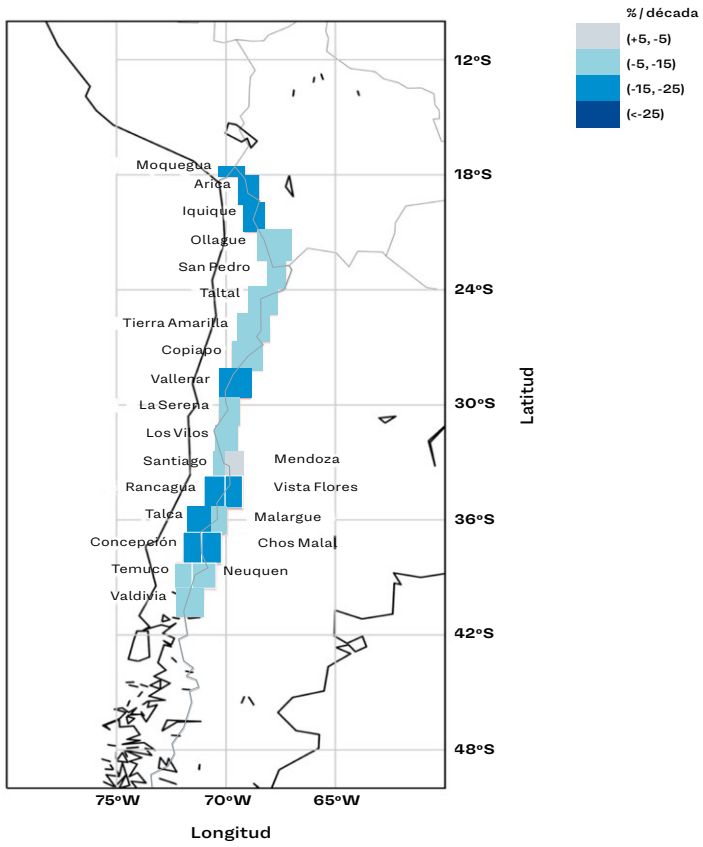

Figura 3. Tendencia de cobertura de nieve. En las últimas 3 décadas, la superficie cubierta de nieve durante la temporada seca en la cordillera de los Andes (entre Putre y el volcán Osorno) exhibe una significativa tendencia a la disminución. Los rectángulos muestran esta tendencia entre un cambio en la cobertura de nieve (incremento y/o reducción) de un 5 % década^{-1} (área gris), una reducción entre 5 % y 15 % década^{-1} (celeste); una reducción entre 15 % y 25% década^{-1} (azul) y una reducción mayor a 25 % década^{-1} (azul oscuro) (Adaptado de Cordero et al., 2019b).

En los últimos años ha cobrado relevancia el estudio de los factores que contribuyen a la disminución del albedo de la criósfera. Factores principalmente relacionados con la abundancia de algas de nieve y con la deposición de impurezas sobre la nieve, esta última, producto de la contaminación atmosférica mediante el carbono negro (hollín) originado en el uso de combustibles fósiles, la quema de biomasa para generar energía térmica, las quemas agrícolas o los incendios forestales (Cereceda-Balic *et al*., 2018).

La nieve pura y blanca refleja la mayor parte de la radiación solar incidente. Al igual que las algas, el carbono negro oscurece la nieve disminuyendo la fracción de radiación solar reflejada e incrementando la radiación solar absorbida. La mayor energía absorbida implica un derretimiento más acelerado, lo que a su vez tiene el potencial de afectar la disponibilidad del recurso hídrico, especialmente en los Andes. Las mayores concentraciones de impurezas y de carbono negro en la nieve de los Andes chilenos se encuentran en zonas cercanas a Santiago (780 μg m^{-2}) y en el extremo norte del país. Los altos valores encontrados en el sur están relacionados a una estación de nieve más larga y a una capa más profunda (hasta 2500 μg m^{-2}) (Rowe *et al*., 2019; Alfonso *et al*., 2019; ver Figura 4).

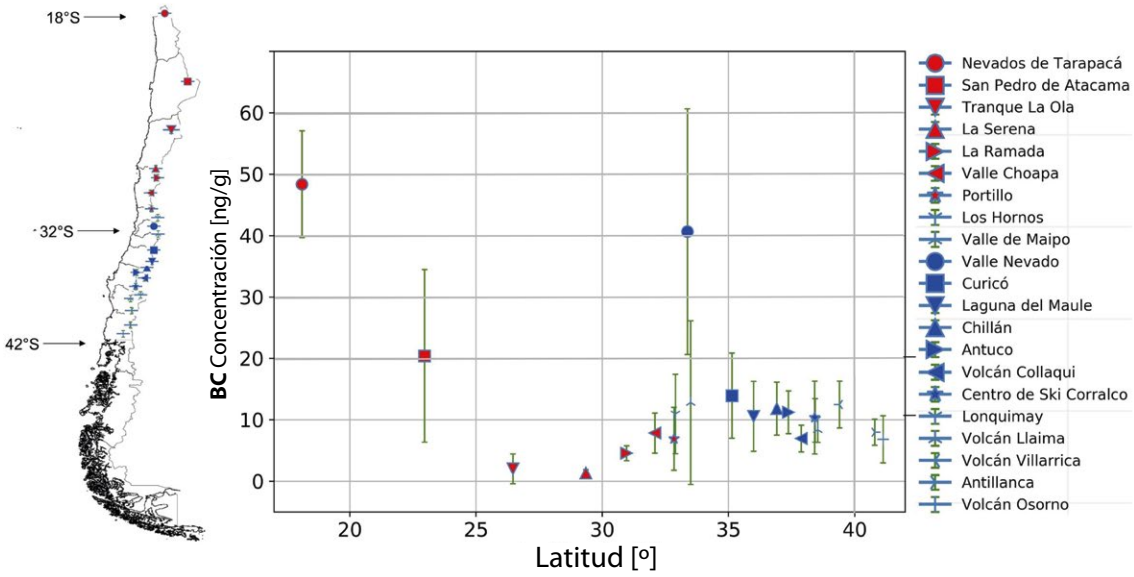

Figura 4. Concentraciones promedio de carbono negro medidas en la nieve de los Andes chilenos. Las barras indican la desviación estándar de las concentraciones medidas en muestras tomadas en los mismos sitios, pero a diferentes profundidades o en diferentes fechas (Adaptado de Rowe *et al*., 2019).

En estudios recientes, realizados en nieve superficial (1 m² y 5 cm de espesor) sobre el área de cerro Colorado (3000 metros sobre el nivel del mar) a 40 km al NE del área de la Región Metropolitana, se han podido medir concentraciones de carbono negro que varían entre 151 a 5987 µg kg^{-1} de nieve, los cuales estarían relacionados con fuentes antropogénicas, tales como el transporte, procesos de fundición, incineración de basura y quema de biomasa y carbón (Cereceda-Balic *et al*, 2012). En este estudio también se midió la concentración de carbono negro en Portillo (2900 metros sobre el nivel del mar), a 84 km al norte de Santiago, paso fronterizo entre Chile y Argentina donde transitan más de 2000 vehículos diarios (aproximadamente 1000 vehículos livianos y 1000 vehículos pesados: buses y camiones de carga diésel), encontrándose valores de concentración de carbono negro que variaron entre 721 a 4230 µg kg^{-1} (Cereceda-Balic *et al*, 2019). Los valores encontrados en Portillo corresponden a la misma magnitud de aquellos encontrados en el glaciar Laohugou N° 12 en el norte del plateau tibetano, en la cordillera del Himalaya (193 a 11040 µg kg^{-1}), lugar donde las fuentes dominantes de emisión de carbono negro también correspondían a combustión de combustibles fósiles (Zhang *et al*., 2017).

Finalmente, estos valores fueron comparados con mediciones realizadas en la nieve superficial de Nevados de Chillán (entre 1500 y 1700 metros sobre el nivel del mar), a 500 km al sur de Santiago, como punto de menor impacto; sin embargo, también se encontraron concentraciones altas de carbono negro, que variaban entre 236 a 4632 µg kg^{-1}, lo cual indicaba que probablemente las fuentes de quema de biomasa cercanas a este sitio de alta montaña también estarían siendo capaces de alcanzar la criósfera andina (Cereceda-Balic *et al*, 2019). Estos valores son muy superiores a los encontrados en las regiones árticas de Canadá y Alaska; en ellas, la concentración promedio fue de 7.9 µg kg^{-1}, donde la quema de biomasa ha sido la principal fuente de carbono negro (Dou & Xiao, 2016), indicando la magnitud del impacto observado en la cordillera de los Andes, producto de la quema de leña.

Sin embargo, la contaminación por carbono negro encontrado en la criósfera andina no puede explicar por sí sola el retroceso de los glaciares, ni la pérdida de cobertura de nieve observada en todos los Andes durante las últimas décadas. Ambos, la pérdida de nieve y el retroceso de glaciares son principalmente consecuencia del alza de la isoterma cero (Carrasco *et al*., 2005) e importantes anomalías de las precipitaciones relacionadas con cambios en modos climáticos de gran escala (como eventos El Niño y el Modo Anular del Sur; Cordero *et al*., 2019b). Tal como se ha verificado en altas latitudes en el hemisferio norte (Niittynen *et al*., 2018), es probable que los cambios en la criósfera andina tengan importantes efectos en la pérdida de biodiversidad.

A la pérdida de biodiversidad y la degradación de varios tipos de ecosistemas asociados a la criósfera andina, que ofrecen servicios esenciales para la población humana, se agrega un uso no sostenible de recursos tales como el agua (IPBES, 2018), que tiene una especial importancia para Chile. Por ejemplo, en los Andes semiáridos, la criósfera contribuye alrededor de 80 % del agua corriente abajo, lo cual sostiene gran parte de las actividades humanas en el sector. Durante los años secos, los glaciares aportan un mayor porcentaje del recurso a los ríos y acuíferos, ayudando a paliar el impacto de las grandes sequías. Sin embargo, es muy probable que, con la disminución de tal reserva, los períodos de sequía empeoren en el futuro.

¿Por qué la criósfera debe ser abordada por la comunidad científica y se debe relevar durante la COP25 y en futuras COP's?

1. Porque la criósfera y los sistemas vinculados son especialmente vulnerables al cambio climático y en el caso de la PA y los glaciares andinos, son ecosistemas complejos claves para Chile y el planeta.
2. Porque tenemos el desafío de entregar datos confiables e información relevante para asumir mejores y fundados compromisos nacionales (NDC).
3. Porque conocer el comportamiento y variabilidad climática de la Antártica es fundamental para comprender los procesos atmosféricos (clima) y oceanográficos (circulación de masas de agua) del hemisferio sur y a nivel global.
4. Porque si se falla en *restringir el calentamiento global promedio a 1.5* °C, la PA y los Andes del sur probablemente sufrirán *cambios dramáticos e irreversibles en sus sistemas glacial, terrestre, oceánico y biológico* (Siegert *et al*., 2019).
5. Porque los ecosistemas terrestres y costeros asociados a la criósfera andina entregan servicios ecosistémicos importantes (*i. e.,* reservas de agua dulce, conservación de ecosistemas, recreación, etc.) que se podrían perder con el cambio climático.
6. Porque la situación geográfica y los cambios que se pronostican para la criósfera abren también perspectivas y oportunidades para innovación científica y tecnológica. Esto, en áreas prioritarias para el país (biodiversidad ecológica y genética, energía, servicios ecosistémicos como agua, alimentos, etc.) y liderazgos en ciencia antártica.
7. Porque es urgente minimizar los impactos antropogénicos locales, regionales y globales sobre la criósfera andina y el océano Austral. Al reducir la contaminación atmosférica (*i. e.,* contaminantes de vida media corta) y oceánica (*i. e.,* plásticos), no solo estaremos protegiendo la cantidad y calidad de agua, sino que la salud de las personas y del medio ambiente.

Situación actual de cambios científicos observados

EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE ALTAS LATITUDES: TELECONEXIONES

El agujero de ozono

Las condiciones climáticas de la Antártica afectan las condiciones del clima en lugares remotos a través de teleconexiones atmosféricas. Por ejemplo, en la zona centro-sur de Chile se ha observado una reducción en las precipitaciones durante las últimas décadas. La tendencia negativa en las precipitaciones en esta región comenzó alrededor de 1980 (más o menos simultáneamente con la detección del agujero de ozono) y se ha observado que es más significativa durante el verano austral (Boisier *et al.*, 2016). Esta tendencia a la baja en las precipitaciones en el centro-sur de Chile estaría asociada a cambios en la circulación atmosférica de escala hemisférica (Figura 5). Estos cambios estarían además influidos por el enfriamiento estratosférico asociado al agujero de ozono sobre la Antártica, que se manifiestan a través de una sostenida tendencia hacia valores positivos en el Modo Anular del Sur (SAM) (Boisier *et al.*, 2018).

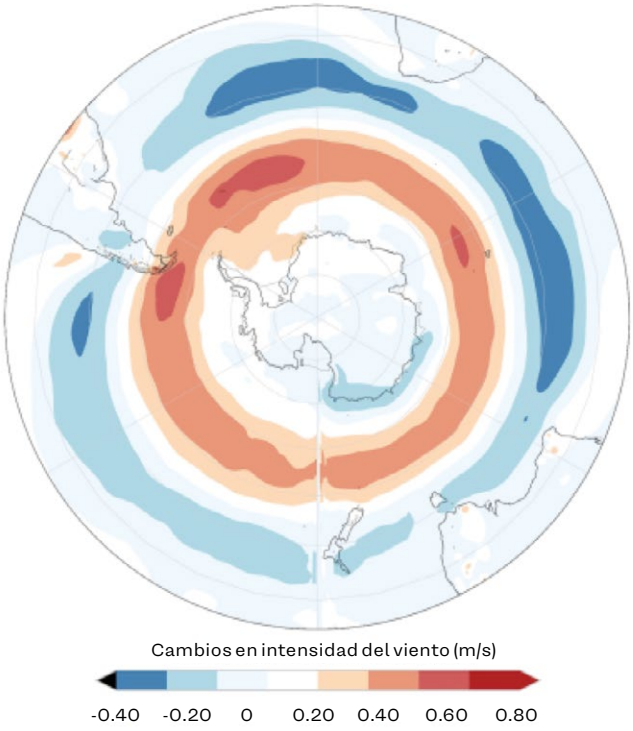

Figura 5. Cambios en intensidad del viento, estimados como la diferencia entre los promedios de los períodos 2000-2019 y 1951-1980. Durante las últimas décadas, se han registrado cambios significativos en los patrones de viento que son particularmente evidentes en el hemisferio sur. Mientras los vientos en torno a la Antártica se han fortalecido, los vientos en latitudes medias se han debilitado. Estos cambios han afectado también la nubosidad y las precipitaciones en buena parte del hemisferio (Adaptado de Cordero *et al.*, 2019a).

Existe un consenso en que la Patagonia Chilena y PA afectan e influencian —a través de teleconexiones atmosféricas e interacciones oceánicas— el clima y la circulación oceánica regional y global. Posteriormente, estas perturbaciones impactan los sistemas naturales (p. ej., recursos hídricos, servicios ecosistémicos, etc.) y sociales (el bienestar humano a través del uso sustentable y responsable de los recursos y servicios). La dinámica en que estos efectos actúan y su proyección (modelos) requiere de más estudios.

El Modo Anular del Sur u Oscilación Antártica

El Modo Anular del Sur (SAM) u Oscilación Antártica (AAO) es un índice climático que se expresa como la diferencia entre los campos de presión a nivel del mar entre las latitudes 40° S - 65° S del hemisferio sur. Debido tanto al alza en la concentración de GEI como a la influencia del agujero de ozono sobre la Antártica (Thompson *et al*., 2011), el SAM presenta desde hace varias décadas una tendencia hacia valores positivos (Thompson *et al*., 2011; Gillett *et al*., 2013; Jones *et al*., 2016). A causa de esta tendencia en el SAM, en la zona más austral de Chile (50° S) los registros de las últimas cuatro décadas indican que el viento zonal (E - O) predominante en la región ha aumentado su intensidad a una tasa de 0.2 a 0.3 m s^{-1} por década (Garreaud *et al*., 2013). Los cambios en la circulación atmosférica asociados a la tendencia en el SAM han provocado no solo un incremento en las precipitaciones en la región al sur de los 50° S (a una tasa de 200 mm por década), sino también una baja en las precipitaciones en la zona centro-sur de Chile. Desde inicios de la década de los 80, la zona centro-sur de Chile ha experimentado una sostenida tendencia a la baja en sus precipitaciones que en algunas localidades alcanza el 7 % por década (Boisier *et al*., 2016). Por otro lado, los registros de precipitaciones (forma líquida) en Punta Arenas desde 1990 (González-Reyes *et al*., 2017) muestran un incremento significativo durante los meses de invierno (junio) y una disminución durante primavera y verano, asociado a un aumento en las temperaturas mínimas del aire (Aravena *et al*., 2002).

Bajo un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero sin políticas de mitigación (llamado escenario del IPCC RCP 8.5), las proyecciones en las condiciones atmosféricas para la región de Magallanes en el 2050 indican que las precipitaciones se incrementarán en alrededor de un 10 % y la temperatura promedio del aire subirá 0.5 °C (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático – versión final). Dada la evolución del SAM hacia valores positivos, este modifica y modificará el funcionamiento de los ecosistemas; por ejemplo, la producción primaria, la exportación de carbono y la composición de organismos marinos como las microalgas y su posterior transferencia a niveles tróficos superiores (Greaves *et al*., 2019).

El SAM genera cambios en los ecosistemas de alta latitud, glaciares y patrones de precipitaciones en altas latitudes.

- Los futuros cambios en las precipitaciones en la zona centro-sur y en el extremo sur de Chile dependen tanto de la variabilidad interanual del SAM como de su tendencia futura. Aunque la variabilidad del SAM está sujeta a la evolución del agujero de ozono sobre la Antártica (Dennison *et al*., 2015), la tendencia del SAM está condicionada por el ritmo de emisiones de GEI (Lim *et al*., 2016).
- La variabilidad interanual tanto de la temperatura como de la precipitación está influenciada por el SAM, que determina en parte la cantidad del intercambio meridional de calor y humedad.
- El SAM también influye en las tendencias de la acumulación de nieve, ya que la precipitación a escala regional está correlacionada positiva o negativamente con el componente del viento zonal en los sectores occidental y oriental de los Andes (Garreaud *et al*., 2013; Bravo *et al*., 2019).
- La fase positiva de SAM también se ha asociado con el incremento de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico occidental (Thomas *et al*., 2017).

LA CRIÓSFERA

Nieve andina

A pesar de la gran variabilidad interanual, la cobertura de nieve andina exhibe retrocesos significativos. Prácticamente toda la cordillera presenta una tendencia a la baja en su superficie nevada (Hammond *et al*., 2018; Saavedra *et al*., 2017). El área cubierta de nieve está retrocediendo algo más de 10 % por década entre Putre y el volcán Osorno (Cordero *et al*., 2019b); pero, este promedio enmascara algunas diferencias regionales interesantes. La tendencia es mucho más acentuada hacia los extremos. Tanto en el norte como en el sur de Chile, la nieve que está retrocediendo casi un 15 % por década (Cordero *et al*., 2019b).

En la zona norte y central de Chile, las disminuciones de la cobertura de nieve promedio están relacionadas con la baja en las precipitaciones asociadas con cambios durante eventos El Niño (Cortés & Margulis, 2017). El Niño corresponde a un alza en la temperatura superficial del océano Pacífico que en general in-

crementa las precipitaciones y la temperatura en el norte y el centro de Chile. Aunque la frecuencia de los eventos El Niño más extremos haya aumentado en décadas recientes, las alzas en la temperatura superficial del mar, que antes se concentraban frente a las costas de Sudamérica (Pacífico oriental), ahora lo hacen en el Pacífico central (Hu *et al*., 2018). Este desplazamiento de El Niño hacia el oeste (Zheng & Yu, 2017), probablemente haya influido en que las precipitaciones durante los eventos El Niño en décadas recientes, hayan sido menores a las registradas durante fines del siglo pasado. Las menores precipitaciones asociadas a los años de El Niño explican a su vez buena parte de la baja en el promedio decadal de la nieve andina en el norte y el centro de Chile (Cordero *et al*., 2019b).

En el sur de Chile, la pérdida de nieve está además influida por cambios en patrones de viento, relacionados tanto con las emisiones de GEI, como con el agujero de ozono sobre la Antártica. En las últimas décadas se ha observado un debilitamiento de los vientos que soplan de oeste a este en el sur de Chile. Este debilitamiento es parte de una anomalía en los patrones de circulación de escala hemisférica relacionada con una persistente tendencia hacia la fase positiva del SAM (Jones *et al*., 2016), que han inducido una tendencia clara hacia la baja en las precipitaciones en el centro-sur de Chile (Boisier *et al*., 2016). Esta zona del país ha perdido más de un 20 % de sus precipitaciones y por lo tanto no es sorpresivo que su cordillera haya perdido también superficie nevada en porcentajes similares (Cordero *et al*., 2019a). Las tendencias negativas en la cobertura de nieve probablemente continúen en el futuro afectando las tasas de deshielo y el suministro de agua, especialmente en el centro y norte del país donde en general, la nieve es la fuente principal de agua (Favier *et al*., 2009).

Glaciares andinos

Chile alberga cerca del 80 % de la superficie total de los glaciares de Sudamérica. El área de glaciares en nuestro país es cercana a 23 000 km^2. De esta superficie, 89.4 % se encuentra en la Patagonia y Tierra del Fuego, 0.8 % en la zona norte y 9.8 % en la zona Centro-Sur (Barcaza *et al*., 2017).

Esto corresponde a valores de número y área de glaciares para la zona de la cordillera de los Andes norte (donde los glaciares ocupan un área de 387 km^2 y evidencian un balance de masa de -0.1 Gt año^{-1}), zona centro (en la cual los glaciares ocupan un área de 1785 km^2, y un balance de masa de -0.6 Gt año^{-1}), zona de la Patagonia norte (donde los glaciares ocupan un área de 1753 km^2, y un balance de masa de -1.0 Gt año^{-1}), Patagonia sur (con glaciares ocupando un área de 21 362 km^2, y un balance de masa de -18.3 Gt año^{-1}) y zona de Tierra del Fuego (con glaciares ocupando un área de 4053 km^2, y un balance de masa de -1.9 Gt año^{-1}) (Figura 6). Actualmente, en Chile se tienen registros de las variaciones frontales históricas para casi 100 glaciares, de los cuales un 87 % ha tenido tasas de retroceso desde pocos metros por año hasta -278 m por año (1945-1986), mientras el 6 % presenta un estado neto de avance (1945-1997), y un 7 % no ha experimentado cambios significativos (Rivera *et al*., 2000; Meier *et al*, 2018). El retroceso en la zona de Chile central ha aumentado en la última década (Dussaillant *et al*., 2019), seguramente influenciado por la disminución de precipitaciones asociada a la llamada "megasequía" (Garreaud *et al*. 2017). Además, se suman al efecto del cambio en el clima global, los impactos locales producidos por el transporte de contaminantes atmosféricos, como carbono negro, desde las grandes ciudades ubicados en las cercanías de los Andes hasta los glaciares de la cordillera. Por otra parte, los impactos directos producidos por la actividad antropogénica en la cordillera de los Andes también generan efectos muy importantes en el cambio en las características fisicoquímicas de la nieve y el hielo, modificando además el albedo y la constante crioscópica del agua, lo que influye directamente en el corrimiento de la cota cero (Cereceda-Balic, *et al*., 2012 y 2019).

En la región sur-austral de la Patagonia, se encuentran los sistemas de Campos de Hielo Norte y Sur, los que han visto reducidas sus masas de hielo de manera considerable (Aniya, 1999; Casassa *et al*., 2002; Rivera *et al*., 2007 Heid & Kääb, 2012; López *et al*., 2010; Willis *et al*., 2012), con una pérdida significativa de las reservas de agua esencial para el país. Destacan en particular los cambios experimentadas por glaciares que terminan en fiordos y lagos donde producen témpanos, algunos de los cuales han colapsado y experimentado pérdidas de masa muy altas (Bown *et al*., 2014, 2019).

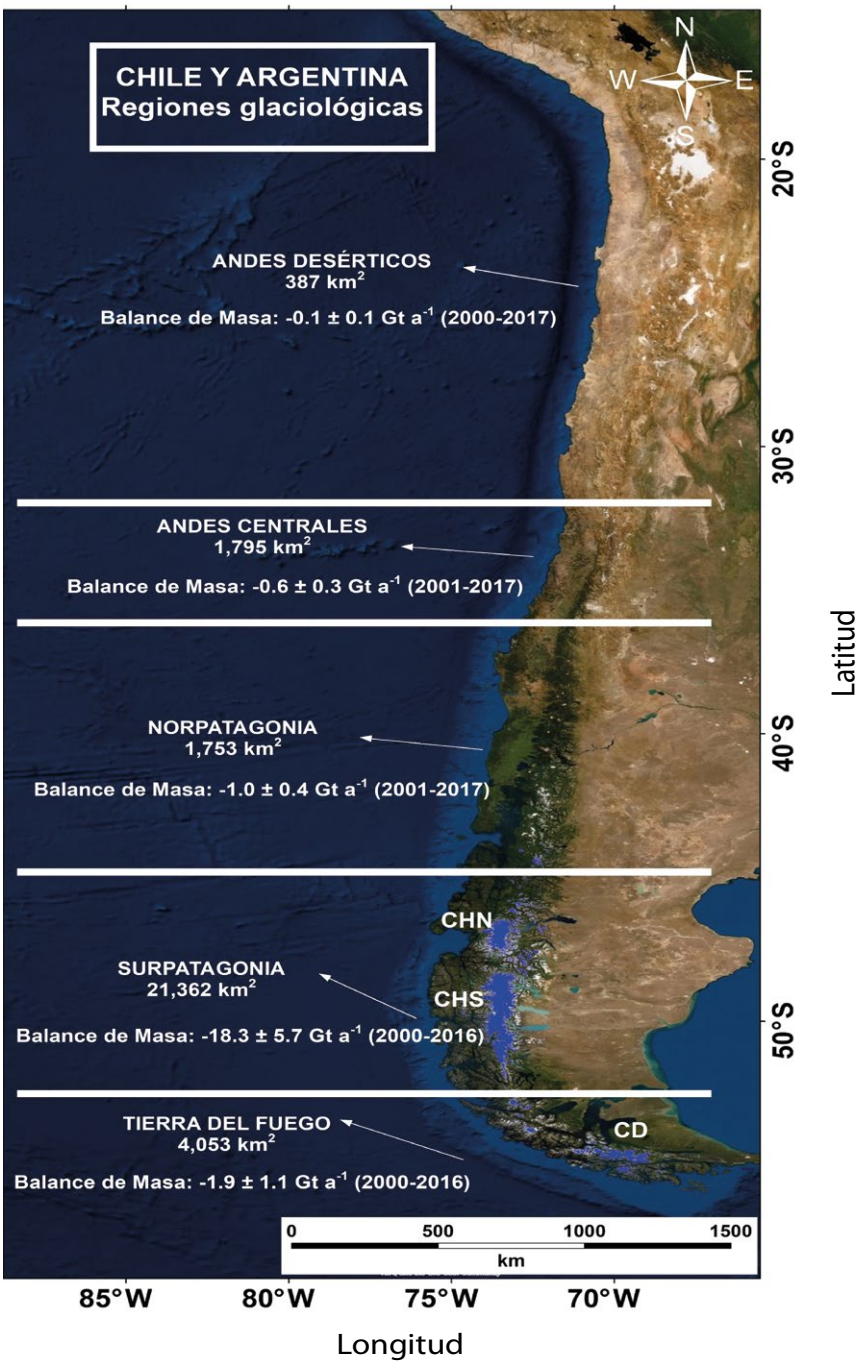

Figura 6. Distribución de áreas y balances de masa de glaciares en los Andes de Chile y Argentina. CHN: Campo de Hielo Norte. CHS: Campo de Hielo Sur. CD: Cordillera Darwin. Preparado por Laboratorio de Glaciología CECs con datos de Dussaillant *et al*. (2019).

Se ha estimado que el derretimiento anual del Campo de Hielo Sur y Campo de Hielo Norte suma aproximadamente entre 28 y 38 km^3 de agua dulce al año, equivalente a un aumento del nivel del mar entre 0.078 y 0.105 mm anuales (Chen *et al*., 2007; Rignot *et al*., 2003). Por lo tanto, dependiendo de los modelos y escenarios, el aporte de los Andes Patagónicos podría causar un aumento del nivel del mar entre 4 mm (Zemp *et al*., 2019a) hasta 14.4 mm (Shannon *et al*., 2019), convirtiéndolo en uno de los lugares más impactados por el

cambio climático dentro de todas las regiones subpolares (Huss & Hock, 2018). Desde 1960, los glaciares del planeta han perdido más de 9000 Gt de hielo, lo que es equivalente a un cubo de hielo de la superficie de Chile de 16 m de alto o de uno de la superficie de España de 20 m de alto (Zemp *et al*., 2019b) (Figura 7).

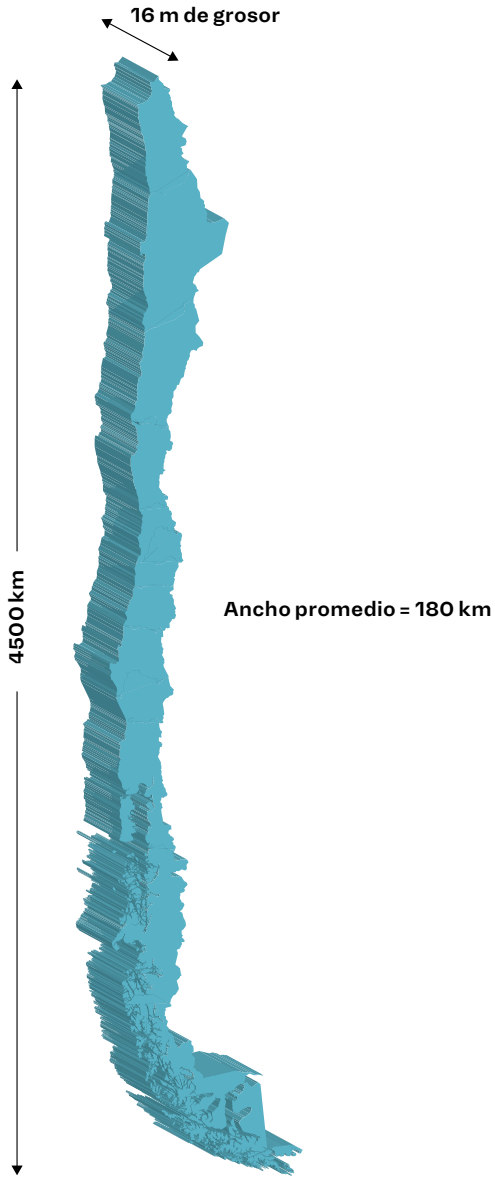

Figura 7. Representación de la pérdida global de hielo de glaciares en los últimos 70 años. Los glaciares han perdido globalmente más de 9 000 Gt de hielo desde 1960 (1 Gt = 10^{12} kg = 10^{9} m^3 de agua), lo que corresponde a una superficie de hielo equivalente a la de Chile continental, con un grosor de 16 m de alto, o a la superficie de España con 20 m de alto; lo cual ha elevado el nivel del océano en 27 mm de acuerdo con el World Glacier Monitoring System (Zemp et al., 2019b).

Existen muy pocas series de tiempo con largas observaciones de balance de masa (Rivera *et al*., 2016). Para el glaciar Echaurren Norte (cuenca del Maipo), se ha registrado su área desde 1955 (0.5 km^2), con una tendencia continua de pérdida de masa hasta 1980; sin embargo, la pérdida se hizo más evidente a partir de 2009, donde la proyección sugiere que el glaciar va a desaparecer hacia la mitad de siglo (2050) (Figura 8). Otros glaciares de los Andes húmedos (región de Los Lagos) también muestran notorios retrocesos. Es importante estudiar la dinámica de pérdida de masa de glaciares en los Andes y los modelos que proyectan su evolución, especialmente en la zona central de Chile (donde vive la mayor parte de la población y los reque-

rimientos son mayores), así como en la zona sur-patagónica; en la cual, las futuras pérdidas de masa tendrán un efecto más evidente en el incremento del nivel del mar. Mediante el uso de serie de tiempo de modelos de elevación digital (ASTER), se estimó una pérdida para la cordillera de los Andes de 22.9 Gt año^{-1}, con las mayores pérdidas de masa en la Patagonia (Dussaillant *et al.*, 2019).

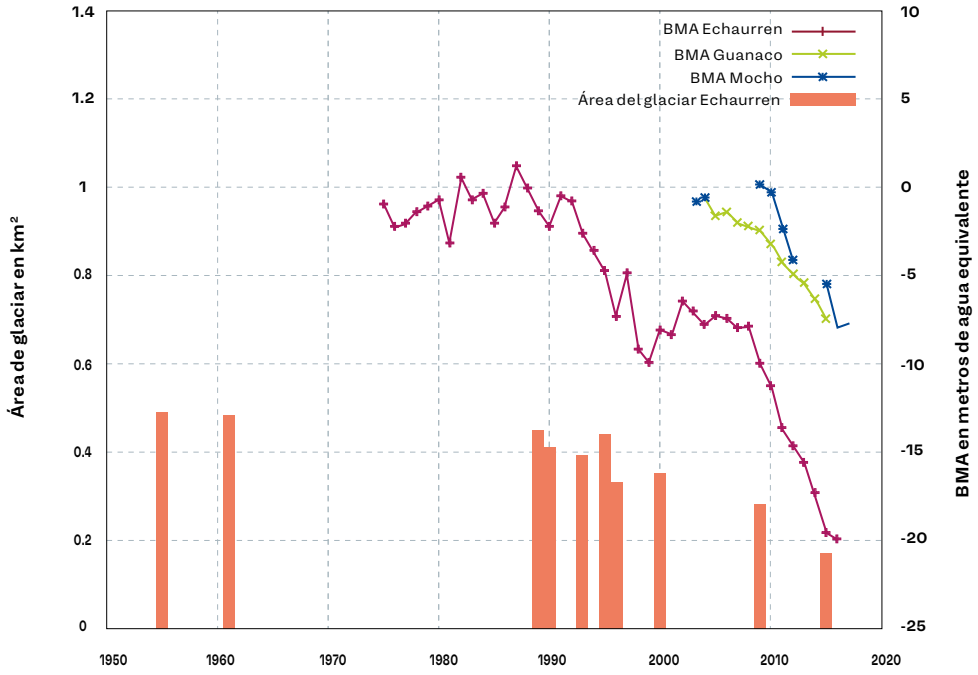

Figura 8. Cambios temporales en las áreas del glaciar Echaurren (barras naranjas) y balance de masa acumulativo (BMA) de los glaciares Echaurren, Guanaco y Mocho (líneas morada, verde y azul; datos del World Glacier Monitoring Service). Modificado de Farías-Barahona *et al.*, 2019.

En escenarios de aumento de la temperatura del planeta de ~2 °C (Acuerdo de París) y la tendencia actual de ~4 °C, hacia fines de 2100 (Hannesdóttir, *com. pers.* usando el modelo GlacierMIP) la criósfera del sur de la cordillera de los Andes podría perder entre un 20 % y 40 % de su masa. La pérdida de masa glacial conlleva impactos en (a) la subida del nivel del mar; (b) cambios en la biodiversidad y servicios ecosistémicos; (c) impacto en el sector productivo (acuicultura, hidroelectricidad, alimentación, potabilización, turismo, pesquerías), entre otros. Por ejemplo, los glaciares aportan nutrientes (NO_3, Fe, etc.), fertilizando y manteniendo una productividad basada en la fotosíntesis y la formación de materia orgánica que estimula la exportación de carbono desde la atmósfera al océano profundo (Hopwood *et al.*, 2019). En el sistema de fiordos Nord-Patagónicos, la pérdida de masa de glaciares ha sido relacionada a la proliferación de algas nocivas (León-Muñoz *et al.*, 2018), además de alteraciones en la productividad con grandes impactos negativos en aspectos ecológicos y socioeconómicos (Meire *et al.*, 2017).

Criósfera antártica

La pérdida de hielo continental en la Antártica se aceleró más de 6 veces en las últimas 4 décadas (Rignot *et al.*, 2019). Estas pérdidas son particularmente significativas en el sector occidental de la Antártica (Figura 9).

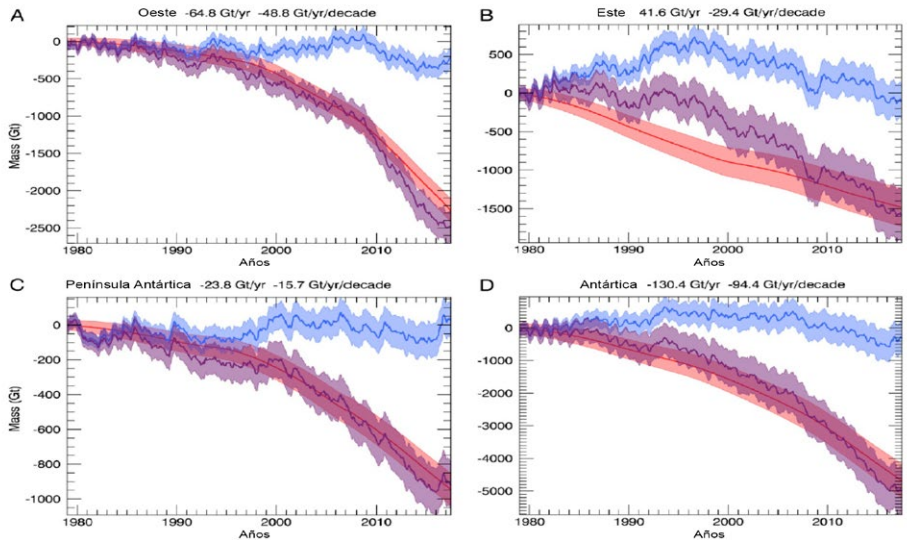

Figura 9. Balance de masa superficial (línea azul), descarga de hielo (rojo) y masa total (púrpura) para la Antártica oeste (A), este (B), península Antártica (C) y Antártica completa (D). La pérdida de masa promedio es en billones de toneladas por año (Extraído de Rignot *et al*., 2019).

El adelgazamiento de las cuencas de los glaciares de Pine Island y Thwaites llega hasta 122 m, su tasa de pérdida de masa es cerca de cinco veces mayor que hace veinte años. Al comparar la variabilidad en las elevaciones de nieve y hielo de las regiones del este y oeste antárticos, se estimó una contribución de estas áreas en -1.1 y +5.7 mm al nivel promedio entre 1992 y 2017 (Shepherd *et al.,* 2019). Es probable que el calentamiento provoque un aumento de las precipitaciones en promedio en la Antártica (Bracegirdle *et al*., 2008; Frieler *et al*., 2015). Sin embargo, los modelos difieren ampliamente en sus proyecciones de la tasa de precipitación sobre el continente helado.

La PA se perfila como una de las regiones más sensibles al cambio climático con evidentes impactos a los ecosistemas que alberga. La parte norte de esta región se encuentra ubicada en la zona del cinturón de los vientos del oeste; cuya intensificación y desplazamiento hacia el sur responde al aumento de la concentración de los GEI. La zona oeste de la Antártica, en el futuro, requiere de estudios glaciológicos por su gran inestabilidad dinámica y posible colapso, con el consecuente aumento del nivel del mar de hasta seis metros. El calentamiento del oeste de la PA durante la segunda mitad del siglo XX significó una pérdida entre 48 y 76 km^3 $año^{-1}$ de su cobertura de hielo con una posible contribución al incremento en el nivel del mar en ~ 0.16 mm $año^{-1}$ (Rignot & Thomas 2002).

SISTEMAS MARINOS ANTÁRTICOS (OCEÁNICOS Y COSTEROS), CON ÉNFASIS EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Calentamiento local y regional

En la PA, el calentamiento ha sobrepasado los 1.5 °C (Turner *et al*., 2005), llegando a un calentamiento de 7 °C en los últimos 50 años (Ducklow *et al*., 2013). Esto ha contribuido al retroceso de glaciares y, en conjunto con el calentamiento del mar, al colapso de numerosas plataformas de hielo flotante, lo que ha producido un aumento en el flujo de hielo continental al mar, contribuyendo así al incremento de su nivel. Además, el alza de temperatura en el océano Austral ha causado cambios en la estructura de las comunidades de la columna de agua y la colonización de nuevos espacios por especies del fondo (bentos). Además, procesos interconectados entre el océano y la atmósfera han contribuido al calentamiento de la PA (Turner *et al*., 2016). Aunque estos cambios pueden ser medidos (Figura 10), sus impactos permanecen aún poco comprendidos, existiendo mucha incertidumbre y brechas en su conocimiento.

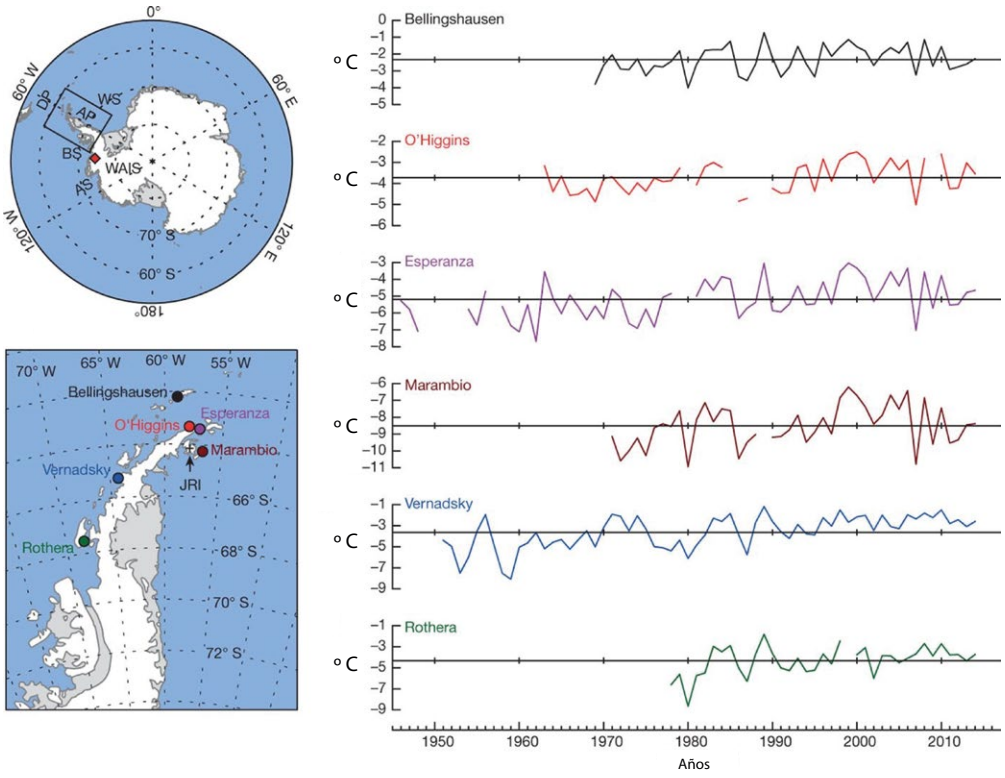

Figura 10. Temperatura superficial del aire (TSA) medida en diversas estaciones a lo largo de la península Antártica. El mayor cambio se observa en la base Vernadsky (antigua Faraday), con un incremento de 2.8 °C, entre 1951 y 2000 (Extraído de Turner *et al*., 2016).

En cuencas costeras, el mayor derretimiento de glaciares genera un aumento en la estratificación de la columna de agua y un mayor ingreso de micronutrientes (hierro), lo que propicia el desarrollo de comunidades de microalgas (Höfer *et al*., 2019). Sin embargo, se ha observado que en años donde existe una menor extensión de hielo marino en la Antártica (años más cálidos), se genera una disrupción en el ciclo de desarrollo del krill (pieza fundamental en la trama trófica de la Antártica), lo que genera un bajo reclutamiento larval de esta especie y, por ende, disminución en su biomasa en el futuro (Piñones & Federov, 2016). Modelos de clima y ecosistemas acoplados indican que la biomasa global de animales marinos (especialmente, los niveles tróficos superiores), disminuirá en función del incremento de temperatura y disminución de la productividad, en todos los escenarios de emisiones propuestos por el IPCC (Lotze *et al*., 2019). Dado que existe una moratoria para intervenir el océano y la atmósfera (en la llamada geoingeniería del planeta, ver Boyd & Vivian, 2019), se debería proteger a las especies clave y grupos funcionales (p. ej., diatomeas, krill, ballenas), que exportan carbono al fondo del océano en forma natural.

Acidificación del océano en sistemas de altas latitudes

La entrada de CO_2 desde la atmósfera reduce el pH del agua superficial y la concentración de ion carbonato en sistemas como fiordos y canales patagónicos, SANT y PA, los que son particularmente vulnerables por la menor temperatura y salinidad de sus aguas (la menor temperatura del agua permite una mayor solubilidad de CO_2). El aumento de CO_2 disuelto disminuye la capacidad de crecimiento de los choritos (*Mytilus chilensis*), con pérdidas entre 12 % a 25 % de su inversión en biomasa corporal (Navarro *et al*., 2013), lo que implica consecuencias potencialmente negativas para la industria acuícola y al ecosistema. La entrada de agua dulce disminuye la capacidad química del mar para regular los cambios de acidez (capacidad amortiguadora), lo que hace particularmente vulnerables a la acidificación a los estuarios y otros sistemas mesohalinos. Un ejemplo de ello es el seno Skyring (el mayor sistema mesohalino del hemisferio sur, localizado en la región de Magallanes), cuya salinidad ha disminuido desde 22 a 17 psu en el período 1909 - 2016, mientras que en dicho período el CO_2 atmosférico ha aumentado desde 267 a 400 ppm. Hoy las aguas del seno Skyring son corrosivas para el carbonato de calcio a diferencia de lo que probable fue 100 a 200 años atrás (Killian *et al*.,

2007; R. Torres, *comun. pers.*), lo que puede haber profundizado el estrato superior del fitoplancton (Ríos *et al.,* 2016). Por otro lado, algunas especies como el ostión patagónico han demostrado una limitada tolerancia térmica a valores superiores a los registrados naturalmente en sus áreas de distribución en la Patagonia sur (5 a 10 °C). Esto los pondrían en situación de riesgo con aumentos de temperatura de solo 2 °C, proyectados para fines del siglo XXI ante un escenario RCP8.5 (IPCC, Bozzeda *et al.*, datos no publicados). Contrariamente, otros recursos pesqueros, como el caracol trofón y el erizo rojo han evidenciado potencial de alta resiliencia a los posibles cambios en el efecto combinado de incrementos de temperatura y disminución de salinidad en la región de Magallanes (J. Navarro, C. Dutree, datos no publicados). Esta evidencia apoya la necesidad de implantar estrategias para incrementar la conservación y creación de áreas protegidas de manejo en la región de Magallanes.

Funcionamiento de las bombas físicas y biológicas de carbono en el océano Austral

En la región de borde entre las zonas SANT y PA (55° a 68° S), se produce la subducción (hundimiento) de agua muy densa (por ser fría y salina), y que contiene una alta concentración de CO_2 disuelto. Este proceso natural, que se conoce como la "Bomba física o de solubilidad de carbono", transporta este carbono hacia el océano profundo, "secuestrándolo" y sacándolo de la atmósfera por algunas décadas hasta centurias/milenios, según sea la profundidad (desde cientos hasta miles de metros).

Un calentamiento del agua en esta zona disminuiría la eficacia de esta "Bomba física secuestradora de carbono atmosférico", no obstante que el calentamiento de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) pudiese ser más lenta que en el resto del mundo (Amour *et al*., 2016). Este calentamiento localizado del océano Austral, además de su efecto sobre la criósfera, afectará la biodiversidad generando especies ganadoras/perdedoras, donde una especie clave como el krill aparece como vulnerable y afectando además a todos los niveles tróficos superiores que depende de él (Morley *et al*., 2019).

La exportación de carbono orgánico mediado por animales se conoce como "Bomba biológica de carbono". Este proceso corresponde al flujo vertical de partículas orgánicas (formadas durante la fotosíntesis a partir de CO_2), a zonas profundas donde queda secuestrado por décadas o centurias. Esta forma de exportar está liderada por grupos funcionales del plancton que usan CO_2 para sus procesos fotosintéticos (p. ej., diatomeas), o los que consumen esta materia orgánica y producen pellets fecales que se exportan al océano profundo (p. ej., krill) (Figura 11 A, B). Por lo que es relevante la protección de las áreas donde estos grupos se concentren por razones biológicas o físicas actuando como exportadores de carbono.

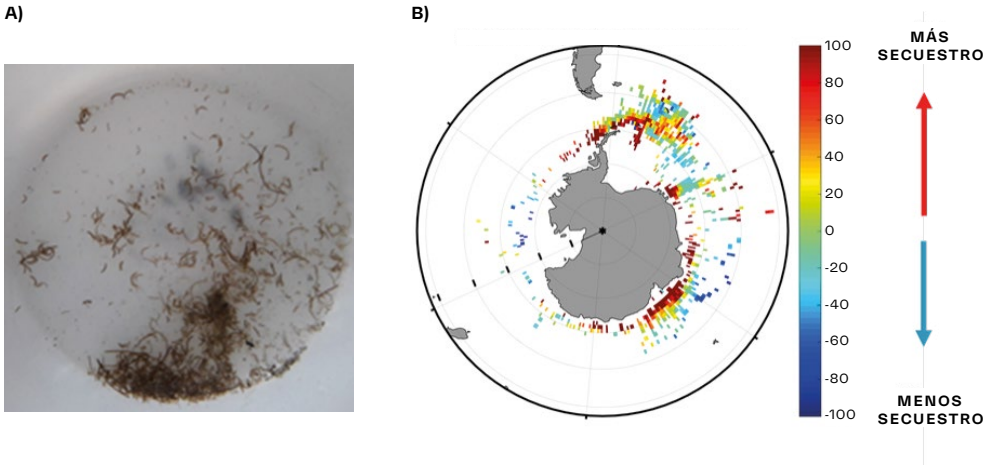

Figura 11. Dominancia de pellets fecales de krill en el secuestro de carbono de la Antártica y la posible reducción de este flujo debido al cambio climático. (A) Pellet fecales de krill dominan en una muestra de trampa de sedimento instalada en bahía Sur en la Antártica (Estación científica Yelcho del Instituto Antártico Chileno, INACh), durante febrero de 2018 (Foto: H. González). (B) Cambio en el flujo de carbono exportado como pellets fecales de krill (*Euphausia superba*) a 1000 m de profundidad alrededor de Antártica a fin de siglo, ante un escenario SSP3 7.0. (A. Piñones, datos no publicados).

Brechas en la investigación científica

INVESTIGACIÓN SOBRE LA CONTRIBUCIÓN HÍDRICA DE GLACIARES

Estudios publicados recientemente sugieren que el derretimiento de hielo glacial puede aportar hasta dos tercios del volumen de agua de verano (EFM) en ríos de Chile central durante años secos (*v.g.*, Ayala *et al*., 2019; Ohlanders *et al*., 2013). No obstante, existen pocas series de datos observados directamente en las cercanías de frentes de glaciares, y las estimaciones están sujetas a distintas fuentes de incertidumbre.

1. Generar acciones para sistematizar el conocimiento local sobre el estado de los glaciares y propiciar instancias formales, bien estructuradas de participación de las comunidades y agrupaciones que viven o que trabajan vinculados a los glaciares, con el fin de impulsar la creación de la ley marco del cambio climático y la ley proglaciares.
2. Incentivar la investigación sobre la contribución de glaciares a los caudales de los ríos. Por ejemplo, se sabe el espesor y el área de hielo en algunos glaciares de Chile, por lo que hay estimaciones generales de los volúmenes equivalentes de agua allí almacenados; sin embargo, no se sabe cuándo los glaciares llegarán a su derretimiento máximo (*peakflow*) y cuál será (en el largo plazo) la contribución (cada vez menor) del glaciar a los caudales, los que disminuyen drásticamente.
3. Fomentar la investigación de los posibles impactos de la entrada de agua dulce (desalinización) y sus componentes disueltos (materia orgánica e inorgánica) y particulados (minerales, arcillas, etc.) sobre los sistemas costeros en general y las respuestas de los organismos en particular. Esto permitirá reducir las incertidumbres sobre el incremento del nivel del mar en la costa chilena y los posibles efectos que habrá sobre el borde costero y la diversidad marina. Este conocimiento es además esencial para pronosticar los efectos sobre recursos marinos costeros y las comunidades artesanales a lo largo del país y proponer medidas de manejo sustentable.
4. Fomentar la investigación de la topografía subglacial en los glaciares a lo largo de los Andes, al igual que la adquisición de datos de caudales de origen glacial y los espesores del hielo. Esta es una de las brechas importantes de conocimiento criosférico y debe ser solventada para poder estimar posibles riesgos futuros asociados a la formación, por ejemplo, de lagos en zonas abandonadas por el hielo en retroceso.
5. Fortalecer los estudios biológicos de los organismos de estas regiones con el propósito de predecir las pérdidas de diversidad, el ingreso de especies invasoras y en general la capacidad de recuperación de los ecosistemas más vulnerables. En PA y SANT, los organismos marinos están fuertemente adaptados a bajas temperaturas y a las dinámicas estacionales derivadas de su estrecho vínculo con la criósfera. Conocer cómo estas especies se adaptarán o no a las nuevas condiciones ambientales en los escenarios de cambio climático es fundamental para pronosticar el estatus que tendrá la biodiversidad y el acervo genético en estos ecosistemas en el futuro.
6. Desarrollar nuevos y mejores modelos hidrológicos en cuencas nivoglaciares que consideren las variables ambientales que están afectando actualmente la capacidad de los glaciares de acumular nieve y hielo durante el inverno, en escenarios cada vez más críticos de cambio climático. Esto permitirá realizar pronósticos más confiables facilitando la gestión del recurso hídrico para sus diferentes usos consuntivos y no consuntivos.

INVESTIGACIÓN EN GLACIARES ROCOSOS

Los glaciares rocosos representan el 64 % de todos los glaciares (en número) encontrados en el norte de Chile (Segovia & Videla, 2017); varios autores han propuesto que esta abundancia en la zona los convierte en importantes fuentes de agua (Brenning 2005; Azócar & Brenning 2010), aunque es una opinión cuestionada (Arenson & Jacob, 2010). Una revisión reciente de Schaffer *et al.* (2019) integró los estudios existentes de la hidrología de los glaciares de roca con mediciones de flujo no publicadas previamente, para calcular la escorrentía de los glaciares de roca durante el verano en la cuenca del río Elqui (30° S), estimando que los glaciares de roca probablemente contribuyeron entre el 9 % y el 20 % del flujo total de la corriente. Esto es menor que la suministrada por los glaciares (de hielo), pero mucho más de lo que han sugerido algunos autores. Por ello se requiere realizar investigación que responda a las siguientes acciones:

1. Cuantificar el volumen de agua guardada en los glaciares rocosos y evaluar sus cambios temporales.
2. Determinar la conexión entre clima y glaciares rocosos, incluyendo cambios de la cantidad de hielo, cambios entre estado (es decir, glaciar blanco, a glaciar rocoso activo y a glaciar rocoso inactivo).
3. Desarrollar y validar métodos para medir y estimar la contribución hídrica de glaciares rocosos.
4. Fomentar estudios directos de evaluación del papel hidrológico de los glaciares rocosos y su posible evolución ante escenarios de cambio climático.
5. Aumentar el número de programas de monitoreo sistemático de glaciares y glaciares rocosos. Para ello, hay que establecer redes de estaciones meteorológicas, de medición de caudales, medición de balance de masa, balance de energía de monitoreo de polvo sedimentables, análisis isotópico, cámaras fotográficas, etc., en glaciares representativos por cuencas. La Dirección General de Aguas (DGA) tiene programas de monitoreo en casi todas las macro-regiones, pero estos programas requieren la construcción de infraestructura adecuada para los operadores y deberían ser complementados con sensores remotos de alta resolución y contar con transmisión de datos en tiempo real y con sistemas inteligentes de alerta.
6. Implementar redes de monitoreo con transmisión en línea que permitan calibrar mediciones con sensores remotos satelitales en la Antártica. Además de facilidades para mantener actividad científica todo el año y estaciones móviles para realizar expediciones de largo alcance en el casquete de hielo.

INVESTIGACIÓN EN GASES DE EFECTO INVERNADERO

Estimaciones recientes indican que las macroalgas podrían secuestrar cerca de 173 TgC por año (Krause-Jensen & Duarte 2016). Si se considera que las costas de PA y SANT albergan una alta abundancia y diversidad de este tipo de organismos, su impacto biológico podría ser relevante. Por lo tanto, las acciones propuestas son:

1. Profundizar la compresión del comportamiento de sumidero y fuente de CO_2 de la PA y de la biota asociada a zonas de glaciares, y explorar el rol de los productores primarios de las zonas asociadas a la criósfera, principalmente el fitoplancton y las macroalgas marinas, como sumideros de CO_2.
2. Desarrollar y mejorar equipos tecnológicos automáticos que permitan cubrir grandes áreas para la adquisición de datos como el "saildrone" (Meinig *et al.*, 2019).
3. Fomentar la investigación del impacto de los contaminantes climáticos de vida media-corta sobre la criósfera andina, lo que afecta las características fisicoquímicas de la nieve y el hielo, tanto albedo como bioalbedo, cambio en la constante crioscópica que genera un aceleramiento del retroceso glaciar, que además afecta negativamente la calidad química del agua que estos glaciares entregan a la cuenca.

INVESTIGACIONES EN OTRAS ÁREAS

Existen una serie de otras áreas en las que hay brechas de investigación y conocimiento que desarrollar, por ejemplo:

1. Establecer el carácter de "emergencia climática" para poder abordar los problemas planteados anteriormente, poniendo énfasis especial en la implementación de un programa de monitoreo de largo plazo de parámetros oceanográficos, meteorológicos, hidrológicos, de carácter basal.

2. Desarrollar un plan de ordenamiento territorial en el cual se puedan identificar los riesgos para las regiones subantártica y antártica.
3. Desarrollar planes de bioseguridad, debido al carácter insular de las regiones analizadas.
4. Desarrollar programas educativos multisectoriales y regionales, que sean aplicables a todos los niveles de la sociedad civil.
5. Desarrollar programas de capacitación en temas de cambio climático dirigidos especialmente a funcionarios públicos y tomadores de decisiones.
6. Monitorear el comportamiento de glaciares desprendentes y su interacción con el océano o lagunas proglaciares.
7. Desarrollar un programa de monitoreo y protección de áreas recientemente descubiertas de hielo, por ser zonas frágiles o vulnerables ya que ocurren procesos de sucesión ecológicas interrumpidos o dañados por acción antrópica y especies invasoras.
8. Desarrollar proyecciones confiables para los glaciares de cuencas relevantes (p. ej., cuenca del Maipo, Aconcagua, Valle de Elqui).
9. Avanzar en estudios (y posterior modelación) del acoplamiento entre el océano, la criósfera y la atmósfera.

Actualización de las NDC de Chile: Brechas y recomendaciones

MITIGACIÓN

Brechas

Los esfuerzos de mitigación han sido orientados principalmente a reducir las emisiones de GEI y, secundariamente, a estimular la capacidad de secuestro de los océanos. En este sentido, el objetivo de la mitigación ha sido evitar una interferencia importante de la humanidad con el sistema climático global y tratar de estabilizar la emisión de GEI a una escala de tiempo suficiente que permita que los ecosistemas puedan adaptarse naturalmente, de forma de que no se ponga en riesgo la producción de alimentos y se pueda acceder a un desarrollo económico en una forma sustentable (IPCC 2014, Report on Mitigation of Climate Change).

La principal medida para mitigar el impacto del cambio climático sobre la criósfera y la Antártica es la disminución drástica de las emisiones de CO_2 y las formas más dañinas de hollín como carbono negro y contaminantes atmosféricos. En la SANT y ANT existen especies clave que mantienen la productividad, la estructura del ecosistema y realizan una mitigación al exportar CO_2 al fondo del océano en lo que se conoce como Bomba Biológica de Carbono (BBC). Tanto las ballenas como el krill antártico realizan esta labor, siendo la BBC uno de los procesos más importantes del planeta (Turner, 2015), cuya función, de no existir, incrementaría en ~50 % los niveles actuales de CO_2 (Parekh *et al*., 2006). Además, el repoblamiento y cultivo de macroalgas nativas representan un esfuerzo importante en orden a aumentar las áreas para secuestro de CO_2 (mitigación).

Los sistemas marinos y en particular las áreas de subducción de masas de agua en sistemas de altas latitudes (formación de masas de agua profundas, ricas en CO_2), son áreas de almacenamiento y exportación de carbono que requieren ser protegidas. Las fuentes y el destino final del carbono en los sistemas de circulación de gran escala y en los sedimentos superficiales y profundos (carbono "azul" y "negro"), requieren de más estudios para entender su dinámica, destino y rol en los ciclos biogeoquímicos. Las superficies de nieve antárticas están, probablemente, entre las más limpias y reflectivas del planeta, propiedades que podrían ser afectadas debido a la depositación de partículas de carbono negro, consecuencia del uso de combustibles fósiles.

La mayoría de los GEI como el CO_2 (5 a 200 años o más) y NO (114 años o más), poseen vidas medias que varían entre años, siglos o más, dependiendo de la eficacia de los procesos de eliminación de la atmósfera (Seinfeld & Pandis, 2006; EPA, 2012); sin embargo, otro grupo de contaminantes tienen tiempos promedio de residencia más cortos, pero con iguales o incluso mayores efectos sobre el cambio climático. Los contaminantes de vida media corta (CVMC) residen en la atmósfera durante un período de tiempo que varía entre días y semanas a algunos años (Vallero, 2008). Entre los principales CVMC, se encuentran los aerosoles donde destacan el material particulado fino (MPF) y el carbono negro (con tiempos de vida media entre horas, días hasta 1 semana, según las condiciones atmosféricas), CH_4, O_3 troposférico y algunos HFC. El IPCC (2001) estimó que, en conjunto los CVMC son responsables de más del 30 % del calentamiento climático global, aunque otros estudios calculan que ese porcentaje sería aún mayor, entre el 40 % y 45 % (IGSD, 2015).

La diferenciación entre estos dos tipos de agentes climáticos permite focalizar los esfuerzos adicionales en aquellos CVMC, que no solo tienen un impacto sobre el forzamiento radiativo del planeta, sino que además generan efectos directos sobre la salud de la población. Su mitigación, por lo tanto, presenta una oportunidad para poder implementar políticas públicas que tengan impactos directos y de corto plazo, debido a la corta vida media de estos contaminantes, además de que estos efectos positivos se podrían ver a nivel local o regional, y permiten involucrar a la población de manera más activa en esta tarea, generando un doble beneficio, ambiental y en salud (Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. Chapter 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects [IPCC]).

Recomendaciones

Algunas formas de mitigar los efectos de un incremento de GEI en los sistemas de borde costero son:

1. Potenciar la BBC protegiendo a los grupos funcionales más activos en la exportación de carbono orgánico particulado (COP), a través de la clásica cadena trófica antártica: fitoplancton - krill - ballena. Como ejemplo, el krill ha sido reportado como uno de los grupos importantes en la exportación de COP hacia el océano profundo, contribuyendo con ~65 % - 85 % del flujo total de COP, en regiones como la PA y las islas Orcadas del Sur (Wefer *et al*., 1988; Belcher *et al*., 2017, 2019).
2. Generar políticas de Estado eficientes para evitar la deposición de carbono negro (hollín) o de material particulado sobre glaciares (ver NDC, vinculada a programa de descontaminación).
3. Promover la descarbonización de la matriz energética.
4. Promover el reemplazo de quema de biomasa o combustibles fósiles para calefacción por energías limpias en todo el país (*i.e*., bombas de calor, eólica, solar, mareomotriz, undimotriz, geotérmica, etc.). Por ejemplo, localidades cercanas a este tipo de fuente geotérmica (*i.e.,* Pucón, Coyhaique, entre otros), con el fin de cambiar el uso de la leña hacia otra forma de energía.
5. Evaluar la eliminación, o minimización, de actividades de la industria privada/pública que consideren la remoción o resuspensión de polvo o carbón, cuyo material particulado sedimentable sea transportado por el viento hasta sistemas de glaciares subantárticos (Andes) y antárticos (p. ej., explotación de carboneras de isla Riesco y minas a tajo abierto de los Andes).

ADAPTACIÓN

Principios

Los nueve principios que establece el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) son: (a) priorización de personas, localidades e infraestructura más vulnerables; (b) uso y mejora del conocimiento científico para la toma de decisiones en materia de adaptación; (c) generación de alianzas sólidas entre todos los sectores y niveles administrativos territoriales, aprovechando las iniciativas y conocimientos existentes; (d) promoción de la participación ciudadana (incluidos aspectos sociales, género y etnias) en el proceso de adaptación al cambio climático; (e) consideración de las posibles interacciones y consecuencias de las medidas de adaptación; (f) priorización de medidas simples y costo/efectivas, junto con el establecimiento de responsabilidades y recursos; (g) flexibilización de los planes de adaptación que permitan ajustes de acuerdo a los aprendizajes (*adaptative management*); (h) coordinación con otras políticas ambientales y/o sectoriales para maximizar beneficios y (i) reconocimiento del valor de ecosistemas y biodiversidad como la matriz natural esencial para amortiguar los efectos adversos del cambio climático sobre las comunidades humanas, la infraestructura y los propios ecosistemas.

Recomendaciones

Se sugiere agregar los siguientes elementos a los Principios del PNACC:

1. Valorización y conservación de los ecosistemas útiles para mitigar los efectos del cambio climático (por ejemplo, áreas de subducción y formación de masas de agua, praderas de macroalgas, playas).
2. Establecimiento de estrategias de adaptación basadas en ecosistemas *ecosystem-based*.
3. Finalización del mapeo de resiliencia y vulnerabilidad ecológica, social y económica del territorio a diferentes escalas de respuesta.
4. Finalización del inventario nacional de glaciares y restablecer el monitoreo de variables nivometeorológicas en la cordillera de los Andes.
5. Desarrollo de manera periódica los inventarios de emisiones para alimentar los modelos hidrológicos, atmosféricos y climáticos.

FORTALECIMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE CAPACIDADES

Brechas

Es urgente solventar las brechas de conocimiento y capacidades, especialmente en los ámbitos de la adquisición de datos, la creación de plataformas integradas de investigación que incluya infraestructura, personal y financiación de largo plazo, formación de redes de investigadores a nivel nacional e internacional, y sobre todo institucionalizar las estrategias de adaptación y mitigación que refuercen la acción educativa y de participación social a lo largo del país. Estas acciones deben involucrar a la comunidad científica, al sector público y privado, así como a los tomadores de decisiones.

La PA y la criósfera andina tienen forzantes de cambio a nivel global (como el aumento de temperatura y cambios en precipitación en glaciares altoandinos) y a nivel local (como las actividades antrópicas). En la Antártica, hay además lugares y procesos cruciales para el sistema climático de la Tierra. Tener el conocimiento de su estado y el monitoreo de sus cambios es vital para evaluar si los esfuerzos son adecuados.

El conocimiento sobre la criósfera se genera en gran medida mediante la observación desde las personas y las comunidades que viven cerca de los glaciares, son ellos los que vivirán de forma directa los efectos del cambio climático. La construcción de conocimiento es un esfuerzo global y la ciencia antártica debe mantener el espíritu colaborativo que tiene hasta ahora.

Esto es especialmente relevante en un contexto en que el conocimiento sobre el cambio climático se enfrenta a la proliferación de falsas teorías que niegan los cambios que se producen en el ecosistema. Hay una creciente invalidación de los argumentos científicos que complejiza que como sociedad se trabaje de forma complementaria y en sinergia.

Adicionalmente, falta un repositorio nacional de datos ambientales relevantes (oceanográficos, meteorológicos, atmosféricos, biogeográficos, entre otros) de la región SANT, que esté disponible vía internet para científicos en el ámbito nacional e internacional. Es importante que la información aquí generada pueda ser vinculada con las adaptaciones de organismos ganadores/perdedores (cambios de biodiversidad), al cambio climático. Esto debido a que las medidas de adaptación deben desarrollarse desde una perspectiva ecosistémica integral.

La implementación de las NDC, por ejemplo, tiene efectos globales en la regulación del clima, pero si no se realiza de forma adecuada puede tener efectos perjudiciales o insospechados en las dinámicas ecológicas a mediana y pequeña escala. Se requiere de una línea base (de largo período) de información atmosférica, criosférica y oceanográfica, lo que podría lograrse con una red de estaciones de monitoreo a lo largo de la Patagonia chilena.

Para los cálculos de ajustar las NDC en término de emisiones de CO_2, necesitamos estimar con más precisión que es "preindustrial" o "natural", de lo que es "antropogénico". La comunidad científica internacional también se pregunta en qué medida el calentamiento desde el siglo XIX, se puede atribuir a una recuperación del enfriamiento producido por las grandes erupciones volcánicas, *versus* cuánto es consecuencia directa de actividad humana.

Otros aspectos son los posibles "artefactos" o errores que se producen cuando, en estos estudios, usamos por un lado evidencia basada en registros (a partir de *proxies* desde los sedimentos), junto con observaciones directas de instrumentos. Todo esto podría tener variadas implicancias políticas en la toma de decisiones (ver Editorial Nature Geosci. (2019) doi.org/10.1038/s41561-019-0428-1).

Los temas de cambio climático y ahorro de energía no tienen la suficiente importancia, ni el espacio requerido (de acuerdo con los tiempos actuales) en la cultura nacional, ni en los programas educativos del Ministerio de Educación. Un ejemplo de ello es que la comunidad en general no reconoce los glaciares como un patrimonio nacional, ni su relevancia por albergar la tercera mayor reserva de agua dulce del mundo, tampoco su importancia en la sustentación de la gran biodiversidad de la zona sur ni su trascendencia político-estratégica (Los campos de hielo son la última zona del país donde aún quedan temas limítrofes pendientes con Argentina).

Recomendaciones

Se requiere reconocer y potenciar la criósfera de las regiones PA, SANT y de los Andes de Chile como un eje de desarrollo científico-tecnológico a nivel mundial, y aprovechar las bondades de los distintos sistemas como "laboratorios naturales únicos" y "centinelas del cambio climático".

Participación ciudadana

Es importante desarrollar la educación científica desde las escuelas, para despertar la curiosidad de los niños hacia las diferentes disciplinas de las ciencias y garantizar, en el futuro, buenos científicos de los ecosistemas y el clima.

1. Generar instancias de educación sobre el cambio climático, sus procesos y efectos, además de una orientación no solo a colegios e instituciones educativas, sino también a grupos de trabajadores, centros del adulto mayor y asociaciones ciudadanas de cualquier tipo.
2. En la misma línea, al haber desconocimiento de los canales de acción que tiene la ciudadanía en relación con la elaboración de leyes y normativas ambientales, las instancias propuestas debieran integrar la educación para la participación, con la finalidad de que todos los ciudadanos conozcan cómo participar e influir en la gobernanza frente al cambio climático.
3. Formalizar una colaboración con la sociedad de montañismo chilena y clubes de montañismo académicos para incluir los miembros en campañas de monitoreo y muestreo. Crear el museo de la montaña o de la cordillera de los Andes, que sirva como centro de información y educación sobre el rol que cumplen los glaciares y sus servicios ecosistémicos hacia la sociedad.
4. Instalar plataformas de monitoreo (en las principales cuencas nivoglaciares de Chile), permanentes, abiertas y flexibles, que incluyan el monitoreo de variables ambientales en el tiempo como contaminantes atmosféricos, características química y física de la nieve, albedo, meteorología, hidrología de montaña, cuencas nivoglaciares, etc. También deberían incluirse algunas en los campos de hielo patagónico y en la Antártica. Estas plataformas se pueden usar como centros de información y de educación ambiental ciudadana para entender los efectos e impactos del cambio climático sobre la criósfera de los Andes. Adicionalmente, se debe involucrar la participación ciudadana en la toma de datos científicos en la zona cordillerana y precordillerana, a través de programas de ciencia ciudadana (p. ej., medición de precipitación o nieve, albedo, carbono negro, etc.).

Rol de la comunidad científica

Algunas de las recomendaciones aquí incluidas ya han sido abordadas parcialmente con el trabajo de la mesa científica Criósfera y Antártica en el marco del Comité Científico COP25.

1. Catastrar, formalizar y relevar agrupaciones académicas locales que trabajen en cambio climático.
2. Relevar el rol de la comunidad científica en la formación de conocimiento que sirva de base para la generación apropiada de normativas y de evaluación de las brechas, entre el tipo de conocimiento que se genera y el que se necesita para la elaboración de planes y estrategias de acción que permitan enfrentar el cambio climático.
3. Aumentar y direccionar los recursos en investigación dirigidos a estudios de cambio climático de larga temporalidad (décadas), que incorporen una matriz de información e investigación base para mitigación y adaptación.
4. Generar un taller por región donde se capacite a los científicos y académicos sobre las actuales leyes en discusión y sus espacios de participación, con el fin de poder encauzar los esfuerzos de los grupos académicos de forma conducente.
5. Identificar y definir un panel de expertos en gobernanza climática, los que deberían coordinar grupos de científicos regionales que den indicaciones fundadas y serias sobre este tema.
6. Propiciar la generación de un documento con criterios científicos respecto a la implementación de las NDC a nivel local y territorial. Estos planes de implementación deben integrar la unidad del ciclo hidrológico (incluyendo la relación criósfera-ríos-océanos) y de carbono, y los efectos que las acciones de las NDC a nivel territorial generen en estos sistemas. Por lo mismo, además de grupos de académicos y científicos debe integrarse el Servicio Nacional de Biodiversidad y Áreas Protegidas en la creación de estas estrategias. Esto, sin perjuicio de la participación de otros ministerios sectoriales (p. ej., MOP, MMA, MRREE, MINSAL, MINEDUC, Energía, Agricultura, Economía).

7. Mantener a la comunidad científica informada sobre la evolución del Tratado Antártico y seguir propiciando la colaboración entre países, independiente de la afinidad política de los gobiernos de turno.
8. Generar programas de acción con las empresas para que, a través de sus protocolos de desarrollo sustentable y RSE (Responsabilidad Social Empresarial), contribuyan a la mitigación del cambio climático, tanto como a la educación en el tema. La Ley de RSE, también podría ser ampliada en el mismo contexto.
9. Desarrollar políticas y programas que incentiven el establecimiento de recursos humanos avanzados en las regiones más australes, para la investigación en temas relacionados con la criósfera. Por ejemplo, para el estudio de la dinámica a nivel de áreas frontales de los glaciares que terminan en océano *versus* en tierra (avance vs retroceso); o para proporcionar información sobre ablación frontal por desprendimiento de hielo y procesos de fusión bajo el agua en la interfaz hielo-agua, que aparecen como grandes desafíos para lograr una mejor comprensión del rápido retroceso de los glaciares de marea y agua dulce (Sugiyama *et al*., 2019).

Monitoreo a largo plazo y modelación integrativa

Plan de monitoreo de largo período (décadas) de variables climáticas, atmosféricas, hidrográficas y oceanográficas, especialmente las susceptibles de ser afectadas por el cambio climático. Para esto se requiere un uso coordinado y sinérgico de plataformas a gran escala espacial (desde la cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico), reforzando la implementación de registro continuo de instrumentos semiautónomos (p. ej., ferry-box, boyas) para actividades/fenómenos (tales como, pesquerías, marea roja, avalanchas, entre otros), especialmente en el sur de Chile y de la PA. Además de las plataformas de monitoreo existentes como estaciones nivometeorológicas, hidrológicas, sistemas de anclaje, etc.

1. Establecer una red coordinada de estaciones de medición de la criósfera en tiempo real, así como en todo Chile en el gradiente latitudinal y altitudinal;
2. Desarrollar el uso de fibra óptica para conectividad nacional, Antártica y de detección satelital en tiempo real.
3. Establecer programas de formación de capital humano avanzado en tecnologías de manejo de equipos de monitoreo, análisis y modelación de datos climáticos, hidrológicos y oceanográficos.
4. Crear un organismo nacional que: (a) gestione las series temporales de datos; (b) coordine las fuentes que originan la información y (c) garantice su actividad a largo plazo. Un ejemplo de estos organismos en otros países es la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos. Para entender los efectos del cambio climático en su conjunto, el organismo nacional propuesto debe ser multidisciplinario y aunar esfuerzos de geólogos, biogeoquímicos, biólogos, químicos, climatólogos, meteorólogos, oceanógrafos, glaciólogos, microbiólogos, ecólogos, geógrafos, etc.
5. Disponer de una organización centralizada a cargo de la operación de plataformas y redes de monitoreo ambiental para la detección de los cambios a distintas escalas geográficas (local, regional, nacional) y temporales (diarias, estacionales, interanuales). Con un sistema transparente de organización y uso libre de los datos.
6. Propiciar y financiar un esfuerzo a nivel nacional de sistematización en la medición de los forzantes a distintas escalas sobre la Antártica y la criósfera, con el fin de poder elaborar planes y estrategias atingentes a cada escala y la urgencia requerida en cada caso.
7. Instalar y mantener, tanto en las regiones PA como SANT, sistemas de monitoreo de largo período, capaces de registrar datos meteorológicos, hidrológicos, oceanográficos y atmosféricos durante todo el año. Esto permitirá detectar de forma mucho más precisa la variabilidad estacional e interanual, que son esenciales para alimentar nuestros modelos biológicos, químicos, climáticos y de este modo mejorar las predicciones ante futuros escenarios de cambio climático.
8. Monitorear y simular glaciares andinos y cobertura de nieve, especialmente en Chile central y norte para estimar el suministro futuro de agua dulce. Esto permitirá desarrollar modelos hidrológicos más actuales, que se hagan cargo de los estresores climáticos imperantes.
9. Integrar la dimensión geográfica a la estrategia de medición y análisis para definir sistemas integrados de uso/cambio de recursos desde los glaciares a las zonas costeras.
10. Integrar las redes de monitoreo de los ecosistemas a largo plazo, incluyendo el monitoreo de la hidrósfera, atmósfera, biósfera, criósfera y pedósfera. Actualmente, hay en Chile proyectos de

monitoreo de ecosistemas, pero son de corto plazo (<10 años), derivados en su mayoría de proyectos de investigación puntuales de corto plazo. Además, están aislados entre ellos, i.e. no están integrados en torno a una o varias preguntas comunes de investigación.

11. Financiar un monitoreo de largo plazo en las diferentes zonas glaciológicas de Chile.
12. Complementar las observaciones autónomas *in situ* con medidas obtenidas por satélite. Para ello se requiere de monitoreo satelital, por ejemplo, sensores a bordo de uno o varios satélites chilenos donde los datos generados sean de acceso público.
13. Otorgar mayor precisión a las estimaciones de condiciones meteorológicas en zonas de topografía compleja (montaña), así como de la interacción entre cobertura de suelo y meteorología.
14. Estudiar el bioalbedo, y en general la importancia de los microorganismos (p. ej., bacterias, algas de nieve) que habitan la criósfera continental y PA, como aceleradores del derretimiento de los campos de hielo y su interacción con las partículas que llegan desde la atmósfera.
15. Implementar métodos de medición y validación estándar que sean accesibles al uso por la comunidad científica, para comparar adecuadamente los resultados medidos en distintos entornos ambientales y por distintos grupos de investigación.

Datos y mediciones

La modelación de datos es una herramienta que contribuye a entender qué puede ocurrir en el futuro y qué información se necesita para mejorar el manejo y conservación de los ecosistemas. La modelación integrativa debe ser la herramienta de trabajo de los datos generados durante el monitoreo a largo plazo y en otros proyectos.

1. Establecer un centro-repositorio de metadata o bigdata en Magallanes o en Santiago.
2. Sistematizar datos que consideren la variabilidad climática y geográfica, que permitan desarrollar modelos climáticos, oceanográficos, atmosféricos, hidrológicos y predicciones robustas. Los programas de monitoreo y de adquisición de datos de largo plazo podrían ser los suministros para modelar los principales problemas de las regiones andinas y PA, a saber:
    - Precipitación-caudales, radiación, vientos, presión;
    - Acumulación de nieve y de contaminantes atmosféricos en la criósfera andina;
    - Glaciares de todo tipo;
    - Acidificación de sistema acuático;
    - Funcionamiento de los ecosistemas;
    - Ingreso y asentamiento de especies exóticas potencialmente invasoras a los ecosistemas prístinos; y
    - Dinámica de ríos y glaciares y su impacto en sistemas marinos (*freshening*).
3. Compilar series temporales de recolección de datos técnicos de largo plazo, cruciales para entender el cambio climático y generar proyecciones con un mayor grado de certeza (escala de años, décadas, siglos).
4. Incluir el monitoreo permanente de crono-secuencias (clave para predecir la formación del suelo y los procesos biogeoquímicos como el reciclaje de nutrientes y otros procesos terrestres).
5. Disponer de los datos originales, tanto en repositorios nacionales como internacionales.
6. Consensuar una forma multidisciplinaria de selección de las variables a medir (p. ej., el agua).
7. Desarrollar áreas emergentes de la investigación científica como:
    - La modelación de la interacción entre la atmósfera, la criósfera y el océano y su impacto en el clima.
    - La dispersión de partículas a través de la atmósfera como aerosoles, carbono negro, BrCAMS/DMA, tanto en la PA como en la criósfera andina.
    - Las teleconexiones climáticas con latitudes medias y bajas.
    - Fortalecer la modelación de los procesos criosféricos pasados y sus proyecciones a futuro bajo distintos escenarios de cambio climático.
8. Disponer datos generados en el sistema de evaluación de impacto ambiental de fácil acceso a la comunidad científica para desarrollar y validar modelos de procesos nivales y glaciares.

Bases y estaciones científicas

Las bases y estaciones científicas administradas por INACh, por motivos de infraestructura y logística, están ubicadas en las zonas más accesibles de la parte norte de la PA; sin embargo, el trabajo en otras áreas de alto interés, por ejemplo, la plataforma Larsen o en zonas abiertas del océano Austral, se ve dificultado. Por ello se requiere avanzar en:

1. Facilitar con recursos y apoyo logístico la colecta de información de la comunidad científica chilena en la PA.
2. Incrementar el número y calidad de estaciones terrestres móviles y modulares abastecidas por vía aérea, para expandir la investigación científica a zonas poco exploradas hasta ahora (p. ej., Antártica occidental).
3. Junto a estas facilidades en tierra, implementar con sensores de medición las plataformas aerotransportada (p. ej., aviones tipo Twin Otter o Basler equipados con radares, láser, cámaras, etc.), para registrar información en zonas de remotas de difícil acceso.
4. Integrar progresivamente al personal militar a las actividades de recopilación de datos; o reemplazarlo por personal civil especializado en mediciones científicas y logística en zonas extremas, asegurando así una dedicación completa a la investigación científica.
5. Reforzar los programas de investigación en las bases antárticas de Chile en las cercanías al polo sur, como la Estación Polar Científica Conjunta Glaciar Unión, para poder realizar comparaciones entre las condiciones e impactos del clima y la contaminación atmosférica entre los sectores costero de la PA con el continental.

FINANCIAMIENTO

Brechas

Las brechas en el conocimiento actual de la criósfera continental y PA pueden resultar muy costosas para Chile, si no se solventan en el corto-mediano plazo. En efecto, no conocer la influencia de la PA sobre el clima continental disminuye nuestra capacidad de predecir eventos extremos de aluviones o sequías.

El conocimiento de los impactos de la pérdida de masas de hielo y nieve de los glaciares andinos y de la PA permitirá hacer predicciones de las mermas de producción que tendrá la minería, agricultura, pesquería y la acuicultura, entre otros rubros que son primordiales para la economía nacional y dependen directamente de los procesos que ocurren en la criósfera, por lo tanto, el cambio climático tendrá importantes consecuencias socioeconómicas para el país. En los rubros industriales, la predicción de la cantidad y calidad del agua para el suministro de agua potable, su uso en centrales hidroeléctricas y la minería se hacen fundamentales.

Asimismo, no conocer con mayor detalle el estado actual y la evolución en el tiempo de los glaciares andinos impedirá realizar las adaptaciones y modificaciones oportunas en el uso del agua, lo que puede exponer a los productores a pérdidas financieras significativas, y a la sociedad chilena en general a problemas de acceso a agua potable (particularmente en zonas rurales).

Recomendaciones

Algunas de las acciones que podrían ser implementadas para apoyar estudios de investigación y de protección de ecosistemas de altas latitudes o altos andinos son:

1. Implementar programas de impuestos y "royalty" a las empresas que emiten GEI y derivar estos recursos a programas científicos y educacionales de mitigación del cambio climático. En Chile, el cobro de 5 dólares por tonelada de CO_2, está muy lejos de los impuestos cobrados en otros países (p. ej., Escandinavia) que sobrepasa los 100 dólares por tonelada. Establecer un costo equivalente de impuestos no solo por CO_2, sino también por emisiones de CVMC (incluyendo el carbono negro) permitiría reducciones a corto plazo con efectos más inmediatos y con externalidades positivas en la salud de la población.
2. Establecer un porcentaje equivalente de los bonos de carbono de las empresas aéreas, navieras, mineras, refinerías de combustibles, etc.
3. Evaluar como fuente de recursos el uso progresivo (un porcentaje), de los bonos soberanos de carbono emitidos por Chile.
4. Potenciar el uso del CO_2 como materia prima para la producción de componentes carbonados a través de procesos industriales y biológicos más baratos y limpios (Hepburn *et al*., 2019).
5. Reatribuir en la nueva Constitución, los impuestos sobre la minería desde las FF. AA. (10 % de los beneficios en la constitución actual) a programas científicos.

Recomendaciones de política pública

Basado en las brechas antes mencionadas, a continuación, se hace una serie de recomendaciones adicionales, destinadas a solventar algunas de las necesidades más acuciantes en materia de política pública nacional.

POTENCIAR A CHILE COMO PAÍS CENTINELA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

1. Potenciar las actuales redes nacionales de monitoreo (DMC, DGA, SINCA) e incluir en la misión de INACh el monitoreo climático en la Antártica. Además de establecer aportes concursables para establecer centros científicos de excelencia de largo plazo, que permitan acortar las brechas científicas y tecnológicas para el estudio de la criósfera. El mayor esfuerzo en I+D+i, en el hemisferio norte, ha resultado en un mejor entendimiento de los procesos climático/oceanográficos, que en el hemisferio sur; pero Chile tiene la posibilidad de disminuir esa brecha. El desafío es que al ser el segundo país más largo del mundo, con extensión de bases científicas hacia la Antártica, Chile tiene la gran oportunidad de actuar como el centinela del cambio climático en el hemisferio sur.
2. Potenciar plataformas de monitoreo que permitan evaluar la interacción de la criósfera con otros compartimentos ambientales como la atmósfera y el océano, mediante la instalación de estaciones de monitoreo permanentes y programas de largo plazo con financiamiento estable, como políticas de Estado y coordinadas por una organización centralizada (p. ej., el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación).

POTENCIAR LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA Y ANTÁRTICA OCCIDENTAL

1. Reforzar el Programa Científico de Investigación que administra el INACh, con el propósito de fortalecer disciplinas y áreas que son importantes para entender el impacto del cambio climático sobre la Antártica. Incrementar fondos para investigación asociativa y ampliar la colaboración con el Ministerio de Ciencia, Tecnológica e Innovación, a través de los programas actualmente en operación de Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ex-CONICYT). Esto permitirá abordar tareas científicas más ambiciosas y complejas (cruceros oceánicos, uso de laboratorios móviles e infraestructura de alto costo para trabajar en zonas de glaciares y plataformas remotas, trabajar durante el año corrido en la Antártica).
2. Potenciar el rol de la investigación científica en la declaración del Tratado Antártico. Aprovechar el Tratado Antártico, un foro eminentemente político, para consensuar a nivel internacional medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Es la única vía de proteger integralmente a un continente de interés plurinacional. La propuesta binacional de Argentina y Chile de crear un área protegida en la Antártica va en la línea correcta, pues permite ingresar la protección y conservación de los ecosistemas y su biodiversidad a la discusión geopolítica.
3. Proponer herramientas de financiamiento y fondos concursables en la PA en I+D+i y Centros de Excelencia concursables de largo período (p. ej., AWI-Alemania, División Polar de la NSF-USA,

BAS-UK, KOPRI-Corea del Sur). Esto con la finalidad de establecer programas de investigación, de monitoreo y mecanismos de colaboración entre instituciones nacionales y establecer redes eficientes de colaboración internacional a largo plazo.

CONSOLIDAR INSTITUCIONES PÚBLICAS Y PRIVADAS DE INVESTIGACIÓN

1. Consolidar las instituciones públicas y privadas que monitorean en forma regular la criósfera-PA en un organismo coordinador (a nivel del ministerio de ciencia o consorcio de universidades) y que sea el gran repositorio de datos para afrontar los desafíos de modelación y la toma de decisiones de mitigación/adaptación frente al cambio climático. Una recomendación concreta es autorizar el uso y coordinación de redes privadas y públicas de monitoreo de condiciones ambientales (p. ej., monitoreo de glaciares), traba legal que no se ha solucionado desde 1920.
2. Respecto a las acciones a desarrollar en la criósfera frente al cambio climático, se recomienda que el Estado tenga un esquema de trabajo más proactivo (prever, anticipar y planear para cambios y crisis impuestas por el cambio climático) en materia de políticas públicas. Se sugiere una mayor coordinación entre el trabajo de los ministerios para la gestión/protección/uso de los glaciares y un eficiente sistema de evaluación de impacto ambiental.
3. Crear un instituto de investigación en temas de montaña y sus servicios ecosistémicos. Esta institución debería aglutinar las capacidades profesionales, técnicas y logísticas para poder desarrollar este tipo de investigaciones con énfasis en generar información vital para prever, anticipar y planear los impactos y efectos impuestos por el cambio climático. El objetivo final de su misión y visión debería ser aportar la información de base para la generación de políticas públicas de disminución, mitigación y adaptación al cambio climático.

PROMOVER UN PROGRAMA DE EDUCACIÓN ESCOLAR Y CÍVICA SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

1. Incorporar el tema del cambio climático en las mallas curriculares a todo nivel en el sistema educativo chileno. Estos programas deben entregar información concreta, escenarios potenciales y consecuencias estimadas y validadas a nivel científico.
2. Desarrollar protocolos de control en los sistemas de tratamientos de agua que se devuelve al océano, tanto desde ciudades costeras, actividades de turismo, acuicultura y bases científicas y militares a lo largo del borde costero de Chile y de la Antártica. Es conocida la contaminación por microplásticos en la Antártica, probablemente aportados por productos derivados de la industria cosmética para uso personal (p. ej., defoliantes, protectores solares, etc.) y residuos de trabajos de lavandería, probablemente aportados desde actividades turísticas y bases científicas (Waller *et al*., 2017). Existe evidencia sobre la contribución del microplástico encontrado en el ambiente de la región SANT y en recursos de importancia económica de la región de Magallanes (*v. g.*, Andrade & Ovando 2017).

CALCULAR LA HUELLA DE CARBONO Y EL COSTO SOCIAL Y ECOSISTÉMICO DE LA ACTIVIDAD HUMANA

1. Abordar en su real dimensión la generación de emisiones y residuos en las bases científicas y militares (chilenas y extranjeras) en la Antártica.
2. En general, los residuos plásticos, latas y otros son transportados de vuelta a Chile, mientras que otros se incineran (generando carbono negro).
3. El uso de calefacción (caldera a pellets) redujo bastante las emisiones, pero serían mucho más eficientes con infraestructura (bases) bien aisladas.
4. INACh ya tiene un plan de reestructuración de sus bases con objetivos de mejorar la eficiencia de estos procesos.
5. Promover Aysén y Magallanes como modelo social-productivo sustentable a través del cambio de la matriz energética, con energía eólica, con estaciones en zonas expuestas al océano y/o domésticas; y con energía mareomotriz (canales o estrechos angostos, respectivamente). Algunos intentos se han realizado en los últimos años en aspectos de energías renovables, pero sin difusión de sus resultados. No obstante, existe una Política Energética para la región de Magallanes y

Antártica Chilena, basada en el documento de Hoja de Ruta Energética para Magallanes al 2050 (Ministerio de Energía, 2017), para aplicar un plan de adaptación en el mediano y largo plazo. Actualmente, se estima que un 5 % de la energía que se produce en la región, es basada en fuentes renovables no convencionales. Con la aplicación de la política energética para Magallanes, se estima para el 2030, que el 30 % de la generación energética regional sea renovable.

MEJORAR LA GOBERNANZA

Promover la protección de glaciares borde costero y recursos vivos

1. Proponer una eficiente protección en un 100 % de los glaciares del país, que considere su conservación y uso sustentable (responsable) considerando los ejes ambiental, social y económico. Las regulaciones ambientales relacionadas con los glaciares deben estar basadas en el conocimiento científico, fijando prioridades claras y vinculantes para todos los sectores que hacen uso de sus servicios. El Foro Económico Mundial, en su reporte de riesgo global (World Economic Forum, 2019), concluyó que, entre los 10 factores más amenazantes para el bienestar, prosperidad y la paz mundial están el fracaso en mitigar el cambio climático, pérdida en biodiversidad y colapsos de los ecosistemas. Un ejemplo de esto último lo constituyen los glaciares, los que están en franco retroceso en la criósfera chilena (Barcaza *et al*., 2017). Recientemente, se aprobó en el Senado (21 de junio de 2019), el poder discutir el proyecto sobre la protección de glaciares. El principal objetivo del proyecto es *asegurar la protección de los glaciares, del ambiente periglacial y del permafrost, con el fin de preservarlos y conservarlos como reservas estratégicas de recursos hídricos, proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas, fuentes de biodiversidad y de información científica y para el turismo sustentable*. Sin embargo, se decidió no considerar los conceptos de ambiente periglacial y permafrost. La pérdida de masa de glaciares es un proceso multifactorial que continuará en el tiempo y cuya tasa de pérdida podría ser principalmente mitigada por un eficiente programa de reducción de CO_2, mientras que una eficiente ley de glaciares podría contribuir a la adaptación/mitigación en el corto plazo. Es necesario una división en el análisis de la zona centro-norte y la zona sur debido a que la amenaza de pérdida de masa de glaciar y su uso es muy diferente. Mientras en la zona centro-norte existe una megasequía y una gran demanda, en la zona sur la extensiva distribución y cobertura de glaciares, asociado a una menor demanda, los sitúa en diferente estado de amenaza.
2. Generar un acuerdo país, público-privado, acerca de lo estratégico que significa para el futuro del país la protección y manejo sustentable de la criósfera (glaciares, ambiente periglacial y permafrost).
3. Incrementar en porcentaje las áreas marinas protegidas en las costas de Chile y desarrollar Áreas Marinas Protegidas (AMP) capaces de mantener la diversidad y preservar el normal funcionamiento de los ecosistemas y cautelar los servicios que proveen. En la actualidad, las áreas protegidas son la herramienta de gestión que mejor garantiza la conservación del medio ambiente, su resiliencia y su futuro. En esa dirección se propone: (a) ampliar el número de áreas protegidas marinas y terrestres incluyendo también los glaciares y ambientes extremos, y (b) proponer y apoyar la gestación, junto a Argentina, de una gran AMP en la zona de la península Antártica.
4. Es importante que la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCAMLR, por sus siglas en inglés) haya adoptado a las AMP como un instrumento de conservación ambiental. Si bien las AMP no están expresamente contempladas en el texto de la Convención, en 2011 la Comisión adoptó una medida de conservación específica para su establecimiento (MC 91-04). Las AMP en la CCAMLR son negociadas, adoptadas y designadas mediante "medidas de conservación" dictadas por la Comisión de la CCAMLR, las que cumplidos ciertos requisitos, se pueden transformar en instrumentos internacionales jurídicamente obligatorios. A partir de esta MC se han ido paulatinamente incorporando nuevas propuestas sumadas a las ya establecidas AMP en la región del Mar de Ross (2017) y en las islas Orcadas del Sur (2009), además de otras tres propuestas de AMP se encuentran en discusión. De esta manera, en la actualidad las AMP junto a otras MC que pretenden manejar espacialmente la biodiversidad (p. ej., EMV – Ecosistemas Marinos Vulnerables) son la principal herramienta con que cuenta la CCAMLR (un sub-régimen dentro del Sistema del Tratado Antártico) para la preservación de la biodiversidad, etc. En este sentido desde 2012, Chile y Argentina se encuentran trabajando en su propuesta para

establecer una AMP en la península Antártica, la que está aún en discusión siendo reconocida ampliamente por diversos países por lo transparente y la buena forma en la que se ha desarrollado el proceso. El fundamento es científico-ambiental, pero una vez que una propuesta pasa desde el seno del Comité Científico de la CCAMLR a la Comisión, la decisión es política. El desafío es cómo poder tener un efectivo control de las AMP para que no sean "de papel". El tema del control efectivo "en terreno" es complejo y muy caro: por ser zonas amplias y alejadas, dependerá mucho de los medios con que se cuente para ejercer tal control (embarcaciones, aviones, etc.), junto a la decisión política de ejercerlo y financiar las acciones respectivas. Se requiere del apoyo político para que se asignen recursos fijos, es decir, que puedan ser instalados en la Ley de Presupuesto.

5. Revisar planes y cuotas de captura de especies clave para la sustentación de los ecosistemas antárticos. Los recursos pesqueros antárticos como krill y bacalao de profundidad están bajo una fuerte presión de capturas. Ante situaciones de alto riesgo de colapso de especies, como el bacalao noruego, algunos enfoques han planteado estrategias de un modelo precautorio y enfoque ecosistémico. En general, ante un exacerbado cambio climático, se han sugerido soluciones como (a) implementar reservas marinas o AMP, (b) incorporar escenarios de cambio climático en los niveles de decisión gubernamentales y (c) desarrollar programas de monitoreo y de investigación más robustos (Brooks *et al.,* 2019).
6. Resguardar que la biodiversidad de macro y microorganismos sea preservada, ya que constituyen *b*úfers ante cambios globales y, por lo tanto, de adaptación a largo plazo. La biodiversidad es una parte fundamental de los ecosistemas, contribuyendo directamente a su resiliencia. Hay que tener en cuenta que cambio climático y biodiversidad deben contemplarse desde dos puntos de vista: por una parte, la conservación de la biodiversidad ayudará a amortiguar los efectos del cambio climático; pero, por otra parte, la misma biodiversidad se ve amenazada por los efectos del cambio climático. Mientras que la mayoría de las especies antárticas pueden verse afectadas de modo negativo por los efectos del cambio climático, otras podrían verse beneficiadas. Es la suma de dichas consecuencias y las interacciones que resulten de ellas, lo que va a determinar cómo será la adaptación del ecosistema y las sociedades humanas. Específicamente se propone:
7. Identificar lugares como las zonas de surgencia antártica y subantártica donde ocurren procesos vitales de mayor productividad biológica y mantener un monitoreo permanente de sus condiciones.
8. Evaluar los procesos de adaptación de organismos a los cambios ambientales (en intensidad y distribución espacial).
9. Incluir el componente microbiano en los catastros de biodiversidad, ya que controlan el ciclaje de nutrientes clave para los ecosistemas y constituyen reservorios genéticos de mecanismos de adaptación al cambio climático. Identificar y generar áreas de protección para especies claves en la exportación de carbono en sistemas marinos costeros (p. ej., krill, langostino-Munida, mamíferos marinos).
10. Incentivar el incremento y protección de las áreas SANT con cobertura vegetacional dispuestas en AMP.
11. Establecer "cuotas de turistas" en áreas específicas vulnerables al cambio climático, por ejemplo, en parques, reservas naturales, áreas protegidas, reservas y áreas de relevancia para la conservación de la Antártica; así como "cuotas de captura y producción" de los sectores pesquero y acuícola.
12. Focalizar y priorizar fondos regionales en la temática del cambio climático y problemas derivados.
13. Considerar a la criósfera como un sistema frágil y clave en el estudio del cambio climático. Potenciar la investigación científica a través de las cancillerías de Chile y Argentina en áreas PA y SANT, considerando a la región de Magallanes con influencia de sistemas naturales binacionales: estrecho Magallanes, canal Beagle, Tierra del Fuego y cabo de Hornos. Similar a las zonas de campos de hielo, por ser corredores binacionales en sistemas altoandinos.
14. Establecer Programas Estratégicos regionales a largo plazo (10 años) para áreas con impacto productivo regional y vitales para el aprovisionamiento de recursos como agua y alimento.
15. Evaluar la factibilidad de usar tecnologías de emisión negativa (NETs, en sus siglas en inglés). Por ejemplo, la producción de energía con captura de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés) que genera energía a través de la quema de biomasa (madera, productos agrícolas, desechos sólidos, biogás, etanol) acoplado a la captura y almacenaje del CO_2 en reservorios geológicos u otros de largo período, con la finalidad de sacarlos por mucho tiempo de la atmósfera (Bellamy *et al*., 2019).

Gobernanza de las vinculaciones en sectores público/privado y la academia

El cambio climático es un proceso multisistémico que está fuertemente accionado por la interacción antrópica-naturaleza y que requiere una convergencia multiactor (sector público, privado, académico y sociedad civil) y multidisciplinaria (ciencias naturales y sociales) para otorgar respuestas efectivas a dichos eventos.

1. Desarrollar un programa de información y alfabetización de la comunidad científica nacional acerca de la legislación y normativas que el Estado de Chile dispone para la protección de la criósfera. Además, de los diversos tratados internacionales que definen la protección de la Antártica. El analfabetismo jurídico de la ciencia y sus ejecutores redunda en iniciativas de investigación que pueden estar fuera de los límites que contextualizan las normas nacionales o los tratados internacionales. Esto puede restringir fuertemente la implementación de políticas públicas definidas para la mitigación y adaptación al cambio climático.
2. Reforzar considerablemente la capacidad como país de abordar de forma coordinada problemas científicos complejos, como el cambio climático. La excesiva atomización de los grupos de investigación y la existencia de múltiples programas de financiamiento desarticulados en cuanto a objetivos debilita la acción de científicos; en consecuencia, las políticas públicas que emergen de dicho conocimiento son parcializadas y sectoriales sin visión integradora. Se debe propender y estimular los programas integrados, colaborativos, multicomponentes e interdisciplinarios. Estos programas además deben tener financiamiento de largo plazo, puesto que abordan problemáticas complejas asociadas a procesos biogeoquímicos con temporalidades extensas.
3. Estrechar los vínculos en el mundo científico y el mundo empresarial, los que permanecen atávicamente separados, limitando fuertemente el desarrollo de estrategias que permitan explotar las oportunidades que entrega el cambio climático, especialmente en el campo de la eficiencia energética, uso y conservación de recursos hídricos, así como innovación tecnológica para mejorar procesos productivos.
4. Acoplar la investigación básica con las iniciativas aplicadas. Existe muy poca interacción público-privada con relación al estudio del cambio climático; ante el débil desarrollo de sinergias entre ciencia fundamental y ciencia aplicada, las capacidades del país para responder al cambio climático se ven fuertemente limitadas, pues los diagnósticos y evaluaciones a partir de los estudios científicos no logran ser traducidos en estrategias a implementar en escenarios de emergencia. Por otro lado, sin un traspaso de conocimientos a esferas aplicadas no hay posibilidades de dar sustentabilidad a las medidas de mitigación y adaptación a largo plazo. Desarrollar políticas efectivas orientadas en la implementación y fiscalización de un sistema que incorpore procesos de clasificación de residuos sólidos y líquidos domiciliarios e industriales, reciclamiento y/o tratamiento de estos, previo a su depósito o devolución en basurales o en aguas marinas costeras, respectivamente. Todos los sistemas de tratamiento de aguas servidas urbanas e industriales en el país, debería avanzar hasta tratamientos secundarios y el agua de proceso resultante debería devolverse a los sistemas hídricos para reincorporarlos al ciclo del agua de manera natural.
5. Mitigar en la flora, fauna y en el entorno de la Antártica, los impactos humanos de un exceso de visitantes y de la operación de las bases de investigación a través del Sistema del Tratado Antártico. La presencia de más de 50 000 personas al año está haciendo que cada vez se encuentren menos lugares prístinos en el continente, un impacto que aún no puede ser evaluado en toda su dimensión. Algunas consecuencias como la homogeneización de especies, el ingreso de especies invasoras, y cambios en la microbiota son actualmente evidentes para varias regiones altamente intervenidas por el hombre.
6. Implementar efectivamente las Áreas Protegidas en la península Antártica; una iniciativa que debe ser potenciada y expandida a más regiones de la Antártica. Un gran obstáculo hacia el avance en la protección de los sistemas de la criósfera frente al cambio climático es el hecho de que el desarrollo productivo y la protección ambiental usualmente se perciben como opuestos. Ejemplos de esto son la resistencia del sector minero a la ley de protección de glaciares y del sector agrícola a discutir reformas sustanciales para el código de aguas.
7. Acatar las directrices del Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente, también conocido como Protocolo de Madrid, para el tratamiento de todo tipo de residuos generados en el área del Tratado.
8. Aprovechar las oportunidades que Chile Central, la Patagonia Chilena y la PA ofrecen de cubrir un amplio rango latitudinal (30°-69° S) para el estudio del cambio climático, apoyado por la opor-

tunidad de contar con fibra óptica hasta Puerto Williams. El desafío es desarrollar un programa que integre la capacidad científica instalada y establecer un centro integrado (repositorio) de información climática, oceanográfica y satelital.

9. Apoyar el gran compromiso a nivel país de tomar medidas para limitar el aumento de temperaturas globales a 1.5 °C que resulta del análisis de expertos y de variada evidencia científica que la respalda. Esto va asociado a una tarea de socialización y entusiasmo contagioso hacia los sectores más escépticos del cambio climático (algunos países y políticos que toman decisiones). Igualmente asumir la responsabilidad de establecer este compromiso (todos, no solo el IPCC), con el desafío de mantener un alto nivel de credibilidad y establecer que debería estar en continua revisión, debido a que lo que hoy "pareciera ser" suficiente, en las próximas décadas podría no serlo.
10. Para alcanzar la meta de 1.5 °C, se requiere de una transición rápida y consensuada en el manejo de los recursos, servicios, transporte, energía, etc., además de una reducción de emisiones de CO_2 de 45 % desde los niveles de 2010 a 2030, para alcanzar la carbono-neutralidad el 2050, lo que se ve como un tremendo desafío por lo corto del tiempo disponible (ver Asayama *et al*., 2019 y Zhenmin & Espinosa, 2019). Esta urgencia ha sido también reportada como cambios importantes en la PA, en términos de pérdidas en la cobertura de glaciares y cambios en la estructura de los ecosistemas costeros y biodiversidad (Siegert *et al*., 2019).
11. Buscar una gran ambición en los desafíos que impone el cambio climático, pero sin dejar de lado estrategias de acuerdos y sinergia con las propuestas de desarrollo sustentable de los recursos del país. El principal desafío es buscar los acuerdos y sinergias con el sector público y privado (*v.g.,* sectores mineros (ley de glaciares), agrícola (código de aguas), pesquero-acuícola (uso sustentable y protección del medio ambiente y biodiversidad a través de AMP, etc.). En particular, en los sistemas de la criósfera andina sería buscar los puntos de encuentro entre el uso sustentable de recursos, la economía azul y los requerimientos y derechos de la sociedad de vivir en un planeta limpio.
12. Fortalecer las alianzas y redes nacionales e internacionales en pos de acciones de mitigación, adaptación y gobernanza frente al cambio climático. El principal desafío es (a) crear conciencia en los diversos interesados (*stakeholders*) en el cambio climático a nivel nacional y (b) convencer a los sectores más escépticos a nivel internacional, lo que desafortunadamente corresponde a algunos países con las mayores emisiones e influencias en la política internacional.
13. Llenar los vacíos de información científica en zonas de altas latitudes para alimentar modelos predictivos y simular escenarios de cambio climático regional y global. Se requiere implementar y mantener estaciones de series de tiempo de datos oceanográficos y climatológicos que permitan abordar las escalas de tiempo estacional e interanual. Existe un gran desconocimiento en el acoplamiento entre el océano Austral y la atmósfera, a pesar de tener un rol clave en los patrones de circulación de las masas de agua, de la distribución del calor y ser responsable de una gran parte de la exportación y subsecuente secuestro de carbono a través de las BBC y Bombas físicas de carbono (BFC).

Conclusiones

Las regiones antárticas y andinas albergan las mayores reservas de agua dulce del planeta, afectan significativamente al clima global y son muy vulnerables al cambio climático. Estas características ofrecen oportunidades y desafíos para posicionarnos como referentes mundiales usando nuestras características de "laboratorio natural" para el estudio del cambio climático.

Las regiones antárticas y andinas albergan además una rica biodiversidad. El cambio climático y la biodiversidad deben analizarse desde dos puntos de vista: por una parte, la conservación de la biodiversidad ayudará a amortiguar los efectos del cambio climático; pero, por otra parte, la misma biodiversidad se ve amenazada por los efectos del cambio climático. Mientras que la mayoría de las especies antárticas pueden verse afectadas de modo negativo por los efectos del cambio climático, otras podrían verse beneficiadas. Es la suma de dichas consecuencias y las interacciones que resulten de ellas, lo que va a determinar cómo será la adaptación del ecosistema y las sociedades humanas.

Se requiere una gran ambición en los compromisos de Chile para que, el incremento máximo de la temperatura no sobrepase los 1.5 °C, de otra forma se corre el riesgo de perder completamente los glaciares del norte Chile. Además, la PA occidental tiene el potencial de elevar entre 4 y 6 m el nivel del mar, proceso de derretimiento que ya ha comenzado.

Es imperativo tener un programa ambicioso de educación del cambio climático a todo nivel, desde los sectores escolares hasta los gubernamentales.

Probablemente, un aspecto central para definir planes realistas de mitigación es reforzar la institucionalidad de las ciencias del cambio climático en Chile e implementar programas integrados de investigación científica (Fondap, Milenio, etc.) que permitan recabar información confiable y sostenida en el tiempo.

Chile debe implementar un enfoque de ordenamiento territorial, que considere la distribución poblacional y nivel de impacto antropogénico, enfocado en una planificación por cuencas hidronivales, con miras a proteger los ecosistemas y gestionar de manera sustentable los recursos biológicos, geológicos, hídricos, de biodiversidad, entre otros.

Básicamente, los planes de adaptación en las diferentes áreas implican reformular el funcionamiento de muchos órganos del Estado, modificar y ajustar los modelos productivos y de mercado para satisfacer las necesidades de la población en un nuevo escenario marcado por la inestabilidad climática y disminución de recursos naturales. En este escenario, las propuestas de carbono neutralidad deberían plantearse considerando un desarrollo productivo sustentable que incluya: la posibilidad de vivir en un medio ambiente sano y limpio, el derecho de las personas a usar los servicios ecosistémicos y un crecimiento económico sustentable del país. En este contexto se propone:

- Que la Patagonia Sur (Aysén y Magallanes) sea decretada zona de emergencia climática, debido a su nivel de fragilidad y vulnerabilidad a los impactos del cambio climático. Rápidos cambios en sus reservas de agua dulce de campos de hielo (norte y sur), así como es su entramada geografía de fiordos, canales y estuarios que son afectados (entrada de agua dulce, nutrientes, materiales particulados y disueltos de origen orgánico e inorgánico) desde los sistemas terrestres y marinos.
- Que la zona de Chile centro-norte sea decretada zona de emergencia climática debido a su nivel de fragilidad y vulnerabilidad a los impactos del cambio climático. Rápidos cambios en sus reservas de agua dulce de cobertura de nieve y hielo glacial podrían exacerbar la escasez hídrica en el futuro cercano.

Existe un insuficiente conocimiento científico sobre la conectividad entre los sistemas PA y SANT, su estado actual, efectos del cambio climático sobre ellos, y las consecuencias para la población. Existe un escaso

o nulo monitoreo en tiempo real de los cambios ambientales que están ocurriendo en la actualidad. Como ejemplo, el reciente desprendimiento de grandes porciones de hielo en el glaciar Grey (Parque Nacional Torres del Paine) fue detectado por la comunidad científica luego de varios días de ocurrido el evento.

Finalmente, la sociedad global está sufriendo los efectos de un exacerbado cambio climático (sobre todo la población más vulnerable). La academia tiene la responsabilidad de contribuir con información para los tomadores de decisiones (mundo político). Organizaciones científicas (p. ej., AWS) han levantado la voz sobre las posibles consecuencias devastadoras (Ripple *et al.*, en prensa) y es nuestro compromiso el contribuir con evidencia y propuestas concretas y ambiciosas "ahora".

Porque tenemos que pensar en el planeta y en lo que dejaremos a los que vendrán después de nosotros, es nuestro deber informar con evidencia científica y rigurosa a los responsables de las políticas públicas y tomadores de decisiones. Esto, por el bien de las personas y de la naturaleza.

REFERENCIAS

Abram, N. J., R. Mulvaney, F. Vimeux, S. J. Phipps, J. Turner, & M. H. England (2014). Evolution of the southern annular mode during the past millennium. *Nat. Clim. Change* 7, 564–569, doi: 10.1038/nclimate2235.

Alfonso, J.A., R. R. Cordero, P. M. Rowe, S. Neshyba, G. Casassa, J. Carrasco, S. MacDonell, F. Lambert, J. Pizarro, F. Fernandoy, & S. Feron (2019). Elemental and Mineralogical Composition of the Western Andean Snow (18° S–41° S). *Sci. Rep*., 9(1).8130. doi.org/10.1038/s41598-019-44516-5.

Amour, K. C., J. Marshall, J. R. Scott, A. Donohoe, & E. Newsom (2016) Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. *Nature Geosci*. 9: 549-554.

Andrade, C. & F. Ovando (2017). First record of microplastics in stomach content of the southern king crab Lithodes santolla (Anomura: Lithodidae), Nassau bay, Cape Horn, Chile. *Anales Instituto Patagonia* (Chile) 45(3): 59-65.

Aniya, M. (1999). Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 31(2), 165-173.

Aravena, J. C., A. Lara, A. Wolodarsky-Franke, R. Villalba, & E. Cuq (2002). Tree-ring growth patterns and temperature reconstruction from Nothofagus pumilio (Fagaceae) forests in the upper tree line of southern Chilean Patagonia. *Rev. Chil. Hist. Nat*. 75: 361-376.

Arenson, L. U. & M. Jakob (2010). The significance of rock glaciers in the dry Andes – a discussion of Azócar & Brenning (2010) and Brenning & Azócar (2010). *Permafr. Periglac. Process*. 21: 282–285, doi:10.1002/ppp.693.

Asayama, S., R. Bellamy, O. Geden, W. Pearce, & M. Hulme (2019). Why setting a climate deadline is dangerous. *Nature Clim. Change*, doi: 10.1038/s41558-019-0543-4.

Ayala, A., D. Farías-Barahona, M. Huss, F. Pellicciotti, J. McPhee & D. Farinotti (2019). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River Basin, semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere Diss*, doi org/10.5194/tc-2019-233.

Azócar, G. F. & A. Brenning (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the Dry Andes, Chile (27-33°S). *Permafr. Periglac. Process*. 21(1): 42-53, doi.org/10.1002/ppp.669.

Barcaza, G., S. U. Nussbaumer, G. Tapia, J. Valdés, J. L. García, Y. Videla & V. Arias (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58: 166-180.

Belcher, A., G. A. Tarling, C. Manno, A. Atkinson, P. Ward, G. Skaret, S. Fielding, S. A. Henson & R. Sanders (2017). The potential role of Antarctic krill faecal pellets in efficient carbon export at the marginal ice zone of the South Orkney Islands in spring. *Polar Biol.* 40: 2001-2013.

Belcher, A., S. A. Henson, C. Manno, S. L. Hill, A. Atkinson, S. E. Thorpe, P. Fretwell, L. Ireland & G. A. Tarling (2019). Krill faecal pellets driven hidden pulses of particulate organic carbon in the marginal ice zone. *Nature Comm*. 10:889, doi.org /10.1038/s41467-019-08847-1.

Bellamy, R., J. Lezaun & J. Palmer (2019) Perception of bioenergy with carbon capture and storage in different policy scenarios. *Nature Comm.* (2019) 10:743, doi.org/10.1038/s41467-019-08592-5.

Boisier, J. P., C. Álvarez, R. Cordero, A. Damiani, L. Gallardo, R. Garreaud, F. Lambert, C. Ramallo, M. Rojas, & R. Rondanelli (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elem. Sci. Anth*. 6: 74.

Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, & F. Muñoz (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent drought in Central Chile. *Geophys. Res. Lett.* 43: 413–421.

Bown, F., A. Rivera, M. Pętlicki, C. Bravo, J. Oberreuter, & C. Moffat (2019). Recent ice dynamics and mass balance of Jorge Montt Glacier, Southern Patagonia Icefield. *Journal of Glaciology* 65, 732–744. https://doi.org/10.1017/jog.2019.47.

Bown, F., A. Rivera, P. Zenteno, C. Bravo & F. Cawkwell (2014). First glacier inventory and recent glacier variation on Isla Grande de Tierra del Fuego and adjacent Islands in Southern Chile. In *Global land Ice measurements from space* (pp. 661-674). Springer, Berlin, Heidelberg.

Boyd, P. & C. Vivian (2019). Should we fertilize oceans or seed clouds? No one knows. *Nature* 570: 155-157.

Bracegirdle, T. J., W. M. Connolley, & J. Turner (2008). Antarctic climate change over the twenty first century, *J. Geophys. Res*., 113, D03103, doi:10.1029/2007JD008933.

Braun, M. H., P. Malz, C. Sommer, D. Farías-Barahona, T. Sauter, G. Casassa *et al*. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nat. Clim. Change* 9: 130–136, doi: 10.1038/s41558-018-0375-7.

Bravo, C., D. Bozkurt, A. González-Reyes, D. J. Quincey, A. N. Ross, D. Farías-Barahona & M. Rojas (2019). Assessing snow accumulation patterns and changes on the Patagonian Icefields. *Front. Environ. Sci*., https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00030.

Brenning, A. (2005) Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafr. Periglac. Process* 16(3):231–240, doi.org/10.1002/ppp.528.

Brooks, C. M., D. G. Ainley, P. A. Abrams, P. K. Dayton, R. J. Hofman, J. Jacquet & D. B. Siniff (2018). Watch over Antarctic waters. Nature 558: 177-180.

Carrasco, J., G. Casassa & J. Quintana (2005). Changes of the 0 °C isotherm in central Chile during the last quarter of the XXth Century. *Hydrological Sciences Journal,* 50(6), 933-948.

Casassa, G., A. Rivera, M. Aniya, & R. Naruse (2002). Current knowledge of the Southern Patagonia Ice Fields, in *The Patagonian Ice Fields:* A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies, edited by G. Casassa, F. V. Sepúlveda, and R. Sinclair, pp. 67–83, Kluwer Acad., New York.

REFERENCIAS

Cereceda-Balic, F., T. Gorena, C. Soto, V. Vidal, M. Lapuerta, & H. Moosmüller (2019). Optical determination of black carbon mass concentrations in snow samples: A new analytical method. Science of The Total Environment, 697, 133934, doi: information: 10.1016/j.scitotenv.2019.133934, 2019.

Cereceda-Balic, F., M. R. Palomo-Marín, E. Bernalte, V. Vidal, J. Christie, X. Fadic, J. L. Guevara, C. Miro, E. Pinilla Gil (2012). Impact of Santiago de Chile urban atmospheric emissions on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric Environment* 47, 51-57, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.11.045.

Cereceda-Balic, F., V. Vidal, H. Moosmüller, M. Lapuerta (2018). Reduction of snow albedo from vehicle emissions at Portillo, Chile. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 43-52. doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.008.

Cordero, R., S. Feron, A. Damiani, P. Llanillo, J. Carrasco, J. Jorquera, E. Sepúlveda, & J. M. Carrera (2019a) *Cambio Climático – Respuestas a la Preguntas Claves*. Hardcover ISBN: 978-956-401-251-3.

Cordero, R.R., V. Asencio, S. Feron, A. Damiani, P. J. Llanillo, E. Sepúlveda, J. Jorquera, J. Carrasco, & G. Casassa (2019b). Dry-Season Snow cover Losses in the Andes (18–40 S) driven by changes in Large-Scale climate Modes. *Scientific reports,* 9(1): 1-10.

Cortés, G. & S. A. Margulis (2017). Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high- resolution 31 years reanalysis. *Geophys. Res. Lett.* 44, 6859–6867.

Dennison, F. W., A. J. McDonald & O. Morgenstern (2015). The effect of ozone depletion on the Southern Annular Mode and stratosphere-troposphere coupling. *J. Geophys. Res. Atmos*. 120: 6305-6312.

Dou, T.F. & C. D. Xiao (2016). An overviewof black carbon deposition and its radiative forcing over the arctic. Adv. Clim. Chang. Res. 7 (3), 115–122. https://doi.org/10.1016/j.accre.2016.10.003.

Ducklow, H.W., W.R. Fraser, M.P. Meredith, S.E. Stammerjohn, S.C. Doney, D.G. Martinson, S. F. Sailley, O.M. Schofield, D.K. Steinberg, H.J. Venables & C.D. Amsler (2013). West Antarctic Peninsula: *An ice-dependent coastal marine ecosystem in transition. Oceanography* 26(3):190–203, http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2013.62.

Dussaillant, I., E. Berthier, F. Brun, M. Masiokas, R. Hugonnet, V. Favier, A. Rabatel, P. Pitte & L. Ruiz (2019). Two decades of glacier mass los along the Andes. *Nature Geosci.* https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5.

Farías-Barahona, D., S. Vivero, G. Casassa, M. Schaefer, F. Burger, T. Seehaus, P. Iribarren-Anacona, F. Escobar, & M. H. Braun (2019). Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015, *Remote Sens*., 11, 260. doi:10.3390/rs11030260.

Favier, V., M. Falvey, A. Rabatel, E. Praderio, & D. López (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S). *Water Resources Research* 45. https://doi.org/10.1029/2008WR006802.

French, H. M. (2018) The Periglacial Environment. Fourth Edition, Wiley-Blackwell, 544 pp.

Frieler, K., P. U. Clark, F. He, C. Buizert, R. Reese, S. R. Ligtenberg, M. R. Van Den Broeke, R. Winkelmann, & A. Levermann (2015). Consistent evidence of increasing Antarctic accumulation with warming *Nature Climate Change* 5: 348-352.

Garreaud, R., C. Álvarez-Garreton, J. Barichivich, J. P. Boisier, D. Christie, M. Galleguillos, C. LeQuesne, J. McPhee, & M- Zambrano-Bigiarini (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrol. *Earth Syst. Sci*. 21: 6307–6327.

Garreaud, R., P. López, M. Minvielle, & M. Rojas (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. Journal of Climate, 26(1), 215-230, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00001.1.

Gillett, N. P., J. C. Fyfe, & D. E. Parker (2013). Attribution of observed sea level pressure trends to greenhouse gas, aerosol, and ozone changes. *Geophys. Res. Lett*. 40: 2302–2306.

González-Reyes, A., J. C. Aravena, A. Muñoz, P. Soto-Rogel, I. Aguilera-Betti, & I. Toledo-Guerrero (2017). Variabilidad de la precipitación en la ciudad de Punta Arenas, Chile, desde principios del siglo XX. *Anales Inst. Patagonia* 45: 31-44.

Greaves, B. L., A. T. Davidson, A. D. Fraser, J. P. McKinlay, A. Martin, A. McMinn, & S. W. Wright (2019). The Southern Annular Mode (SAM) influences phytoplankton communities in the seasonal ice zone of the Southern Ocean. *Biogeosciences,* doi org/10.5194/bg-2019-402.

Hammond, J. C., F. A. Saavedra, & S. K. Kampf (2018). Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *Int. J. Climatol*. 38: 4369–4383.

Heid, T. & A. Kääb (2012). Repeat optical satellite images reveal widespread and long term decrease in land-terminating glacier speeds, *Cryosphere* 6(2): 467–478.

Hepburn, C., E. Adlen, J. Beddington, E. A. Carter, S. Fuss, N. MacDowell, J.- C. Minx, O. Smith & C. K. Williams (2019). The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. *Nature,* 575: 87-97, doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6.

Höfer, J., R. Giesecke, M.J. Hopwood, E. Alarcón, V. Carrera & H. E. González (2019). The role of water column stability and wind mixing in the production/export dynamics of two bays in the Western Antarctic Peninsula. *Prog. Oceanog*. 174: 105-116. doi./10.1016 /j.pocean.2019.01.005.

Hopwood, M., D. Carroll, J. Höfer, E. Achterberg, L. Meire, F. Le Moigne, L. Bach, C. Eich, D. Sutherland, & H. E. González (2019). Highly variable iron content modulates iceberg-ocean fertilisation and potential carbon export. *Nature Comm*. 10:5261, https://doi.org/10.1038/s41467-019-13231-0. IF: 11.880.

Hu, S. & A. V. Fedorov (2018) Cross-equatorial winds control El Niño diversity and change. *Nat. Clim. Chang*. 8, 798–802.

Huss M. & R. Hock (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat. Clim. Chang*. 8: 135-140.

REFERENCIAS

INDC (2015). Contribución Nacional Tentativa de Chile (INDC) para el Acuerdo Climático París 2015.

IPBES (2018). *Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for the Americas of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. J. Rice, C.S. Seixas, M.E. Zaccagnini, M. Bedoya-Gaitán, N. Valderrama, C.B. Anderson, M.T.K. Arroyo, M. Bustamante, J. Cavender-Bares, A. Díaz-de-León, S. Fennessy, J. R. García Márquez, K. García, E.H. Helmer, B. Herrera, B. Klatt, J.P. Ometo, V. Rodríguez Osuna, F.R. Scarano, S. Schill and J. S. Farinaci (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 41 pages.

IPCC (2001). Watson R. T. y equipo de autores del IPCC: Informe de síntesis. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf.

IPCC (2013). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2014). Climate Change (2014). In: Pachauri, R. K., Meyer, L. A. (eds) *Synthesis Report. Contribution of Working Groups* I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team. IPCC, Switzerland.

IPCC (2014). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate actions reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *Proc. Natl. Acad.* Sci. US, doi.org/10.1073/pnas.1900194116.

Jones, J. M. *et al*. (2016). Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate. *Nature Climate Change* 6: 917–926.

Killian, R., O. Baeza, T. Steinke, M. Arévalo, C. Ríos, & C. Schneider (2007). Late Pleistocene to Holocene marine transgression and thermohaline control on sediment transport in the western Magallanes fjord system of Chile (53° S). *Quatern. Int*., 161: 90-107.

Krause-Jensen, D. & C. Duarte (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geosci*. 9: 737–742 (2016), doi:10.1038/ngeo2790.

León-Muñoz, J. M. Urbina, R. Garreaud, & J. L. Iriarte (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Sci. Rep.* 8: 1330, doi:10.1038/s41598-018-19461-4.

Lim, E. P., H. Hendon, J. Arblaster, F. Delage, H. Nguyen, S. Min, & M. Wheeler (2016). The impact of the Southern Annular Mode on future changes in Southern Hemisphere rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 43: 7160-7167.

Lopez, P., P. Chevallier, V. Favier, B. Pouyaud, F. Ordenes, & J. Oerlemans (2010). A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America, *Global Planet. Change,* 71(1–2): 85–108.

Lotze, H. K., D. P. Tittensor, A. Bryndum-Buchholz, T. D. Eddy, W.W. Cheung, E. D. Galbraith..., & L. Bopp (2019). Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(26), 12907-12912.

Meier, WJ-H, J. Grießinger, P. Hochreuther, & M.H. Braun (2018). An Updated Multi-Temporal Glacier Inventory for the Patagonian Andes with Changes Between the Little Ice Age and 2016. *Front. Earth Sci.* 6: 62, doi: 10.3389/feart.2018.0006.

Meinig, C., E. Burger, N. Chen, E. Cokelet, M. Cronin, J. Cross, S. de Halleux, R. Jenkins, A. Jessup, C. Mordy, N. Lawrence, A. Sutton, D. Zhang, & C. Zhang (2019). Public-private partnership to advance regional ocean-observing capabilities: A saildrone and NOAA-PMEL case study and future considerations to expand to global scale observing. *Front. Mar. Sci*. 6:448, doi: 10.3389/fmars.2019.00448.

Meire, L., J. Mortensen, P. Meire, T. Juul-Pedersen, M. Sejr, S. Rysgaard, R. Nygaard, P. Huybrechts, & F. Meysman (2017). Marine-terminating glaciers sustain high productivity in Greenland fjords, *Global Change Biol*. 23: 5344-5357, doi: 10.1111/gcb.13801.

Ministerio de Energía (2017). Política Energética Magallanes y Antártica Chilena 2050. (http://www.mienergia.cl/sites/default/files/archivos/energia_magallanes_2050.pd).

Ministerio Medio Ambiente (2018). *Contribución Nacional Tentativa de Chile (INDC) para el Acuerdo Climático París* 2015.

Morley, S.A., D.K.A: Barnes & M. J. Dunn. (2019). Predicting which species succeed in climate-forced polar seas. *Frontiers Mar*. Sci. 5: 507.

Nature Geosci. Editorial (2019). The great climate conundrum. *Nature Geosci*. 12: 581, doi.org/10.1038/s41561-019-0428-1.

Navarro, J., R. Torres, K. Acuña, C. Duarte, P. Manríquez, M. Lardies, N. Lagos, C. Vargas & V. Aguilera (2013). Impact of medium-term exposure to elevated pCO^2 levels on the physiological energetics of the mussel Myilus chilensis. *Chemosphere* 90: 1242-1248.

Niittynen, P., R. K. Heikkinen, & M. Luoto (2018). Snow cover is a neglected driver of Arctic biodiversity loss. *Nature Climate Change*, 8(11), 997.

REFERENCIAS

Ohlanders, N., M. Rodríguez, & J. McPhee (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17: 1035– 1050, doi:10.5194/hess-17-1035-2013.

Parekh P., S. Dutkiewicz, M. J. Follows, & T. Ito (2006). Atmospheric carbon dioxide in a less dusty world. *Geophys. Res. Lett*. 33, L03610, doi:10.1029/2005GL025098

Petersberg (2019). *Climate Dialogue X* – Fulfilling the promise of París Berlin, 14 May 2019.

Piñones, A. & A. V. Federov (2016) projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century. *Geophy. Res. Lett*. 43, doi:10.1002/ 2016GL069656.

PNACC (2014) *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático elaborado en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático* (PANCC) aprobado por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático el 1 de diciembre de 2014

Rignot, E. & R. H. Thomas (2002). Mass balance of polar ice sheets. *Science* 297: 1502-1506.

Rignot, E., J. Mouginot, B. Scheuchi, M. van den Broeke, M. J. van Wessem & M. Morlighem (2019). Four decades of Antarctic Ice sheet mass balance from 1979-2017. *Proceed. Nat. Acad. Sci*. 116:1095-1103. Doi: 10.1073/pnas.1812883116

Rignot, E., A. Rivera & G. Casassa (2003). Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science* 302(5644): 434-437.

Ríos, F, R. Killian & E. Mutschke (2016). Chlorophyll-a thin layers in the Magellan fjord system: The role of the water column stratification. *Continental Shelf Research*, doi: 10.1016/j.csr.2016.04.011.

Ripple, W. J., C. Wolf, T. M. Newsome, M. Galetti, M. Alamgir, E. Crist, M. I. Mahmould, W. F. Laurance, and 15,365 scientist signatories from 184 countries. *BioSciences* (en prensa).

Rivera, A., G. Cassasa, C. Acuña & H. Lange (2000). Variación reciente de glaciares en Chile. *Invest. Geogr.*, Chile 34: 29-60.

Rivera, A., T. Benham, G. Casassa, J. Bamber & J. A. Dowdeswell (2007). Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. *Global and Planetary Change* 59(1-4): 126-137.

Rivera, A., F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz & M. Vuille (2016). *Balance de masa glaciar*. Ediciones CECs, Valdivia, Chile, 203 pp. http://www.glaciologia.cl/web/glaciologia_en/download_book.php.

Rowe, P. M., R. R. Cordero, S. G. Warren, E. Stewart, S. J. Doherty, A. Pankow, M. Schrempf, G. Casassa, J. Carrasco, J. Pizarro, & S. MacDonell (2019). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. Sci. Rep., 9(1):4008, doi: 10.1038/s41598-019-39312-0.

Saavedra, F. A., S. K. Kampf, S. R. Fassnacht, & J. S. Sibold (2017) A snow climatology of the Andes Mountains from MODIS snow cover data. *Int. J. Climatol*. 37, 1526–1539.

Schaefer, M., H. Machguth, M. Falvey, G. Casassa, & E. Rignot (2015). Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield. The Cryosphere 9: 25-35.

Schaffer, N., S. MacDonell, M. Réveillet, E. Yáñez, & R. Valois (2019) Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Reg. Environm. Change* 19(5): 1263-1279.

Segovia, A. & Y. Videla (2017) Caracterización Glaciológica de Chile. *Investig. Geogr.* Chile, 53: 3-24 doi:10.5354/0719-5370.2017.41739.

Shepherd, A., L. Gilbert, A. Muir, H. Konrad, M. McMillan, T. Slater, K. Briggs, A. Sundal, A. Hogg, & M. Engdahl (2019). Trends in Antarctic Ice sheet elevation and mass. *Geophys. Res. Lett*., doi: 10.1029/2019GL082182.

Siegert, M., A. Atkinson, A. Banwell, M. Brandon, P. Convey, B. Davies, R. Downie, T. Edwards, B. Hubbard, G. Marschall, J.- Rogelj, J. Rumble, J. Stroeve, & D. Vaughan (2019). The Antarctic Peninsula under a 1.5 °C global warming scenario. *Front. Environ. Sci*. 7: 102, doi:10.3389/fenvs.2019.00102.

Sugiyama, S., M. Minowa & M. Schaefer (2019). Underwater ice terrace observed at the front of Glaciar Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia. *Geophysical research letters*, 46(5): 2602-2609.

Thomas, E. R., J. M. van Wessem, J. Roberts, E. Isaksson, E. Schlosser, T. J. Fudge, P. Vallelonga, B. Madley, J. Lenaerts, N. Bertler, M. van den Broeke, D. Dixon, M. Frezzotti, B. Stenni, M. Curran, & A. Ekaykin. (2017). Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 years. *Clim. Past* 13, 1491–1513, doi: 10.5194/cp-13-1491-2017.

Thompson, D. W. J., S. Solomon, P. J. Kushner, M. H. England, K. M. Grise & D. J. Karoly (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nat. Geosci*. 4: 741-749.

Turner, J., H. Lu, I. White, J. King, T. Phillips, J. S. Hosking, T. J. Bracegirdle, G. J. Marschall, R. Mulvaney, & P. Deb (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature* 535: 411-415.

Turner, J., S. R. Colwell, G. J. Marschall, T. A. Lachlan-Cope, A. M. Carleton, P. D. Jones, V. Lagun, P. A. Reid & S. Iagovkina (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol*. 25:279-294, doi:10.1002/joc.1130.

Turner, J., T. Phillips, G. J. Marschall, J. S. Hosking, J. O. Pope, T. J. Bracegirdle, & P. Deb (2017). Unprecedent springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophys. Res. Lett*., 44: 6868–6875, doi:10.1002/2017GL073656.

Turner, J. (2015). Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump. *Progr. Oceanogr*. 130, 205–248. https://doi.org/10.1016/j.pocean. 2014.08.005.

Waller, C. L., H. J. Griffith, C. Waluda, S. Thorpe, I. Loaiza, B. Moreno, C. Paherres & K. Hughes (2017). Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research. *Sci. Tot. Environ*. 598: 220-227.

REFERENCIAS

Wefer, G., G. Fischer, D. Fuetterer & R. Gersonde (1988). Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Res*. 35: 891-898.

Willis, M. J., A. K. Melkonian, M. E. Pritchard, & A. Rivera (2012). Ice loss from the Southern Patagonian ice field, South America, between 2000 and 2012. *Geophysical research letters*, 39(17).

Zemp, M. & 38 co-signatories (2019b). Boost glacier monitoring. *Nature* 576: 39.

Zemp, M., M. Huss, E. Thibert, N. Eckert, R. McNabb, J. Huber, M. Barandun, H. Machguth, S. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, L. Thomson, F. Paul, F. Maussion, S. Kutuzov & J. Cogley (2019a). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568: 382-386.

Zhang, Y., S. Kang, C. Li, T. Gao, Z. Cong, M. Sprenger, Y. Liu, X. Li, J. Guo, M. Sillanpää, K. Wang, J. Chen, Y. Li & S. Sun (2017). Characteristics of black carbon in snow from Laohugou No. 12 glacier on the northern Tibetan Plateau. *Sci. Total Environ.* 607- 608, 1237–1249. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.100.

Zheng, F. & J. Y. Yu (2017). Contrasting the skills and biases of deterministic predictions for the two types of El Niño. *Adv. Atmos. Sci*. 34, 1395–1403.

Zhenmim, L. & P. Espinosa (2019). Tackling climate change to accelerate sustainable development. *Nature Clim Change*, 9: 493-496.

MESA CRIÓSFERA Y ANTÁRTICA

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

TIME FOR ACTION
COP25 CHILE 2019

COMITÉ CIENTÍFICO DE CAMBIO CLIMÁTICO