

Gradientes Climáticos y su alta influencia en los ecosistemas terrestres de la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile

FRANCISCO AGUIRRE¹ ✉, FRANCISCO A. SQUEO², DAVID LÓPEZ³, RAMIRO D.⁴, BRIAN BUMA⁵, DANNY CARVAJAL⁶, RICARDO JAÑA⁷, GINO CASASSA⁸ & RICARDO ROZZI⁹

1. <https://orcid.org/0000-0001-7546-0106>, francisco.aguirre@umag.cl

2. <https://orcid.org/0000-0003-3559-0250>; 3. <https://orcid.org/0000-0002-0846-8789>;

4. <https://orcid.org/0000-0001-8583-5936>; 5. <https://orcid.org/0000-0003-2402-7737>; 6. <https://orcid.org/0000-0003-3216-8329>;

7. <https://orcid.org/0000-0003-3319-1168>; 8. <https://orcid.org/0000-0002-7888-071X>; 9. <https://orcid.org/0000-0001-5265-8726>

OPEN ACCESS

RESUMEN

Recibido:

06/02/2021

Revisado:

10/07/2021

Aceptado:

08/12/2021

Publicado en línea:

31/12/2021

Editora invitada:

Dra. Francisca Massardo Sección especial: Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos y Parque Marino Islas Diego Ramírez-Paso Drake. ISSN 0718-686X

La Reserva de Biosfera Cabo de Hornos (RBCH) alberga una biodiversidad y tipos de ecosistemas únicos a nivel mundial. Éstos han sido mucho menos estudiados que sus homólogos, los ecosistemas subpolares del hemisferio norte. El objetivo de este trabajo es presentar por primera vez una detallada descripción de los marcados gradientes climáticos de la RBCH y examinar cómo éstos se interrelacionan con la distribución de ecosistemas y formaciones vegetacionales. Primero, se generó una caracterización de la distribución espacial de los ecosistemas terrestres definidos por sus especies vegetales dominantes o características físicas marcadas. En segundo lugar, se realizó una caracterización espacial de las principales variables climáticas físicas (temperatura, precipitación, velocidad del viento y la cubierta de nieve) de la RBCH utilizando tanto productos satelitales (MOD10CM) como productos climáticos grillados (CR2MET y ERA5). Éstos fueron luego contrastados con registros empíricos de las estaciones meteorológicas que son administradas por la Armada de Chile y/o la Dirección General de Aguas (DGA). En tercer lugar, se caracterizaron los gradientes climáticos en base a un Análisis de Componentes Principales (PCA) con las variables climáticas más representativas aquí analizadas: velocidad del viento, temperatura de verano, elevación, cubierta de nieve y precipitación anual.



CÓMO CITAR:

Aguirre *et al.* (2021).
Gradientes climáticos y su alta influencia en los ecosistemas terrestres de la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. Anales Instituto de la Patagonia, <https://doi.org/10.22352/AIP202149012>

Contribución de los autores:

FS, FA y RR: participaron en el diseño y estructura del manuscrito y en continuas revisiones generales.

DL, FA y FA: participaron en el diseño de las coberturas cartográficas aquí utilizadas.

DC, FS y FA: trabajaron en la metodología estadística de los gradientes climáticos y ambientales.

RC y BB: aportaron y complementaron el manuscrito desde su experiencia en estudios ecosistémicos y cartográficos (metodología y marco teórico)

GC y RJ: aportaron en discusión y justificación de las variables climáticas a utilizar en el trabajo presentado.

Declaración de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Financiamiento:

Sin financiamiento.

Se detectaron dos comportamientos (gradientes) muy nítidos: (i) uno con forma concéntrica asociado principalmente a la cubierta de nieve, temperaturas de verano y la elevación; y (ii) un patrón caracterizado por la precipitación (>50%) con una orientación inclinada en dirección noroeste (mayor precipitación) a sureste (menor precipitación) asociado con una tasa de disminución de precipitación a lo largo de 100 kilómetros de 30 mm/km (~54°S). En cuarto lugar, se analizó la interrelación entre estos gradientes climáticos y la distribución de ecosistemas para la definición de los gradientes ambientales utilizando Componentes Canónicos (CCA) obteniendo una Inercia restringida de 0,74. Ambos gradientes climáticos influyeron significativamente sobre la distribución de los principales tipos de ecosistemas terrestres aquí descritos. Éstos se segregan principalmente por los gradientes de la elevación y la precipitación: los ecosistemas de glaciares, vegetación altoandina, bosque siempreverde y deciduos. La precipitación es el principal factor que segrega la distribución de los bosques siempreverde y de bosques mixtos (siempreverde-deciduos) y/o deciduos. Por otra parte, la distribución de los ecosistemas de turberas y praderas se asocia principalmente con la intensidad de los vientos en zonas más expuestas. Estudios recientes indican que cambios en el régimen de precipitación y temperatura, forzado principalmente por el Modo Anular del Sur (SAM) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), han favorecido el avance hacia mayores altitudes de los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*). Este ascenso en el gradiente altitudinal de los ecosistemas forestales genera una constricción en el área de los ecosistemas altoandinos ubicados por sobre el límite arbóreo. Por lo tanto, en el escenario de calentamiento global una de las floras más amenazadas en la RBCH corresponde a la flora subantártica altoandina.

Palabras clave: cambio climático, calentamiento global, conservación, ecorregión subantártica de Magallanes, subpolar.

Climatic gradients and their high influences on terrestrial ecosystems of the Cape Horn Biosphere Reserve, Chile

ABSTRACT

The Cape Horn Biosphere Reserve (Reserva de Biosfera Cabo de Hornos; RBCH) contain a unique type of biodiversity and ecosystems throughout the world. This environment had been less studied than their counterparts, the subpolar ecosystems of the Northern Hemisphere. The objective of this work is to present, for the first time, a detailed description of the marked climatic gradients of the RBCH and to examine how these are interrelated with the distribution of ecosystems and its vegetation formations. First, a characterization of the spatial distribution of terrestrial ecosystems defined by their dominant plant species or very marked physical characteristics was generated. Second, a spatial characterization of the main climatic-physical variables (temperature, precipitation, snow cover and wind speed) was created for the RBCH using both remote sensing product (MOD10CM) and gridded climate products (CR2MET and ERA5), these data were then contrasted with empirical records of the meteorological stations that are administered by the Chilean Navy and/or the General Water Directorate (DGA). Third, the climatic gradients were characterized based on a Principal Component Analysis (PCA) with the most characteristic climatic variables here analysed: wind speed, summer temperature, elevation, snow cover and annual precipitation. We found two very marked behaviours (gradients): (i) a concentric shape mainly associated with snow cover, summer temperatures and the elevation; and (ii) a pattern characterized by precipitation (>50%) with an inclined orientation from north-west (greater precipitation) to south-east (less precipitation), with a decreasing rate of precipitation over 100 kilometres of 30 mm/km ($\sim 54^\circ\text{S}$). Fourth, the interrelation between these climatic gradients and the distribution of ecosystems was analysed for the definition of environmental gradients using Canonical Components (CCA) with a constrained Inertia of 0.74. Both climatic gradients had a marked influence on the distribution of the main types of described terrestrial ecosystems. These are segregated mainly by the gradients of elevation and rainfall: glacial ecosystems, high-Andean vegetation, evergreen and deciduous forest. Precipitation is the main factor that segregates the distribution of evergreen forests and mixed forests (evergreen-deciduous) and/or deciduous. On the other hand, the distribution of peatland and grassland ecosystems is mainly associated with the intensity of winds in more exposed areas. Recent studies indicate that changes in the precipitation and temperature regime, mainly forced by the Southern Annular Mode (SAM) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO), have favoured the advance towards higher altitudes of the Lenga (*Nothofagus pumilio*) forests. This rise in the altitudinal gradient of forest ecosystems generates a constriction in the area of high-Andean ecosystems located above the treeline. Therefore, in the global warming scenario, the high-Andean subantarctic flora is one of the most threatened floras in the RBCH.

Key words: climate change, global warming, conservation, sub-Antarctic Magellanic ecoregion, subpolar.

INTRODUCCIÓN

El estudio del clima aborda un sistema complejo de interacciones en distintas escalas de tiempo que integra los subsistemas atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biosfera (Stocker *et al.* 2013). Entre estos subsistemas se genera un intercambio continuo de materia y energía multidireccional. En este régimen de interacciones, las condiciones climáticas (*i.e.*, régimen de lluvias, el balance hídrico, temperaturas, intensidad de los vientos y la cobertura de nieve) influyen sobre los patrones fenológicos de especies animales y vegetales, la distribución y composición de especies (Woodward *et al.* 1995). A su vez, las condiciones climáticas locales son influidas por variaciones en la cobertura vegetacional (Foley *et al.* 2003) y el contenido de agua (líquida y sólida) de la superficie de la tierra (Aguirre *et al.* 2018).

Para comprender la variabilidad climática y sus interacciones con la biota y ecosistemas, el amplio territorio de la Reserva de Biosfera Cabo de Hornos (RBCH, 19.435 km² de superficie terrestre ubicada entre los paralelos 54-56°S y meridianos 66-72.5°O) ofrece un caso de estudio ideal (Mansilla *et al.* 2012). Este territorio contiene los ecosistemas forestales más australes del mundo, pero han sido muy poco estudiados en comparación a sus equivalentes del hemisferio norte (Buma *et al.* 2021; Rozzi & Jiménez, 2014; Rozzi *et al.* 2012). También alberga un centro de diversidad de briofitas (musgos y hepáticas) y líquenes a nivel mundial, con un alto grado de endemismo en un 60% de las especies (Rozzi, 2018). Pese a estas características únicas, la relación entre la biodiversidad y la variabilidad climática ha sido poco estudiada en estos ecosistemas. Por ejemplo, existe una escasez de estaciones meteorológicas tanto en su densidad espacial como cobertura temporal, lo que dificulta describir adecuadamente la variabilidad espaciotemporal del clima y su relación con la biodiversidad en esta región remota. Esta falta instrumental limita especialmente el estudio de variaciones temporales y espaciales de la precipitación, con casi completa ausencia de registros en la vertiente occidental de los Andes australes (Garreaud *et al.* 2013).

Este trabajo tiene como objetivo realizar por primera vez una construcción de campos climáticos y ecosistémicos en el extremo austral de América, caracterizando tanto las variaciones espaciales de las formaciones vegetacionales como los gradientes climáticos predominantes en la RBCH y sus interrelaciones, sentando las bases para futuros estudios de cambio climático en estas latitudes.

Las preguntas específicas que se abordarán son: ¿Cómo representar los gradientes climáticos presentes en la RBCH utilizando dos productos climáticos disponibles (CR2MET basado en observaciones y ERA5 reanálisis a escala global)? ¿Cómo evaluar la representación de los gradientes climáticos representados a partir de estos productos grillados contrastándolos con datos empíricos registrados en estaciones meteorológicas presentes en la RBCH? ¿Cómo se interrelacionan los gradientes climáticos con la distribución de las formaciones vegetacionales en la RBCH? ¿Cuáles son los principales ecosistemas terrestres, cómo se definen y cómo se distribuyen espacialmente en la RBCH?

Caracterización climática

La interacción del clima con la intrincada topografía del extremo sur del continente americano está dominada, en gran medida, por la corriente de los vientos del oeste localizada entre el centro de altas presiones del océano Pacífico suroriental (SPH según su sigla en inglés)

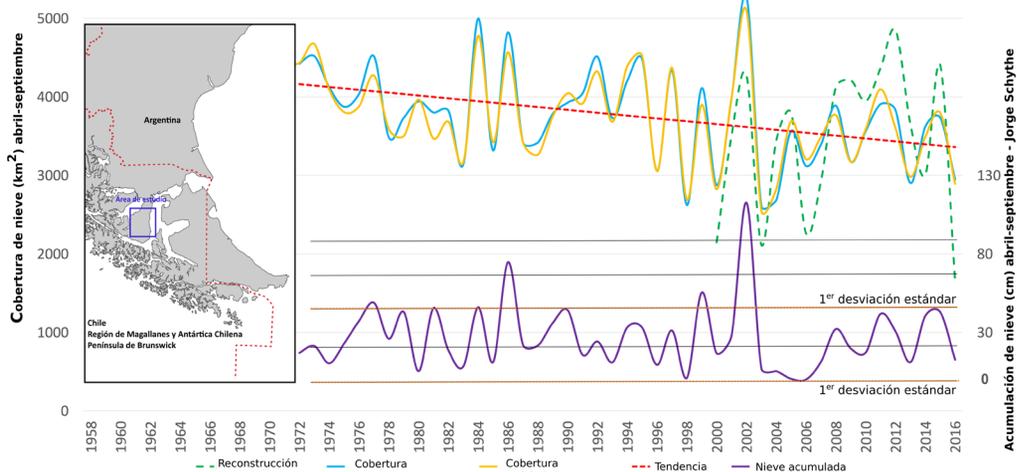
y el cinturón circumpolar de bajas presiones que rodea el continente antártico (Aguirre *et al.* 2018). Esta corriente de vientos es perturbada por los Andes australes y los Andes fueguinos (o cordillera Darwin) produciendo uno de los gradientes de precipitación más extremos de la Tierra (Carrasco *et al.* 2002; Garreaud *et al.* 2013). Tanto el desplazamiento estacional norte-sur del SPH como del cinturón circumpolar son los principales forzantes del flujo de este campo de vientos y definen las trayectorias de los sistemas frontales de baja presión que cruzan la Patagonia y Tierra del Fuego, siendo responsables de grandes volúmenes de agua precipitada en su vertiente occidental, con una frecuencia anual de días con precipitaciones del orden del 85% (Carrasco *et al.* 2002). Las precipitaciones decrecen abruptamente una vez que las masas de aire cruzan hacia la vertiente oriente de la cordillera, donde el efecto Föhn refuerza condiciones más secas (Aguirre *et al.* 2018; Weidemann *et al.* 2013). En cordillera Darwin (Tierra del Fuego), los Andes cambian a una orientación oeste-este y se modifica este flujo generando un contraste de mayor precipitación en su vertiente suroccidental respecto a condiciones más secas en su vertiente nororiental (Weidemann *et al.* 2020). Un estudio reciente basado en 17 años de registros meteorológicos en un transecto longitudinal (oeste-este), ha registrado un caso extremo de disminución de precipitaciones anuales desde 6.100 mm en Estación Paso Galería, en Gran Campo Nevado (52°45'S; 73°01'O) a 590 mm en Punta Arenas (53°08'S; 70°53'O); es decir, en un transecto oeste-este de solo 150 kilómetros la precipitación anual disminuye más de un orden de magnitud (Weidemann *et al.* 2018).

Sumado a este gradiente longitudinal extremo de precipitación, esta zona austral también se caracteriza por un marcado gradiente altitudinal con pendientes pronunciadas y una topografía heterogénea, generando a su vez un mosaico de vegetación que va desde turberas, bosques y matorrales a vegetación altoandina (Pisano, 1980; Rozzi & Jiménez, 2014). Este gradiente vertical de temperatura está comprimido en relación con los gradientes altitudinales del resto de Chile. En efecto, mientras que en la zona norte la isoterma 0oC se puede encontrar a los 4.500 msnm, en la ecorregión subantártica no supera los 1.000 msnm (Carrasco *et al.* 2008) lo que permite pasar de un piso vegetacional a otro en pocos cientos de metros.

Estudios sobre la cubierta de nieve estacional, componente crítico de la criósfera y por consiguiente del sistema climático a nivel local, regional como global (Aguirre *et al.* 2018; Chen *et al.* 2018) identifican una disminución significativa en la extensión de la cubierta nival de un 19% para los últimos 45 años, atribuida a un aumento significativo de las temperaturas invernales (0,71°C) en la península de Brunswick (~53°S), región de Magallanes (Fig. 1), lo que muestra lo sensible de esta zona a cambios en el balance de masa y energía de la capa de interface superficial de la atmósfera que tiene una estrecha relación con los diferentes componentes del sistema terrestre (Frei *et al.* 2012).

La ecorregión subantártica de Magallanes (Mansilla *et al.* 2012) tiene una ubicación clave para el estudio del cambio climático y sus interacciones con los ecosistemas, debido a su extensión única y continua en el hemisferio sur más allá de los 45°S (Garreaud *et al.* 2013), llegando hasta los 56°S en isla Hornos (Rozzi *et al.* 2020). Esta es considerada un "hotspot" de registros paleoclimáticos que han registrado, a escala de cientos y miles de años, abruptos cambios en el régimen de circulación de los vientos y temperaturas atmosféricas asociados a cambios globales, que incluyen testigos de hielo, registros de cambios glaciares, estudios en sistemas de turberas y en testigos de sedimentos marinos y lacustres, y estudios de anillos de crecimiento de árboles (Markgraf & Huber, 2010; Villalba *et al.* 2009).

Fig. 1. Reconstrucción de la variabilidad de la cubierta de nieve en la península de Brunswick para el periodo 1972-2016 (imagen modificada de Aguirre *et al.* 2018).



CARACTERIZACIÓN DE ECOSISTEMAS TERRESTRES

Para la caracterización y definición de los ecosistemas terrestres, se agruparon en este trabajo los ecosistemas asociados a sus especies de plantas dominantes o características físicas muy marcadas, como en el caso de los glaciares y los cuerpos de agua. A continuación, se identifica cada uno de ellos:

Bosques siempreverde

Este ecosistema está caracterizado por los bosques siempreverde subantárticos de Magallanes dominados por la especie arbórea *Nothofagus betuloides* o coigüe de Magallanes, junto con otras especies perennes como *Drimys winteri* (canelo) y *Maytenus magellanica* (leñadura). Corresponde a un bosque húmedo conviviendo como parte de su matriz con el complejo de tundra de Magallanes, con abundancia de musgos, hepáticas, líquenes y hongos (Pisano, 1980; Rozzi *et al.* 2007). En su parte más occidental también se puede encontrar los rodales más australes de ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron uviferum*). De forma adicional a estas especies perennes, se suman las áreas de bosques mixtos, donde este complejo vegetal se mezcla con otras especies deciduas como *Nothofagus pumilio* (lenga).

Bosque deciduo

Este tipo de ecosistema forestal deciduo está caracterizado por la dominancia de lenga, y si bien en varias áreas se encuentra incluido dentro de la matriz del bosque siempreverde, aquí se torna dominante.

Altoandino y Líquenes Saxícolas

Sobre el límite de vegetación arbórea, existen condiciones ambientales que permiten encontrar hábitats altoandinos, caracterizados por una gran diversidad de líquenes (representados aquí como líquenes Saxícolas), plantas de cojín, arbustos y árboles postrados en forma de *krumholz*

(término en alemán para retorcido, doblado) (Rozzi *et al.* 2007). Entre ellos se puede encontrar el piso vegetacional de matorral bajo templado-antiboreal andino de *Bolax gummifera* y *Azorella selago*, considerados como ecosistemas frágiles y poco estudiados (Luebert & Pliscoff, 2006).

Glaciares y nieve estacional

Contenida dentro de la RBCH se encuentra la cordillera Darwin, el tercer campo de hielo temperado más grande del hemisferio sur y el más austral (~54°S) (Melkonian *et al.* 2013) a 2605 km² temperate icefield in southern Chile (69.6°W, 54.6° S, con un área continua de hielo de 1.760 km² que se distribuye a lo largo de 250 kilómetros (Meier *et al.* 2018) y que presenta un espesor estimado de hielo promedio de 82 metros y un máximo de 936 metros (Carrivick *et al.* 2016). Estos ríos de hielo han sido considerados como ambientes inhóspitos y abióticos debido a las extremas condiciones imperantes en estos ecosistemas (bajas temperaturas, flujo continuo de hielo, alta radiación UV y la limitación de nutrientes) y simplemente un depósito de microorganismos atrapados transportados por el viento (Cowan & Tow, 2004). Sin embargo, varios organismos viven en los glaciares y cobertura nival. Microorganismos fotosintéticos, como algas de nieve y cianobacterias, crecen sobre la superficie glaciar sustentando a organismos heterótrofos como insectos (*e.g.* dragón de la Patagonia, *Andiperla willinki*), lombrices de hielo, bacterias y hongos, entre otros (Kohshima, 1985; Kohshima *et al.* 2007; Santibáñez *et al.* 2008, 2011; Takeuchi, 2011; Takeuchi & Kohshima, 2004; Vera *et al.* 2012). Si bien este campo no ha sido muy explorado en Tierra del Fuego, existe evidencia que los fuertes vientos imperantes en la zona generan un arrastre de partículas de polvo provenientes de diferentes partes del globo, que a su vez contienen bacterias, virus, hongos, semillas, pequeñas plantas e insectos, entre otros, creando diferentes y dinámicos ecosistemas sobre la nieve y el hielo (Miteva, 2008).

Adicionalmente, también existe una dependencia estrecha entre la criósfera y el sistema marino. La producción biológica existente en los fiordos australes tiene una fuerte dependencia de los patrones estacionales del aporte de agua dulce (por precipitación, aporte glaciar y nival), cobertura de glaciares y régimen de luz (Vera *et al.* 2012).

Praderas y turberas

Este ecosistema integra el complejo de tundra de Magallanes y sistemas de praderas. El sistema de tundra incluye las formaciones vegetacionales de: tundra de *Sphagnum* (turberas formadas por el musgo del género *Sphagnum*), donde se presenta también la mirtácea más pequeña a nivel global (*Myrteola numularia*); tundra de plantas en cojín, dominada por una matriz de plantas en cojín del género de las *Astelia*, *Azorella*, *Laretia* y *Bolax*; zonas de humedales dominadas por juncácea *Marsippospermum grandiflorum* (Rozzi *et al.* 2007). Por otro lado, las praderas están conformadas por gramíneas de origen natural o como el resultado de perturbaciones humanas, como la apertura de zonas de pastoreo. Las praderas naturales incluyen formaciones dominadas por gramíneas del género *Festuca* y algunas especies del género *Stipa* (Pisano, 1981). Para este estudio no se separaron las praderas naturales (periglaciales y asociadas a otras perturbaciones naturales) de las praderas antrópicas derivadas principalmente de actividades ganaderas en isla Navarino e islas aledañas (Rozzi *et al.* 2006).

Lagos

El ecosistema de lagos está asociado a los sistemas dulceacuícolas. La gran actividad glaciaria de esta zona, desde el último máximo glaciario (Glasser *et al.* 2008), ha dado lugar a numerosos cuerpos de agua, como lagos y lagunas, e infinidad de riachuelos y arroyos que bajan desde las montañas hasta los fiordos. En estos sistemas de agua dulce aún habitan especies de peces nativos de la familia Galaxiidae (Anderson *et al.* 2006; Moorman *et al.* 2006) y una gran biodiversidad de microinvertebrados con una alta tasa de endemismo y bien adaptada a aguas de bajas temperaturas (Contador *et al.* 2014; Rendoll Cárcamo *et al.* 2019).

METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, las variables climáticas tienen una fuerte interacción con las diferentes comunidades de plantas, y las especies que las conforman, dado que poseen distintos requerimientos ambientales abióticos, tales como la luz, temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes del suelo, entre otros. Cuando estos factores abióticos se alejan de los valores óptimos, la abundancia de determinada especie disminuye y eventualmente es reemplazada por otra comunidad. Esta curva de abundancia limitada por factores abióticos, en nuestro caso variables climáticas, es considerada como el gradiente ambiental (Kent, 2011). Por lo tanto, para responder las preguntas de este trabajo, se requiere tanto la espacialización de los ecosistemas terrestres de la RBCH como también la espacialización de principales variables climáticas que tienen tendencias de cambio en las últimas décadas (Aguirre *et al.* 2018).

Representación climática y su evaluación

Para tener una representación climática (definida aquí como un promedio de 20 años, debido a los datos disponibles meteorológicos y cobertura nival utilizada) distribuida espacialmente dentro del amplio territorio que comprende la RBCH, primero se comparan dos productos climáticos grillados derivados de datos observacionales históricos (reanálisis), que son frecuentemente utilizados para la representación climática en ambientes remotos con escasa representatividad de mediciones meteorológicas (*i.e.* Sato & Inoue, 2018; Wang *et al.* 2019). El primero de ellos es el reanálisis climático global ERA5¹, sucesor de ERA-Interim (Balsamo *et al.* 2015), el que combina una gran cantidad de datos observacionales históricos (*i.e.*, estaciones meteorológicas y productos satelitales) con procesos de modelación y asimilación de datos, y actualmente posee una resolución espacial de 0,25° (C3S 2017). El segundo de ellos es el producto chileno CR2MET², que se basa parcialmente en un re-escalamiento estadístico ("statistical downscaling" en su definición en inglés) del reanálisis global ERA-Interim, utilizando múltiples modelos de regresiones lineales para transferir las diferentes variables climáticas a una escala de 0,05° de resolución espacial (Álvarez-Garretón *et al.* 2018). Las variables aquí utilizadas son las públicamente disponibles para CR2MET (temperatura y precipitación) y para ERA5 las variables más representativas de los procesos fenológicos de las plantas y con clara variabilidad espacial: temperatura, precipitación total y velocidad del viento zonal (vector oeste-este del viento, componente U), dado su alta correlación entre el comportamiento de los vientos del oeste y la precipitación en el margen occidental entre 40~55°S (Moreno *et al.* 2010), como también su alta

¹ Datos horarios a nivel de superficie, descargados desde <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/>

² Descargado el producto versión 2.0 horario desde <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

correlación con los cambios de temperatura detectados en estas latitudes (Aguirre *et al.* 2018). Para realizar las evaluaciones entre ellos, se efectuó la descarga de los productos en resolución horaria, realizando las agrupaciones diarias, estacionarias y anuales para su evaluación.

Posteriormente, se compararon las variables comunes entre los dos productos climáticos ERA5 y CR2MET (temperatura superficial y precipitación total) utilizando datos de estaciones meteorológicas de referencia. Adicionalmente a estos productos de reanálisis, se utiliza un promedio anual de la cobertura de nieve, como promedio para el periodo 2000-2019, con el producto satelital MOD10CM v.6 (<https://ndbc.org/data/MOD10CM/version/6>) de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Sensor* (MODIS) que entrega un valor % de cobertura mensual de nieve con una resolución de 0.05° (~5 kilómetros).

Para procesar y representar los datos de los reanálisis se utiliza la herramienta *Climate Data Operator*, CDO, (Schulzweida, 2019), datos que posteriormente fueron exportados a formato raster (GeoTiff), mediante GDAL (GDAL/OGR contributors, 2020), para su post proceso en QGIS v.3.14 (QGIS Development Teams 2020). Para ambas bases de datos se procesaron los promedios anuales y estacionales, para cada una de las variables en cada pixel, considerando el periodo entre el 2000 al 2019. Para la comparación entre los modelos y datos reales medidos en estaciones meteorológicas, se extrajeron las series de tiempo (utilizando CDO con una interpolación bilineal) entre los periodos comunes. Para procesar el producto MOD10CM se utiliza el software HEG:HDF-EOS v.2.15 y el paquete de R *raster* (Hijmans & van Etten, 2016).

Los datos de referencia que se utilizan, buscando una amplia distribución espacial dentro de la RBCH, corresponden a mediciones discretas de temperatura y precipitación realizadas por la Armada de Chile³ (observaciones cada 3 horas) en las Alcaldías de Mar ubicadas en isla Gonzalo en el archipiélago Diego Ramírez, isla Hornos en el archipiélago Cabo de Hornos y Puerto Williams en isla Navarino, y la estación meteorológica automática de la Dirección General de Aguas⁴ ubicada en Caleta 2 de Mayo, bahía Yendegaia. Estas no son las únicas estaciones meteorológicas en la zona, la Tabla 1 y Fig. 2 identifican todas las estaciones meteorológicas dentro de la RBCH.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas en la RBCH. En la Fig. 2 se muestra la ubicación espacial de estas estaciones.

Red	Nombre	Latitud	Longitud	Variabes	Periodo
DGA	Bahía Yendegaia	-54.866	-68.89	Precip-Temp-HR	2011-actual
	Puerto Navarino	-54.9256	-68.3236	Precip-Temp-HR	2011-actual
	Río Róbalo PW	-54.9469	-67.6392	Precip-Temp	2011-actual
	Róbalo Alto	-54.9769	-67.6744	Precip-Rad	2011-actual
	Puerto Toro	-55.0822	-67.0758	Precip-Temp-HR	2011-actual
	Fouque	-55.1365	-69.5389	Precip-Temp-HR-Pres-Rad-Vel-Di	2019-actual
DMC	Puerto Williams (GMZ)	-54.9317	-67.6156	Precip-Temp-HR-Pres	1960-actual

³ Base de datos pública disponible a través de contacto directo con climatologia@directemar.cl

⁴ Base de datos pública en https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_main/dgasat_main.htm

Omora-IEB	Lakutaia - PW	-54.9320	-67.6152	Precip-Temp-HR-Pres-Rad-Vel-Dir Pres - Temp y Hum. de suelo	2010-actual
Armada de Chile	Puerto Williams	-54.9339	-67.6089	Precip-Temp	*2013-actual
	I. Hornos	-55.965	-67.2099	Precip-Temp	*2013-actual
	I. Gonzalo	-56.4829	-68.7169	Precip-Temp	*2013-actual
GABY-VASA project	AWS(R) Schiaparelli	-54.4053	-70.8883	Precip-Temp-HR-Rad-Vel-Dir	2013-actual
	AWS(G) Schiaparelli	-54.4	-70.8823	Temp-HR-Pres-Rad-Vel-Dir	2013-actual
Charlie Porter	AWS Pia	-54.8903	-69.7275	Precip-Temp-Pres-Rad	2002-actual
	AWS Ainsworth	-54.4211	-69.5661	Precip-Temp-HR-Pres-Rad-Vel-Dir	2011-2015
	AWS Marinelli	-54.5171	-69.5763	2 Timelapse-Precip-Temp	** - 2015
	AWS Diablo	-54.9558	-69.125	Precip-Temp-HR-Pres-Vel-Dir	** - 2016
	AWS Cloue	-55.1287	-69.986	Precip-Temp-HR-Pres-Rad	2002 - 2016

* Información disponible en formato digital / ** fecha de instalación desconocida

Si bien las estaciones meteorológicas presentadas en la Tabla 1 no se encuentran todas operativas, es relevante mencionarlas ya que contienen información valiosa del periodo en que estuvieron en funcionamiento, y además presentan la oportunidad de impulsar y continuar con el monitoreo climático en estos puntos. La información contenida en la red de estaciones meteorológicas de Charlie Porter (quien fue un gran explorador e impulsor del monitoreo del cambio climático en esta remota zona de canales y fiordos) fue proporcionada vía comunicación personal por Eñaut Izagirre Estibaritz. La estación más recientemente instalada (2019), en una expedición conjunta DGA-IEB-Omora, corresponde a la estación de la DGA Fouque, ubicada frente al glaciar que lleva el mismo nombre y que corresponde al glaciar más austral de América que se encuentra en contacto con el mar. Del total de estaciones operativas, el 50% (7 estaciones automáticas) se encuentra concentrado en la isla Navarino. Las estaciones de Charlie Porter y Schiaparelli pertenecen a productos de proyectos que aún no han sido considerados en las redes de bases de datos a libre disposición.

Respecto al análisis de calidad de los registros meteorológicos, existen criterios contradictorios, ya que por una parte se indica la existencia de datos "erróneos" que pueden alterar el análisis de las series de tiempo y que deben filtrarse, y por otra se menciona que estos métodos de control de calidad pueden excluir registros (Easterling *et al.* 2016) que muchas veces desestiman valores extremos útiles para el análisis climático (Mudelsee, 2014). Para este trabajo, en consecuencia, no se aplican test estadísticos adicionales para validaciones de datos ni rangos de confianza para exclusión de valores extremos. Los datos de la Armada fueron procesados y ordenados desde los archivos en formato pdf con las librerías de Python tabula⁵ y pandas (The pandas development team 2020).

⁵ <https://github.com/tabulapdf/tabula-java>

⁶ Disponible en https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursos_hidricos/Inventario_glaciares/Paginas/default.aspx

Para la evaluación entre los datos meteorológicos de los modelos y las estaciones de monitoreo se utilizan diagramas de Taylor que incorporan, de forma gráfica, la desviación estándar, correlación de Pearson y el error cuadrático medio (RMSE en su sigla en inglés) (Flato *et al.* 2014; Gleckler *et al.* 2008). Adicionalmente, se evaluaron los histogramas de las series de tiempo y el coeficiente de correlación de Spearman, ya que los diagramas de Taylor se asocian al coeficiente de correlación de Pearson que usualmente no es útil para medir la dependencia entre series con distribuciones no normales, como es el caso de la precipitación (Maraun & Widmann, 2018).

DATOS DE ECOSISTEMAS TERRESTRES

Las coberturas de los ecosistemas terrestres utilizadas se basan en una combinación entre las coberturas de bosques publicadas por Hansen y colaboradores (2013), el Inventario Público de Glaciares desarrollado por la Dirección General de Aguas (DGA), del Ministerio de Obras Públicas de Chile (2014)⁶, el modelo digital de terreno SRTM v3⁷, y la cobertura vegetacional publicada por Rozzi y colaboradores (2007). Los criterios para la confección de las diferentes categorías son:

Superficie terrestre

Como base de superficie terrestre se utiliza la información cartográfica digital del IGM escala 1:50.000 actualizada, proporcionada por el SIG Magallanes (<http://www.sigmagallanes.cl>), perteneciente al Gobierno Regional de Magallanes y Antártica Chilena. Toda la información de límites de la RBCH y de ecosistemas fue traspasada a esta base cartográfica. Esta capa de información también incluyó los límites de las áreas silvestres protegidas por el Estado (SNASPE) dentro de la RBCH, utilizando las coberturas oficiales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Bosques

Para la cobertura de bosque, se utiliza la representación global de bosque de la base de datos *Global Forest Change 2000-2015* versión 1.3⁸ que tiene una resolución espacial de 1 arco-segundo por píxel (19 m a la latitud del área de estudio). De esta base, se usa específicamente la capa Hansen_GFC-2015-v1.3_treecover2000_50S_070W.tif, y se considera bosque cuando la cobertura del píxel supera el 50%. A su vez, el raster se simplifica a unidades mayores de 40 píxeles de bosque y se genera una cobertura de polígonos con bosque. El resultado de esta cobertura se verifica mediante fotointerpretación de imágenes de satélite utilizando una nube de puntos de los centroides de los hexágonos de las unidades de análisis, indicadas más adelante, sobre Google Earth. Se revisaron aleatoriamente más de 50 puntos para la categoría de Bosque y 70 puntos para Turbera/Pradera, encontrando una consistencia de un 100%. Para diferenciar el bosque deciduo (lenga) del siempreverde (coigüe) se incorporó información de campo y opinión de experto (R. Rozzi, com. pers.) y de la cartografía publicada por Rozzi y colaboradores (2007).

Glaciares

Para la cobertura de glaciares, se utilizó directamente el Inventario Público de Glaciares: IG_Patagonia_S_185.shp de 2014 desarrollado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA.

⁷ Disponible en <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/nasa-shuttle-radar-topography-mission-srtm-version-3-0-global-1-arc-second-data-released-over-asia-and-australia>

⁸ https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.3.html

Cuerpos de agua

Para los cuerpos de agua dulce, que incluyen lagos (conectados con otros cuerpos) y lagunas (generalmente desconectadas superficialmente), se utilizan las coberturas extraídas directamente de la cartografía base presente en el SIG Magallanes (<http://www.sigmagallanes.cl>).

Otros ecosistemas

Para las áreas terrestres dentro de la RBCH que no están clasificadas como bosque, glaciar o cuerpo de agua, se utilizan los siguientes criterios para diferenciarlas. Usando el modelo de elevación de terreno SRTM v3 para diferenciar rangos altitudinales, la vegetación sobre el límite arbóreo o su equivalente altitudinal (*i.e.*, 600 msnm) se clasifican como ecosistema altoandino (entre 600 y 800 msnm) y de líquenes saxícolas (> 800 msnm). Bajo los 600 msnm y hasta el nivel del mar, y debido a la imposibilidad de diferenciar la vegetación no boscosa bajo el límite arbóreo, se caracteriza esta zona como praderas/turberas.

INTERACCIONES CLIMA – ECOSISTEMAS TERRESTRES

Para estudiar la interacción entre los ecosistemas terrestres y la caracterización de las variables climáticas, se construye una grilla vectorial de hexágonos, de un área de 25 km² cada uno, que cubre toda el área de la RBCH. Realizando estadística zonal con el software QGIS se extrajeron el promedio de las variables climáticas contenidas en los raster climáticos y la superficie relativa (como porcentaje) de cada categoría de ecosistema terrestre dentro de cada hexágono. Posteriormente, se seleccionan los hexágonos que poseían más de 50% de superficie terrestre, lo que significó 797 unidades de muestreo. Utilizando las herramientas del paquete de R *PerformanceAnalytics* (Peterson *et al.* 2018) se realiza una comparación entre la correlación de Spearman revisando colinealidad de forma separada entre todas las variables climáticas y las variables ecológicas. Con las variables elegidas se realiza un análisis de componentes principales (PCA) y un análisis de componentes canónicos (CCA) según se describe a continuación.

Análisis combinado y detección de gradientes

El análisis de componentes principales (PCA) es una de las técnicas de análisis multivariado más utilizada en el análisis de datos climáticos (Maraun & Widmann, 2018). Sin embargo, usar un PCA incluyendo datos climáticos y biológicos (descripción de ecosistemas terrestres en este caso), asumiendo que la distribución de cada una de las variables biológicas se comporta linealmente con los gradientes climáticos, no es lo más apropiado y es aquí donde el análisis de componentes canónicos (CCA) define mejor este tipo de estudios (Kent, 2011). Su enfoque permite el análisis directo entre dos matrices de datos (también denominado análisis de gradiente directo) en donde la primera matriz (variable dependiente) considera las variables biológicas en estudio y la segunda matriz (variable independiente) integra las variables ambientales observadas en cada sitio muestreado (Eq. 1).

$$\text{vars. bióticas (\% ecosistemas terrestres)} \sim \text{vars. abióticas (variables climáticas)} \quad \text{Eq. 1}$$

El método de análisis empleado utiliza múltiples regresiones para seleccionar una combinación lineal ponderada entre las variables ambientales y variables biológicas que expliquen la mayoría de la varianza (Kent, 2011; Legendre & Legendre, 2012). Por lo anterior, aquí se combina ambos

enfoques. El enfoque PCA se utilizó para determinar los diferentes gradientes climáticos en la zona de estudio, usando las variables meteorológicas que no presentan colinealidad entre ellas. El CCA se empleó para generar el modelo de representación de los ecosistemas terrestres (variable dependiente) a través de estas variables climáticas (variables independientes).

Para la evaluación del PCA se utilizó el porcentaje de la varianza explicada y el cuadrado del coseno (\cos^2) del ángulo del triángulo formado por el punto del origen, la observación y su proyección sobre cada componente principal, empleado para determinar la calidad de la representación de cada componente principal. Respecto al análisis del CCA, se utilizó el factor de inflación de la varianza (VIF en su sigla en inglés) y el criterio de información Akaike (AIC en su sigla en inglés) para la validación del mejor modelo. En CCA, la medida de la variación explicada no es el "verdadero" R^2 , sino una relación de inercias (Legendre & Legendre, 2012). También se utilizaron las correlaciones (función *spenvcor*) entre cada var. biótica vs. var. abiótica del modelo seleccionado, los valores propios restringidos por categoría (*biplot scores* en su definición en inglés, refiriéndose a la correlación multivariada ponderada entre las combinaciones lineales y las restricciones) y los acumulados para todo el modelo. Para la implementación del PCA, se emplearon los paquetes de R *ade4* (Thioulouse & Dray, 2007) y *factoextra* (Kassambara & Mundt, 2017); y para el CCA se utilizó el paquete *vegan* (Dixon, 2003).

RESULTADOS

Ecosistemas terrestres

De los 19.435 km² de superficie terrestre contenidos dentro de la RBCH, el 75,9% está bajo la figura Parque Nacional dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), administrados por CONAF (Fig. 2). La categoría de Parque Nacional es la que actualmente otorga el mayor nivel de protección oficial en Chile (<https://www.conaf.cl/parques-nacionales/parques-de-chile/>). Si bien la figura de Reserva de Biosfera está reconocida por el Estado de Chile, y CONAF es el organismo estatal responsable, no se considera parte del SNASPE.

Los ecosistemas terrestres con mayor presencia en la RBCH corresponden a la categoría de turberas y praderas (10.777 km²), seguidos por la categoría de glaciares (2.998 km²) y los bosques siempreverde (2.965 km²) (Tabla 2, Fig. 2).

Tabla 2. Superficies (en km²) de ecosistemas terrestres en la RBCH.

	Glaciares	Líquenes saxícolas	Alto andino	Bosque siempreverde	Bosque decido	Cuerpos de agua	Turberas y praderas	Total ⁹
PNCH ¹⁰	Sin superficie	Sin superficie	37,8	144,8	Sin superficie	10,2	434,9	627,8
PNAD ¹¹	2.793,8	181,4	771,4	1.511,1	17,0	65,3	7.676,0	13.016,0
PNY ¹²	164,3	213,2	186,0	137,9	190,5	14,8	206,3	1.113,0
Otras ¹³	40,4	83,9	319,2	1.171,2	455,5	148,6	2.459,8	4.678,5
Total	2.998,4	478,5	1.314,4	2.965,0	663,0	239,0	10.777,0	19.435,3

⁹ Pueden existir variaciones por aproximación de decimales

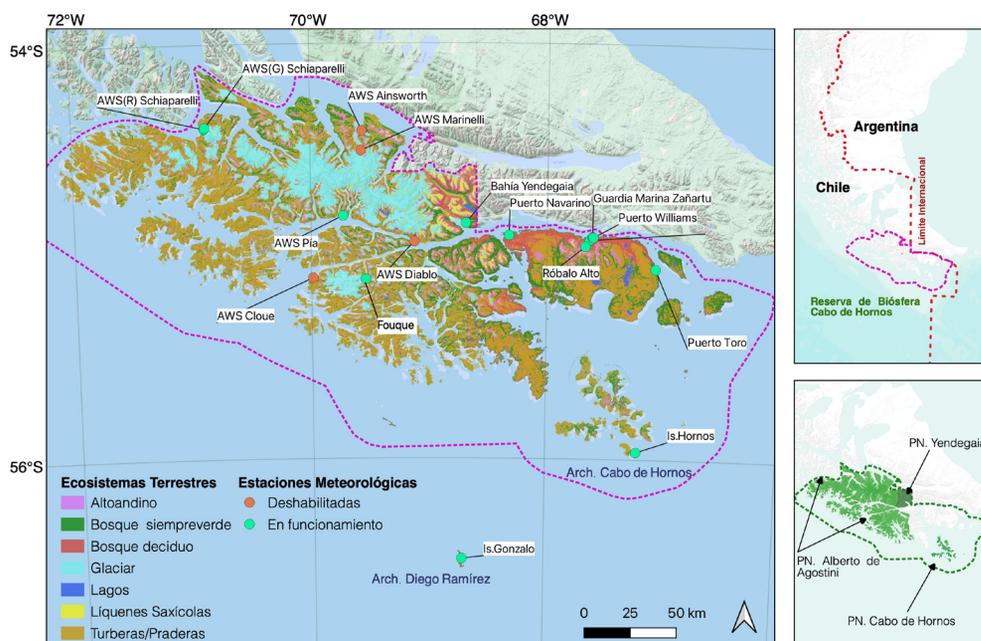
¹⁰ Parque Nacional Cabo de Hornos.

¹¹ Parque Nacional Alberto de Agostini.

¹² Parque Nacional Yendegaia.

¹³ Otra superficie sin estado de protección.

Fig. 2. Zona de estudio.
A: Ubicación general de la zona de estudio.
B: Área de Parques Nacionales dentro de la RBCH.
C: Imagen general de los ecosistemas terrestres. También se muestran los puntos de muestreo de variables meteorológicas indicadas en la Tabla 1.

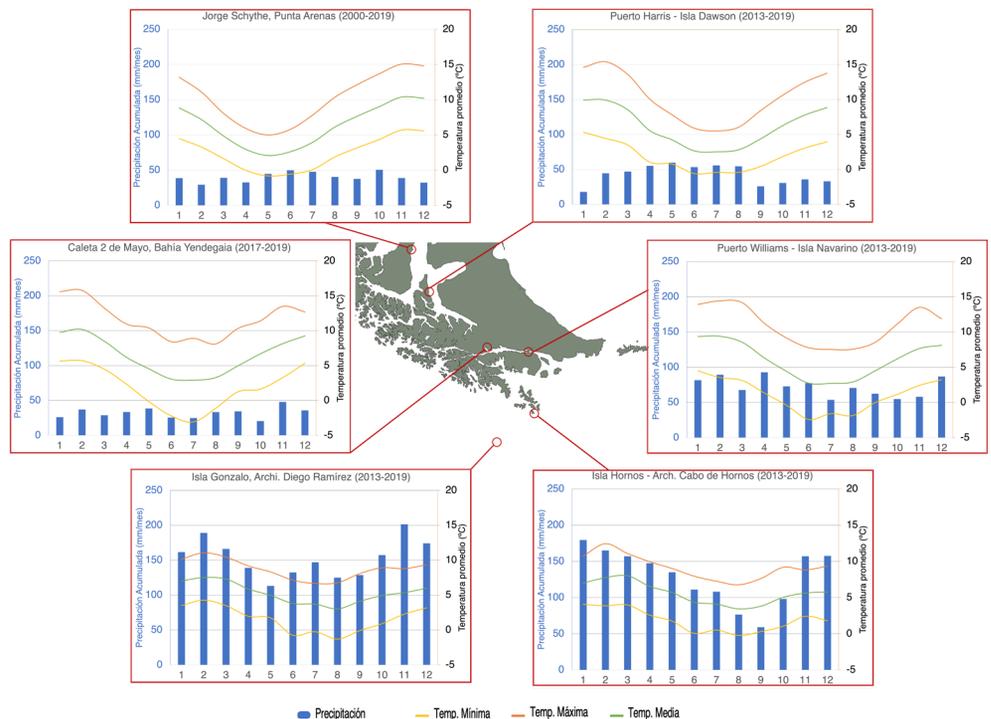


Representación climática

Tal como se menciona en la introducción, la caracterización climática de la zona de estudio tiene una gran variabilidad espacial con marcados contrastes en pocos kilómetros. Como una primera aproximación al área de la RBCH, la Fig. 3 presenta los ciclos anuales de la variabilidad mensual de temperatura y precipitación para las estaciones meteorológicas utilizadas como referencias, incluyendo también la Estación Jorge Schythe (perteneciente al Instituto de la Patagonia en Punta Arenas) y Puerto Harris (perteneciente a la Armada de Chile en isla Dawson), esto para tener una representación más amplia de la gran variabilidad climática de esta extensa zona. De norte a sur, la Estación Jorge Schythe (2000-2019) presentó valores de precipitación promedio anual de 481 mm y una temperatura media de 6,3°C. El periodo analizado para Puerto Harris fue entre los años 2013-2019 (2014 y 2019 no se consideraron para los cálculos anuales de precipitación por falta de datos), obteniendo un promedio de precipitación de 514 mm y un promedio de temperatura anual de 6,1°C.

Respecto a las estaciones de referencia de la RBCH, en Bahía Yendegai (que solo presentó valores para el periodo 2017-2019) el promedio de precipitación anual fue de 400 mm y una temperatura promedio anual de 6,3°C. El periodo analizado para las otras estaciones de la Armada de Chile fue el mismo que de Puerto Harris, presentando para Puerto Williams un promedio de precipitación anual de 822 mm y una temperatura promedio anual de 6,1°C. Para las Alcaldías de Mar de Isla Hornos e Isla Gonzalo se obtuvieron promedios de precipitación anual de 1.565 mm y 1.866 mm, y promedios de temperatura anual de 5,6°C y 5,3°C, respectivamente. Los ciclos anuales de precipitación y temperatura para las 6 estaciones muestran diferencias importantes (Fig. 3). La estación ubicada en isla Gonzalo (archipiélago Diego Ramírez), si bien se encuentra fuera de la RBCH, se incluye en este análisis por ser una excelente referencia como punto extremo para evaluar datos climáticos grillados en estas latitudes. Esta estación es la que muestra un mayor

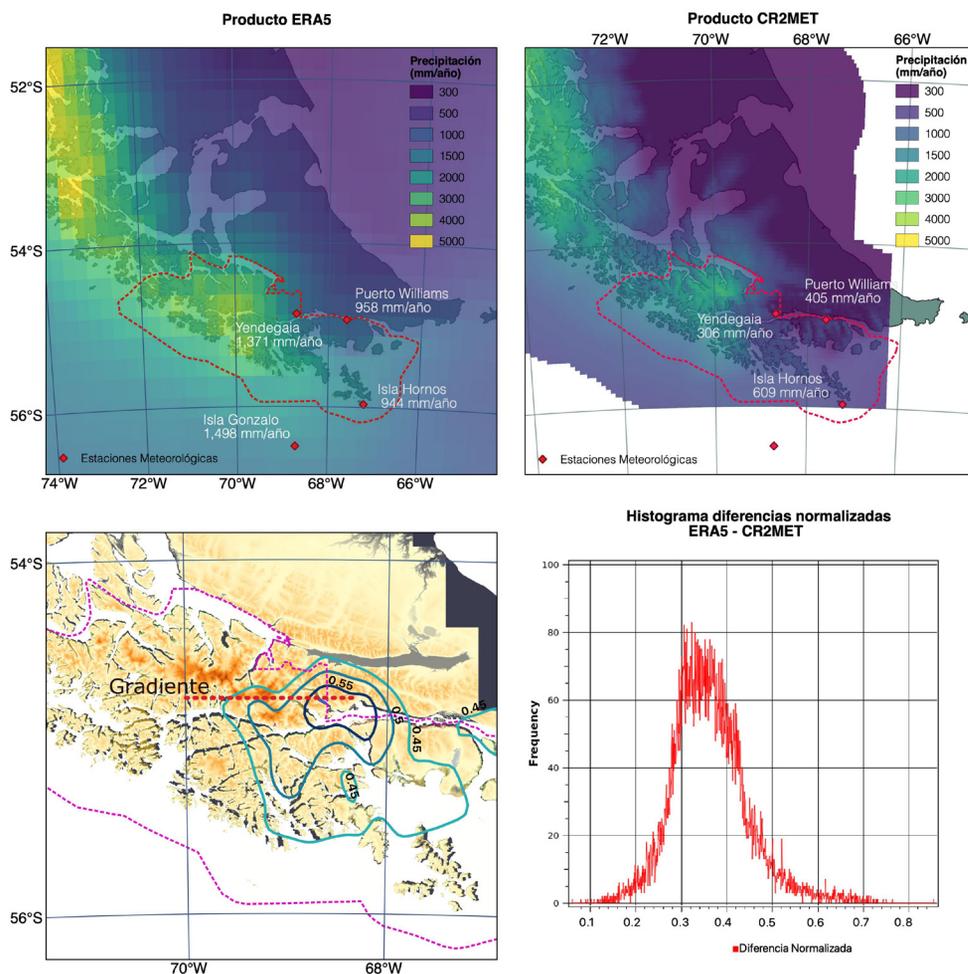
Fig. 3. Ciclo anual de temperatura y precipitación para las estaciones de referencia en la RBCH. Se incluyen también los registros de estaciones en Punta Arenas e Isla Dawson al norte de la RBCH.



volumen de agua caída, con una marcada estacionalidad de mayor precipitación entre primavera y verano. Su amplitud térmica estacional es muy propia de un ambiente oceánico junto con lo registrado en Isla Hornos. Puerto Williams, Punta Arenas y especialmente Yendegaia muestran una mayor amplitud térmica y valores más extremos, lo que es esperable, encontrándose en un ambiente algo más continental, y esta última más cercana a cordillera Darwin.

Utilizando los modelos de reanálisis para obtener una representación espacial de las condiciones climáticas en la RBCH, la Fig. 4 muestra el promedio de la precipitación anual para el periodo 2000–2019 para ERA5 (Fig. 4A) y 2000–2018 para CR2MET (Fig. 4B), y las diferencias normalizadas encontradas entre ERA5 y CR2MET en la distribución espacial (Fig. 4C) e histograma de diferencias normalizadas (Fig. 4D), siendo necesario realizar un re-escalamiento (filtro de paso bajo) de ERA5 para realizar estas comparaciones. Los niveles de precipitación interpretados por ERA5 son mayores que CR2MET (este último no se extiende más al sur de isla Hornos); y la diferencia entre ellos se pronuncia en el sector de Yendegaia. Mientras que ERA5 sobreestima las precipitaciones totales en Yendegaia (1.371 mm vs 400 mm) y Puerto Williams (958 mm vs 822 mm) y las subestima en isla Hornos (944 vs 1.565) e isla Gonzalo (1.498 mm vs 1.866 mm), CR2MET las subestima en toda el área de estudio (Yendegaia 306 mm; Puerto Williams 405 mm; isla Hornos 609 mm). Ambos productos muestran cómo rota en cordillera Darwin, junto con el cambio de orientación de los Andes, donde al gradiente longitudinal se suman un contraste norte-sur (logitudinal), tal como se expone en el trabajo de Weidemann y colaboradores (2020). Comparando los datos de ERA5 con los presentados por Weidemann y otros (2018) ya antes mencionados ($\sim 53^\circ\text{S}$), se encontraron precipitaciones que ascendían a un máximo de ~ 5.000 mm y un gradiente de 3.000 mm en 80 kilómetros (*i.e.*, a una tasa de cambio de 38 mm/km entre Gran Campo Nevado y Skyring), resultados equivalentes con su trabajo. En cambio, los datos de

Fig. 4. Producto climático raster de la precipitación anual promedio. A: Promedio anual de ERA5 (2000-2019); B: Promedio anual de CR2MET (2000-2018); C: Representación de la distribución espacial de las diferencias de la precipitación promedio anual entre ERA5 y CR2MET dentro de la RBCH, y gradiente de 3.000 mm; D: Histograma de la distribución de las diferencias normalizadas de precipitación entre ERA5 y CR2MET.



precipitación de CR2MET no sobrepasan los 2.500 mm, presentando un gradiente de 2.000 mm en la misma zona (25 mm/km). Este análisis de referencia sugiere que el reanálisis global ERA5, aunque presenta una resolución espacial más gruesa que el producto CR2MET, representaría mejor los gradientes de precipitación entre la vertiente oeste y este de los Andes.

Caracterizando la RBCH con un transecto longitudinal a los $\sim 55^{\circ}\text{S}$, y utilizando la precipitación total del producto ERA5, desde el punto de mayor precipitación (cercano a la Alcaldía de mar Timbales ($54.868^{\circ}\text{S } 70.292^{\circ}\text{O}$), 90 kilómetros al oeste de Yendegaia) al de menor precipitación, se define un gradiente que va desde un máximo ~ 4.000 mm de precipitación total, descendiendo a menos de 1.000 mm en solo 100 kilómetros (descendiendo aproximadamente 30 mm/km).

Al representar la distribución espacial de la temperatura con los productos, claramente CR2MET, debido a su mayor resolución espacial, refleja una mejor distribución altitudinal de la temperatura promedio anual (Fig. 5B). A su vez ERA5, respecto a CR2MET, entrega una temperatura más baja en Yendegaia ($2,6^{\circ}\text{C}$ vs $5,1^{\circ}\text{C}$) en contraste con Puerto Williams ($4,1^{\circ}\text{C}$ vs $5,7^{\circ}\text{C}$), invirtiendo

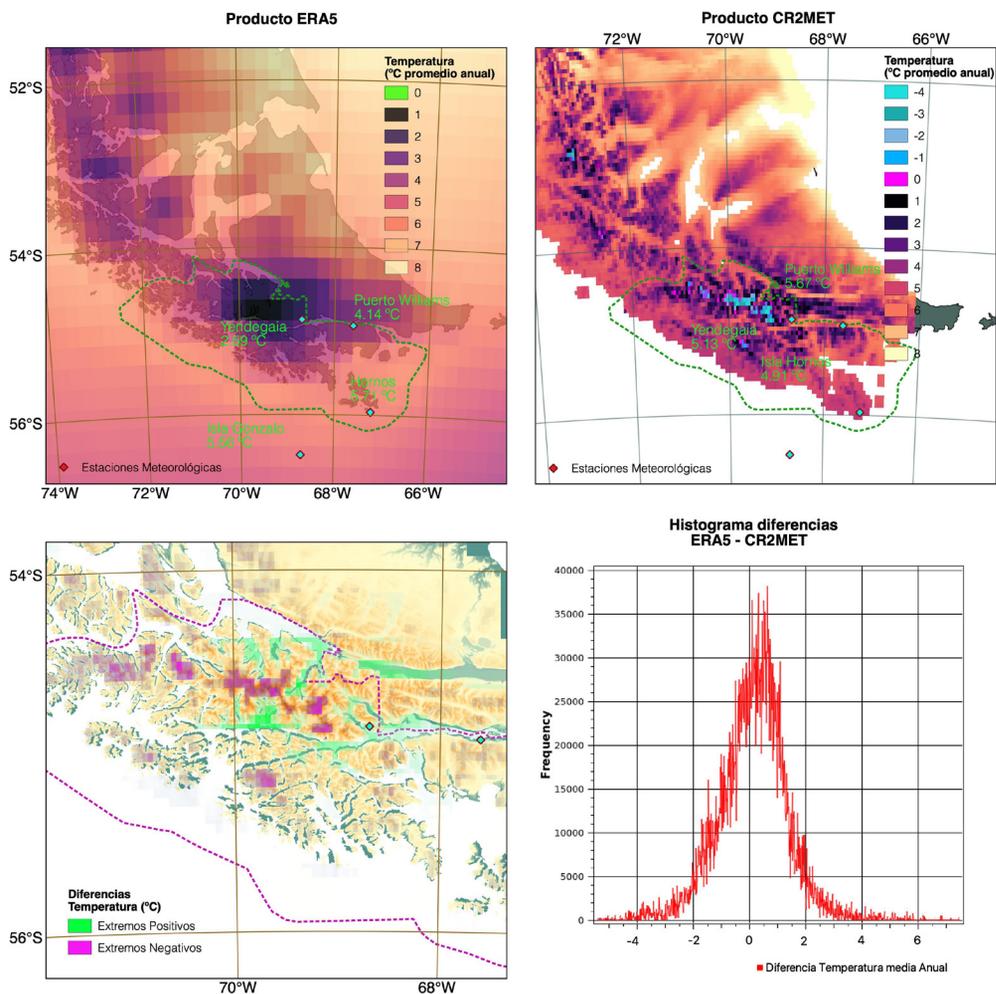


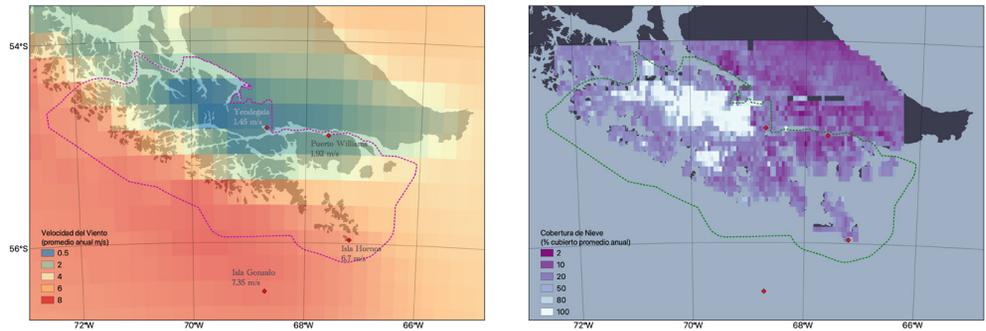
Fig. 5. Producto climático raster de la temperatura promedio anual. A: Promedio anual de ERA5 (2000-2019); B: Promedio anual de CR2MET (2000-2018); C: Representación de la distribución espacial de las diferencias de la temperatura promedio anual entre CR2MET y ERA5 dentro de la RBCH; D: Histograma de la distribución de las diferencias de temperatura entre CR2MET y ERA5.

lo registrado en las estaciones meteorológicas de referencia (Fig. 5A). Las mayores diferencias entre estos modelos se generan en las bajas y altas elevaciones topográficas (Fig. 5C), y la distribución de estas diferencias es normal con una media de 0,5°C a favor de CR2MET (Fig. 5D).

Un análisis de caracterización del comportamiento altitudinal de las temperaturas, considerando el producto de mayor resolución (CR2MET), muestra que la isoterma 0°C se presenta en la zona del Campo de Hielo de Cordillera Darwin (CHCD) con un promedio anual a los 500 msnm (1.500 m en verano y 250 m en invierno), y en el margen occidente (lejos del CHCD) aproximadamente a 1.000 msnm (600 m en invierno, en verano se encuentra sobre el nivel de la topografía).

Las temperaturas del mes más cálido, febrero para la RBCH, respecto a los límites altitudinales de la presencia de los ecosistemas forestales (límite arbóreo), están en el rango de 5°-6°C para la lenga, mientras que para los bosques de coigüe en el rango de 6°-7°C. Para la estación de crecimiento (octubre-abril) se obtuvieron temperaturas medias de 4,8° a 3,8°C para el límite arbóreo de los bosques de lenga y 6,5° a 4,0°C para los bosques de coigüe. Las tasas de cambio de temperatura en relación a

Fig. 6. Producto climático raster de la velocidad del viento y cobertura de nieve. A: Promedio anual de velocidad del viento ERA5 (2000-2019); B: Promedio anual de % cobertura de nieve MODIS (2000-2019).



la altura (consideradas como una relación lineal) varían espacial y temporalmente (Dodson & Marks, 1997). Con la información presentada en este trabajo, y tal como sugiere en lo presentado por Liston y Elder (2006), se establecen gradientes altitudinales por cada estación del año: $5,8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ para verano e invierno, $4,7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ para otoño y $5,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ para primavera.

Respecto a los valores de velocidad de viento zonal, obtenidos de los valores promedios anuales (2000-2019) de ERA5 (el viento está ausente en los datos disponibles de CR2MET), tal como presenta la Fig. 6A, se identifica que la vertiente occidental de la cordillera Darwin se ve expuesta a mayores velocidades de viento con un promedio anual de $7,35\text{ m s}^{-1}$ (con un máximo promedio estacional de $8,12\text{ m s}^{-1}$ en verano) en isla Gonzalo y $6,7\text{ m s}^{-1}$ (con un máximo promedio estacional de $7,5\text{ m s}^{-1}$ en verano) en isla Hornos. El mínimo se encontró en la zona cercana a Timbales (al oeste de la RBCH), con promedio anual de $0,7\text{ m s}^{-1}$.

En relación a la cobertura de nieve (Fig. 6B), como era de esperarse, presenta una mayor permanencia durante el año sobre el Campo de Hielo de Cordillera Darwin e isla Hoste y una disminución hacia zonas más bajas y hacia el margen oriental.

Como medio para evaluar la representación del clima de los modelos ERA5 y CR2MET respecto a los datos de las estaciones de referencia, tal como se precisa en la metodología, se realizó una comparación entre las series de tiempo de los valores mensuales de precipitación (Fig. 7) y temperatura (Fig. 8) en los puntos donde coinciden ambos datos y sus periodos de tiempo correspondientes. Las figuras presentadas a continuación entregan los resultados de estas comparaciones como diagramas de Taylor e histogramas.

La Fig. 7 indica que la precipitación tiene una mejor correlación de Spearman con CR2MET que con ERA5, tanto en Yendegaia (0,61 y 0,48 respectivamente) como en Puerto Williams (0,56 y 0,46 respectivamente). En los diagramas de Taylor de estas estaciones, ambos modelos presentan virtualmente la misma correlación lineal (Pearson). Pero respecto a la desviación estándar, CR2MET presenta un mejor ajuste. Solo en Isla Hornos el modelo ERA5 representa mejor la precipitación mensual (Spearman = 0,21) comparada con CR2MET. En todos los casos la precipitación mensual no queda bien representada por los reanálisis, tal como indican sus correlaciones (Pearson y Spearman) y los diagramas de dispersión. Esto sugiere, por una parte, que dada la intrincada topografía estos productos grillados no logran capturar correctamente la variabilidad espacial de la precipitación y, por otro lado, pudiera también sumarse errores instrumentales en la captura de datos de la precipitación total (Maraun & Widmann, 2018; Weidemann *et al.* 2018).

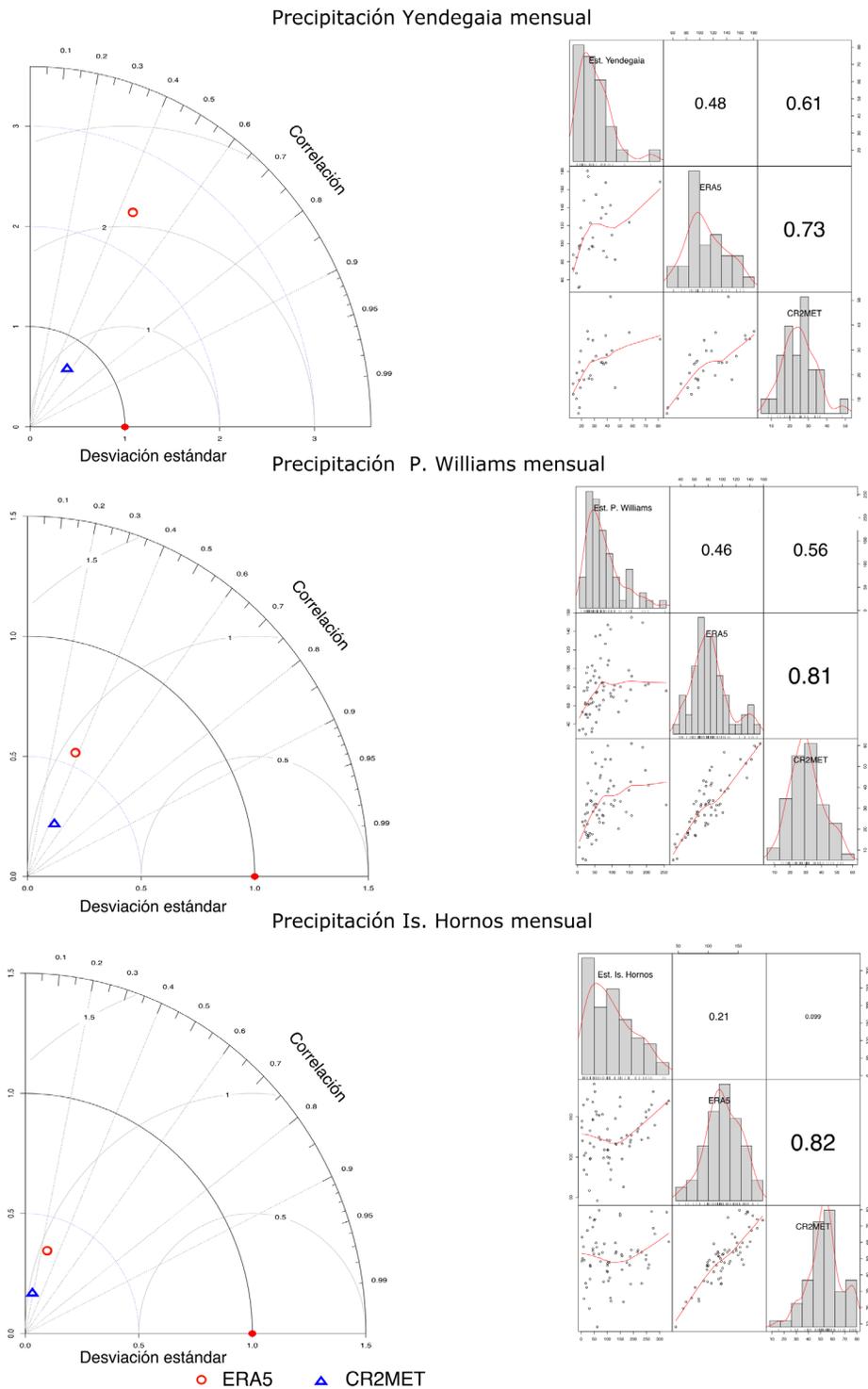


Fig. 7. Diagramas de Taylor, gráficos de dispersión, histogramas y correlación de Spearman entre los datos mensuales de la precipitación de ERA5 y CR2MET comparados con los datos de las estaciones meteorológicas.

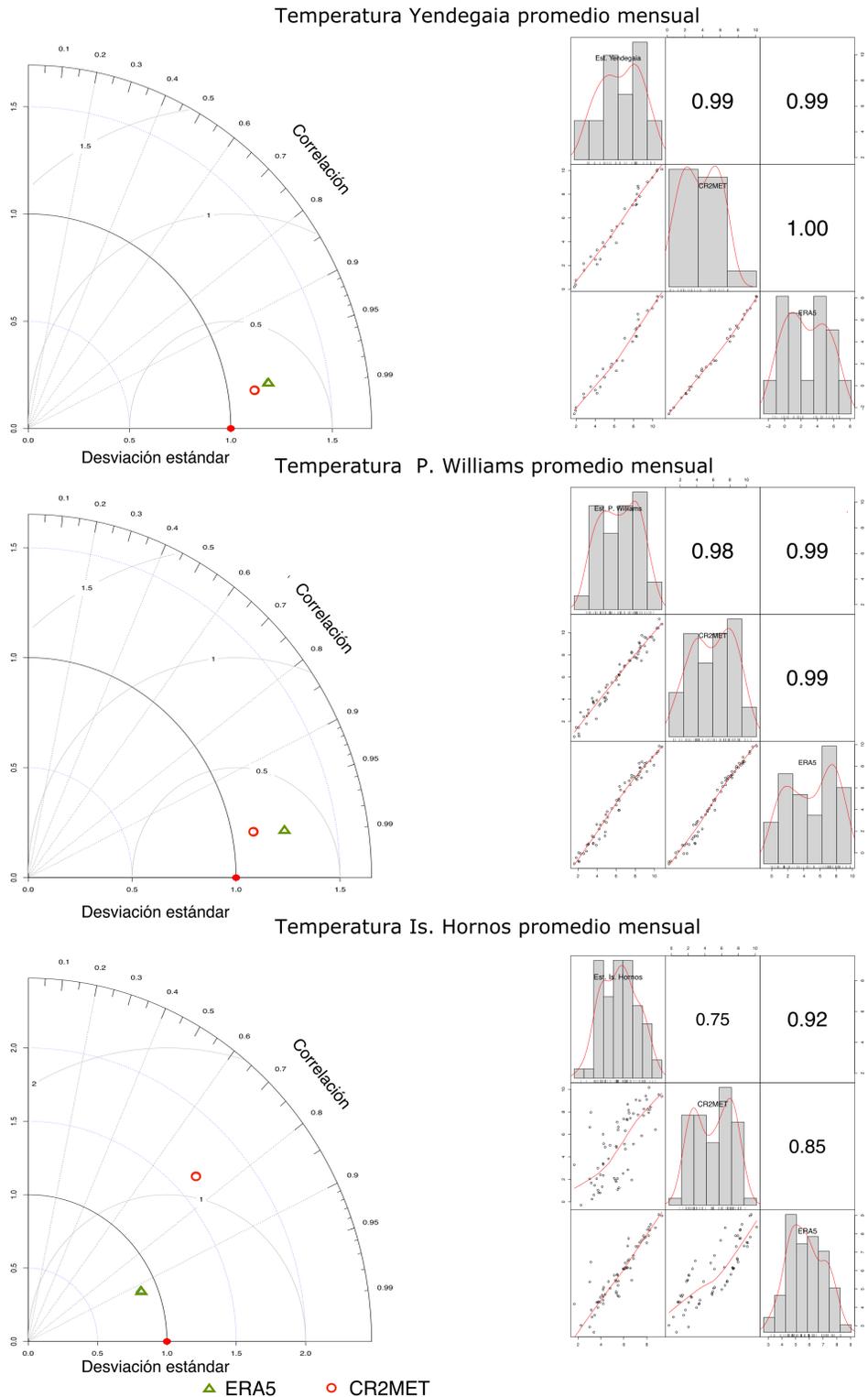
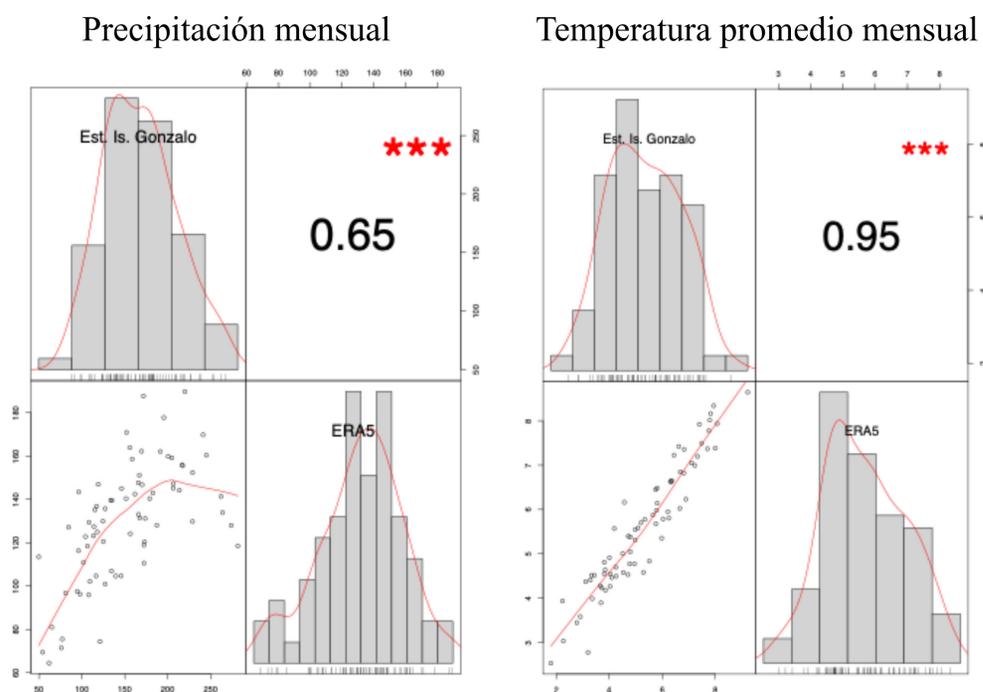


Fig. 8. Diagramas de Taylor, gráficos de dispersión, histogramas y correlación de Spearman entre los datos promedios mensuales de la temperatura de ERA5 y CR2MET comparados con los datos de las estaciones meteorológicas.

Fig. 9. Gráficos de dispersión, correlaciones de Spearman e histogramas entre la precipitación y temperatura mensual (2013-2019) medidos en Isla Gonzalo y el reanálisis ERA5. Los asteriscos en rojo indican una alta significancia (p -valor < 0.001).

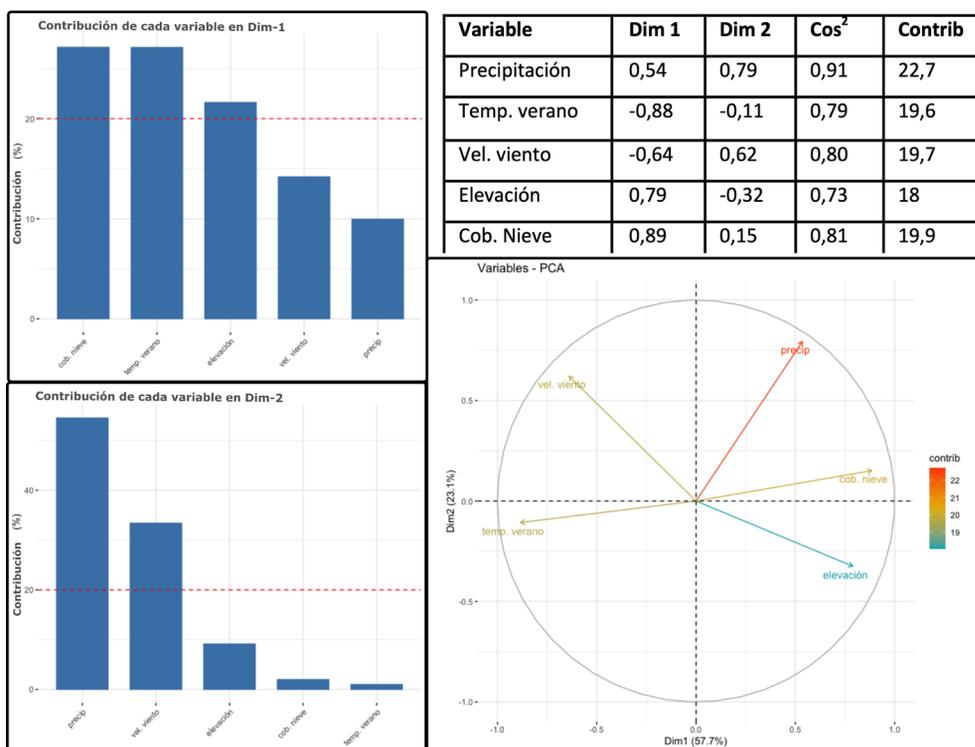


Lo que respecta a la representación de las temperaturas promedio mensuales, a pesar de las diferencias en resolución espacial, ambos modelos grillados se comportan muy bien respecto a los datos observados (Fig. 8). En la estación de Yendegaia y Puerto Williams CR2MET se comporta marginalmente mejor que ERA5 (correlación Spearman de 0,99 y 0,98 respectivamente), pero en Isla Hornos el desempeño de ERA5 supera ampliamente a CR2MET (0,92 vs 0,75 respectivamente). De forma adicional, solo se comparan los datos medidos en Isla Gonzalo con los del modelo ERA5 (Fig. 9), dado que el producto CR2MET no está disponible para estas latitudes. Aquí la precipitación de ERA5 muestra una mejor correlación (Spearman = 0,65) en comparación con los otros puntos muestreados y al igual que Isla Hornos, la temperatura de ERA5 también posee una muy buena representación (Spearman = 0,95). Las correlaciones tanto en temperatura como en precipitación son significativas (p -valor < 0,005).

Gradientes climáticos

Como resultado de la comparación y evaluación mediante histogramas, gráficos de dispersión y correlación de Spearman de todas las variables climáticas (*i.e.*, temperatura, precipitación y velocidad tanto anual como estacional, cobertura de nieve promedio y promedio máximo) para los 797 sitios de muestreo (hexágonos), y en base al resultado de la evaluación espacial y temporal, se seleccionaron las siguientes variables climáticas para la implementación del PCA: temperatura promedio estacional DJF (verano), precipitación anual, velocidad del viento promedio anual de ERA5 y cobertura de nieve promedio anual (MODIS), y la elevación en base al modelo digital de terreno SRTM v3 (Rodríguez *et al.* 2006). El modelo ERA5 se priorizó respecto al CR2MET, en las variables con alta colinealidad entre ellas, dado que representa mejor el gradiente

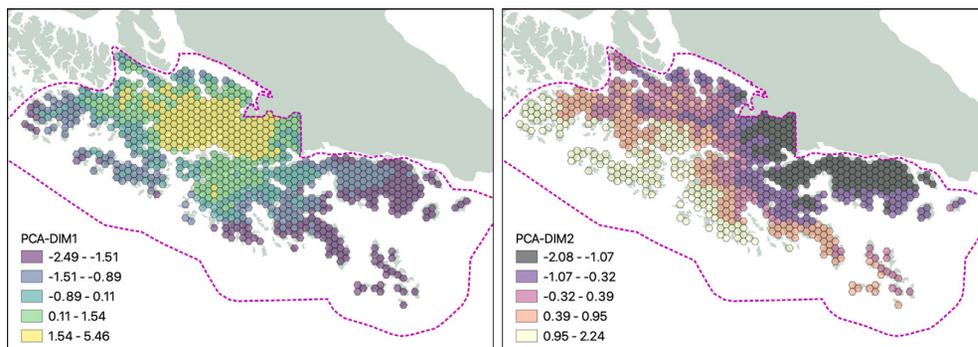
Fig. 10. Resultados PCA: Contribución por variable a cada eje (**Dim 1** y **Dim 2**), su calidad de representación en el modelo global (**Contrib**) y su nivel de significancia (**Cos²**).



de precipitación. Adicionalmente, las temperaturas promedio anuales y estacionales del CR2MET tenían una gran correlación entre ellas (mayor a un 90%) y también con la elevación, por lo que en él también queda intrínsecamente representada la temperatura expresada por CR2MET. El efecto de la escala espacial más gruesa de ERA5 se consideró integrando la elevación al análisis PCA. El primer eje del PCA (Dim 1) explica el 57,7% de la varianza de los datos y el segundo eje (Dim 2) el 23,1% (Fig. 10). El eje 1 está vinculado a la temperatura de verano (en forma negativa) y la elevación, mientras que el eje 2 está representado principalmente por la precipitación y la velocidad del viento. Todas las variables incluidas en el PCA tienen una buena calidad en su representación ($\text{Cos}^2 > 0,6$).

El análisis del eje 1 muestra la existencia de un marcado gradiente concéntrico (Fig. 11A), que varía desde temperaturas de verano más cálidas en relación con promedios de vientos más fuertes (zonas más expuestas al campo de vientos del oeste) y baja altitud, a condiciones más frías en verano y altitudes más altas, quedando el Campo de Hielo de Cordillera Darwin en su centro. Respecto al segundo eje (Fig. 11B), el gradiente climático es explicado fuertemente por la precipitación (mayor a un 50%, Fig. 10), y tiene claramente una orientación inclinada con una dirección de noroeste (mayor precipitación) a sureste (menor precipitación). La Fig. 11 presenta la distribución espacial, en las unidades de muestreo (hexágonos), de los dos gradientes climáticos principales (Dim 1 y Dim 2).

Fig. 11. Distribución espacial de los ejes del análisis PCA (A) DIM-1 y (B) DIM-2 para los gradientes climáticos representativos. Ambos ejes tienen gradientes espaciales bien diferenciados y explicados por diferentes variables (DIM-1: Cobertura de nieve, temperatura de verano y elevación; DIM-2: Precipitación y velocidad del viento).



Gradientes ambientales

La variable respuesta para el modelo propuesto en este trabajo es la proporción de cada ecosistema dentro de cada hexágono (sitio de muestreo) y la matriz de variables dependientes correspondientes a las variables climáticas (como promedios anuales): velocidad del viento, temperatura de verano, elevación, precipitación y cobertura nival.

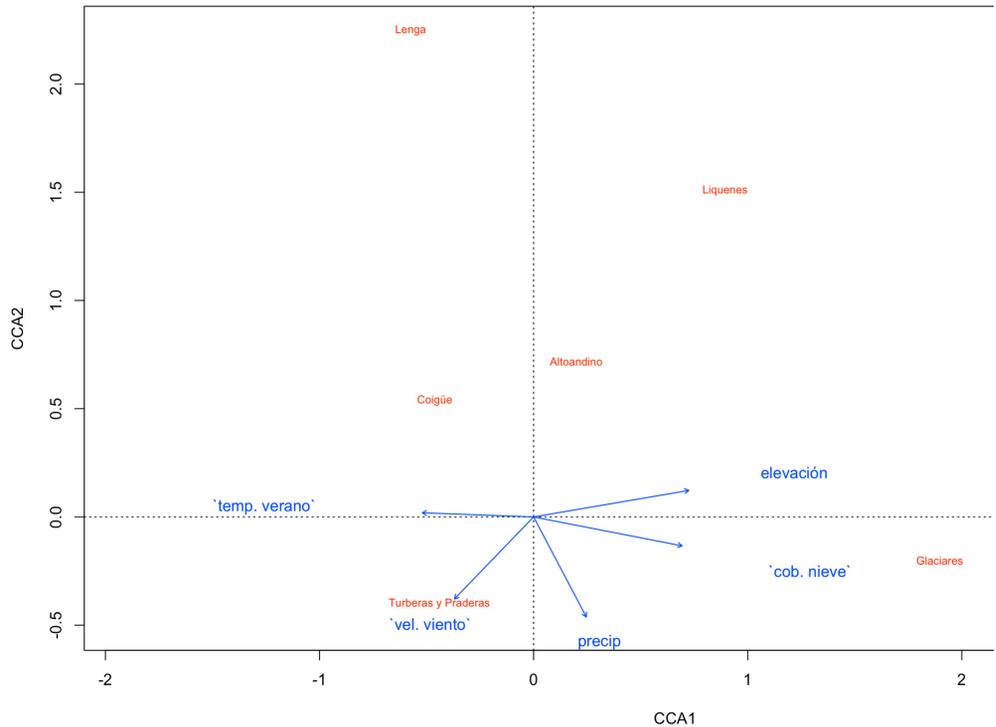
El modelo CCA presentó una Inercia restringida de 0,74 y correlación ponderada entre los ambientes terrestres y las variables climáticas para los dos principales ejes: CCA1: 0,95 y CCA2: 0,67. Los valores propios restringidos acumulados por cada eje son: CCA1: valor propio: 0,55; proporción explicada: 0,74; proporción acumulada: 0,74; CCA2: valor propio: 0,17; proporción explicada: 0,24; proporción acumulada: 0,97. Todas las variables climáticas resultaron significativas ($VIF < 3$; $Pr(>F) < 0.001$), siendo significativas hasta el tercer eje (CCA3). El primer eje está fuertemente representado por la elevación y la presencia de la cobertura de nieve, mientras que el eje 2 por la precipitación total y el viento zonal (Fig. 12).

La proporción de los ecosistemas terrestres (letras en rojo en la Fig. 12) tiene una clara dispersión en ambos ejes, lo que permite tener patrones climáticos (letras y flechas en azul) bien marcados entre ellos. Se identifica un gradiente altitudinal también asociado con temperatura de verano y cobertura de nieve, comenzando con los ecosistemas turberas y praderas, altoandino y líquenes saxícolas. El ecosistema glaciar, tal como era esperable, está condicionado a zonas de bajas temperaturas en verano, y permanencia de la cobertura de nieve y con influencia de la altura. Los ecosistemas forestales, bosques de lenga y coigüe (marcados en verde) quedan claramente separados por la precipitación. Las turberas y praderas quedan fuertemente direccionadas por la intensidad de los vientos, espacializados en el margen occidental principalmente.

DISCUSIÓN

La representación e interpretación del clima sigue siendo uno de los grandes desafíos de la ciencia climática (Schiermeier, 2010). Estudios de este tipo son aún más desafiantes en la RBCH debido a su lejanía y aislamiento, donde servicios públicos como la DGA y la Armada de Chile, y centros de investigación como el Instituto de Ecología y Biodiversidad, más el esfuerzo de individuos como Charlie Porter, han implementado y mantenido las pocas estaciones meteorológicas

Fig. 12. Resultado del CCA; ecosistemas terrestres (rojo) explicados por las variables climáticas seleccionadas (en azul). Se remarca en verde la separación de los dos sistemas forestales. Las tablas insertas indican el nivel de contribución de cada variable por eje.



habilitadas en la zona, indispensables para comprender tanto los cambios y variabilidad climática como también sus diferentes impactos (Maraun & Widmann, 2018).

Dado el escenario de falta de estaciones meteorológicas con representatividad espacial y temporal, y luego de una comparación entre el reanálisis ERA5 y el producto CR2MET, se procedió a la reconstrucción climática de la RBCH utilizando las variables: temperatura promedio estacional de verano, precipitación total anual, velocidad del viento promedio anual de ERA5 y el % cobertura nivel promedio anual del producto MODIS MOD10CM (promedio de 20 años, 2000-2019), integrando también la elevación del modelo digital de terreno SRTM v3. ERA5, aunque con una resolución espacial más gruesa que el producto CR2MET, representa mejor los cambios espaciales de precipitación total, considerando los estudios realizados en la zona (Weidemann *et al.* 2018) sugiriendo una mejora significativa entre ERA5 y su predecesor, ERA-Interim que es la base de CR2MET. Sin embargo, el desempeño de este producto climático ERA5, y especialmente su representación de la precipitación mensual, tienen una baja correlación (Spearman = 0.48, 0.46, 0.21 y 0.65 en Yendegaia, Puerto Williams, Isla Hornos e Isla Gonzalo respectivamente) y una alta dispersión en base a los datos observacionales. Este resultado tiene implicancias importantes para la selección y usos de productos climáticos tanto para el análisis de distribución de especies en la zona como para determinar el potencial efecto del cambio climático sobre ellas (Elith & Leathwick, 2009).

Algo muy importante a tener en cuenta es el ruido o incertezas que se pueden generar tanto en comprender el sistema climático como también en la captura de información meteorológica en terreno (Mudelsee, 2014). Se ha detectado que la captura de la precipitación por pluviómetros

decrece cuando aumentan las intensidades de los vientos y esta subestimación puede aumentar (hasta un 50%) cuando la precipitación cae en forma de nieve (Maraun & Widmann, 2018; Weidemann *et al.* 2018) in particular in the more elevated and partially glaciated Southernmost Andes. Here we present a unique 17-year meteorological record (2000-2016, ambas condiciones meteorológicas muy frecuentes en la RBCH. Por lo anterior, si bien los registros de las estaciones meteorológicas se utilizan aquí como una referencia, es muy posible que exista un sesgo en sus valores de precipitación para días muy ventosos (*i.e.*, Isla Hornos e Isla Gonzalo) y en la temporada de nieve (particularmente en Yendegaia). Por este motivo, y dada la importancia de obtener buenos registros meteorológicos, la selección de instrumentos debe considerar las características técnicas (*i.e.* poder medir precipitación nival) de los sensores y protecciones apropiadas (*i.e.* protecciones de viento para los pluviómetros) para estas condiciones ambientales.

La reconstrucción de las coberturas de los ecosistemas terrestres presentada en este trabajo es un gran avance por vincular productos actualizados (*i.e.*, cobertura global de bosque e inventario de glaciares). En este sentido, dado el conocimiento del área de estudio (*i.e.* trabajos publicados como el de Dollenz (1980), Pisano (1977, 1980, 1981), Rozzi y colaboradores (2006, 2007, 2008)), se pudo además segregar las formaciones forestales entre bosque deceduo y siempreverde.

El gradiente de precipitación más extremo de la RBCH, estimado por el modelo ERA5, alcanzó los 30 mm/km a lo largo de 100 kilómetros con una zona de mayor precipitación sobre las cumbres cercanas a la Alcañía de mar de Timbales, 90 kilómetros al oeste de Yendegaia en el canal Beagle (~4 metros precipitación total). Con una mejora en los recursos de monitoreo en esta Alcañía de Mar, se podría monitorear la mayor cantidad de precipitación existente en cordillera Darwin, hasta ahora solo inferida por el reanálisis climático.

Los gradientes de temperatura están explicados principalmente por las variaciones topográficas y la cercanía a los glaciares (debido a que este ecosistema genera ambientes más fríos, tal como también demostró la medición de gradientes en zonas glaciadas y desglaciadas). En el extremo más frío del gradiente térmico, después del ecosistema de glaciares, se encuentran los ecosistemas de líquenes saxícolas y altoandino. El límite inferior del ecosistema altoandino utilizado en este estudio (*i.e.*, 600 msnm cuando no existe bosque ni glaciar), coincide con el límite arbóreo encontrado en la RBCH. Éste se ubica entre los 550-620 msnm cercano a la cordillera Darwin, límite que sube levemente a entre 580-650 msnm hacia el este, en Yendegaia e Isla Navarino.

En diversos ambientes de alta montaña de ambos hemisferios, el límite arbóreo generalmente coincide con la isoterma 10°C del mes más cálido (Arno, 1984; Ohsawa, 1990; Wardle, 1974) y la temperatura media de la estación de crecimiento entre 5° y 7°C (Körner, 1998). En este estudio encontramos que la temperatura del mes más cálido (febrero) en el límite arbóreo es entre 3° y 5°C más baja a la citada en la literatura, pero que se acerca a la temperatura media de la estación de crecimiento (octubre a abril), al menos para el límite arbóreo de coigüe (4° a 6,5°C). En el caso de la lenga (3,8° a 4,8°C), esta temperatura es cerca de 1 grado más baja que la indicada por Körner (1998). El mecanismo universal para explicar el límite altitudinal de los árboles es la limitación del crecimiento (Cavieres & Piper, 2004). Esto último implica que hay un límite térmico ambiental durante la estación de crecimiento en donde la ganancia de carbono no compensa los gastos metabólicos de la forma de vida arbórea, y los individuos entran en hambruna.

En los dos tipos de ecosistemas forestales, los bosques deciduos de lenga se ubican en el extremo con menor precipitación (y menor temperatura) en comparación con los siempreverde dominados por coigüe (Rozzi *et al.* 2006, 2007). El hábito deciduo de invierno es un rasgo funcional que permitiría a la planta evadir las temperaturas congelantes durante la estación invernal (Alberdi, 1995) lo que sería compensado con altas tasas de fotosíntesis durante el verano. Por el contrario, el hábito foliar siempreverde no le permite a las especies evadir las temperaturas congelantes invernales y restringe su distribución a los ambientes con mayor precipitación y de menor altitud.

Ya sea por el rango de tolerancia a bajas temperaturas o una explicación basada en el balance de carbono positivo, se predice que el límite arbóreo se movería a mayores elevaciones producto del aumento de temperaturas derivadas del cambio climático. Y de hecho, ya hay evidencias de colonización de lenga de entre 5 a 10 m por sobre el límite arbóreo en la cordillera de los Andes a los 49°S (Srur *et al.* 2018).

Finalmente, en la RBCH, el complejo de turberas y praderas se asocia claramente a los factores velocidad del viento y mayor precipitación, así como a menores elevaciones, esto último relacionado también a topografías más planas que permiten la acumulación de agua (argumento válido al menos para las turberas). Para estudios futuros, es relevante tanto mejorar la representación espacial de las diferentes coberturas vegetacionales como estudiar su respuesta ante las proyecciones de cambio climático, especialmente para el complejo de turberas, dado la relevancia de éstas en el balance de carbono y metano a nivel global (Rydin *et al.* 2013; Turetsky *et al.* 2015)

En el contexto del cambio climático, el Modo Anular del Sur (SAM en sus siglas en inglés) posee una gran influencia (~35%) en la variabilidad climática del hemisferio sur (Mayewski *et al.* 2009), y ha sido vinculado a la intensidad de los vientos del oeste con correlaciones positivas entre los vientos y la precipitación que prevalecen a lo largo del margen occidental del sur de Sudamérica (entre los 40° y 55°S), mientras que las correlaciones tienden a ser negativas en latitudes similares a lo largo del margen atlántico (Moreno *et al.* 2010). En los últimos 50 años el SAM ha tenido una tendencia a su fase positiva, situación que se proyecta para escenarios de cambio climático futuro (Clem *et al.* 2016; Garreaud, 2018). Esto implicaría un aumento en los vientos del oeste y un refuerzo del gradiente longitudinal de precipitaciones entre el margen occidental (mayor precipitación) y oriental (menor precipitación) de los Andes en altas latitudes. Según lo expresado por Srur y colaboradores (2018), estas condiciones asociadas con las variaciones detectadas en la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO en su sigla en inglés) seguirían favoreciendo el desplazamiento del límite arbóreo a cotas más altas, limitando cada vez más los ecosistemas altoandinos, comprimiendo especialmente cada vez el área disponible en las cumbres de los cerros más bajos (sin presencia de glaciares).

Aparte de las tendencias detectadas en aumentos de temperaturas, la disminución de la cobertura de nieve estacional (Aguirre *et al.* 2018) y las pérdidas continuas de masa de hielo en la cordillera Darwin, estimadas en 1 Gt año⁻¹ (Braun *et al.* 2019), no solo generan cambios en el sistema climático criósfera-biosfera, sino que también pone en claro desequilibrio un "hotspot" mundial de biodiversidad y los ecosistemas subantárticos de la RBCH.

Por todo esto es relevante poder mejorar la comprensión del sistema climático en la RBCH: (1) incrementando el proceso de captura y calidad de datos de estaciones meteorológicas; (2) reactivando estaciones importantes como las de la red de Charlie Porter; (3) integrando los distintos esfuerzos de

proyectos científicos (como en el caso de GABY-VASA) realizados en cordillera Darwin; (4) aumentando la precisión y diferenciación de los ecosistemas terrestres aquí presentados. Esto permitirá validar y corregir modelos de referencia mundial y estudiar las tendencias de las variables climáticas claves que pudieran comprometer estos invaluable ecosistemas subantárticos.

CONCLUSIONES

Los gradientes climáticos aquí presentados permiten explicar la distribución espacial del mosaico de ecosistemas terrestres presentes en la RBCH. Estos ecosistemas se distribuyen en cortos gradientes de elevación de menos de 1.000 metros de altura, asociados a la temperatura, y en una extensa área con fuertes gradientes de precipitación en sentido noroeste-sureste, infiriendo tasas de disminución de precipitación de aproximadamente 3 metros de lluvia en tan solo 100 kilómetros, explicados por la continua presencia de los vientos del oeste que interactúa con la intrincada topografía de los Andes australes y fueguinos.

La metodología propuesta permitió la segregación de los ecosistemas terrestres en función de su dependencia de las variables climáticas. Sin embargo, es aún necesario mejorar la representación climática en esta zona remota, tanto con mejores registros meteorológicos (estaciones automáticas y sensores idóneos) para todas las Alcaldías de Mar (Armada de Chile) y asimismo densificar la red DGA, así como incorporar nuevos puntos claves de registro en la vertiente occidental, como en el caso de Alcaldía Timbales, que podría registrar el punto con mayor precipitación de cordillera Darwin, y la reactivación de la red de Charlie Porter.

Los reanálisis y productos climáticos disponibles siguen siendo gruesos para poder explicar la variabilidad climática local y su interacción tan estrecha con los ecosistemas terrestres en la RBCH, por lo que es necesario implementar modelos climáticos regionales (dinámicos o estadísticos), ya que son capaces de la reproducción de variables climáticas sobre terrenos complejos (Bozkurt *et al.* 2019), e incorporar otras variables claves como la humedad atmosférica (o el déficit de presión de vapor), el punto de rocío y segregar la precipitación total en líquida y sólida, con sus correspondientes validaciones y correcciones.

Este estudio ha entregado un primer análisis detallado en una región que provee información indispensable para comprender y evaluar los impactos presentes y futuros del cambio global tanto en la ecorregión subantártica de Magallanes como a escala planetaria, considerando con mayor resolución los gradientes climáticos y las respuestas de las biotas en las zonas subpolares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de los proyectos *Diseño de un Plan de Gestión Integral de Turismo Sustentable para la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos y sus Parques Nacionales*, Corporación de Fomento (CORFO) y Corporación Nacional Forestal (CONAF), de la Red de Ambientes Extremos (NEXER Red-UMAG), Centro Internacional Cabo de Hornos (CHIC) de la Universidad de Magallanes (UMAG), fondo basal ANID FB210018, de Fondos Basales ANID (AFB170008) y FONDEQUIP (200198) del Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB), Grupo de Trabajo Mar y Tierra (The Pew Charitable Trust-Chile), a la Fundación Omora y The National Geographic Society (NGS 1475-18) que cofinanció una expedición e investigación en el sitio de estudios en isla Hornos.

También se agradece a ARBOLES Project (CONICYT-NERC-UK NE/S011811/1). Se agradecen los aportes realizados por los revisores y editores que, sin duda, mejoraron la calidad del manuscrito. Esta es una contribución del Programa de Conservación Biocultural Subantártica, conjuntamente coordinado por CHIC, UMAG y University of North Texas (UNT).

LITERATURA CITADA

- Aguirre, F., Carrasco, J., Sauter, T., Schneider, C., Gaete, K., Garín, E., Adaros, R., Butorovic, N., Jaña, R., & Casassa, G. (2018). Snow Cover Change as a Climate Indicator in Brunswick Peninsula, Patagonia. *Frontiers in Earth Science*, 6, 130. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00130>
- Alberdi, M. (1995). Ecofisiología de especies leñosas de los bosques hidrófilos templados de Chile: resistencia a la sequía y bajas temperaturas. En: *Ecología de los bosques nativos de Chile* [J. Armesto, C. Villagrán y M.T.K. Arroyo(eds)], pp. 279-299. Editorial Universitaria.
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Cortes, G., Garreaud, R., & McPhee, J. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846.
- Anderson, C. B., Rozzi, R., Torres-Mura, J. C., Mcgehee, S. M., Sherriffs, M. F., Schüttler, E., & Rosemond, A. D. (2006). Exotic vertebrate fauna in the remote and pristine sub-Antarctic Cape Horn Archipelago, Chile. *Biodiversity & Conservation*, 15(10), 3295-3313.
- Arno, S. F. (1984). Timberline: mountain and arctic forest frontiers. The Mountaineers. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19850605664>
- Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., & Pappenberger, F. (2015). ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 389–407.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Gallardo, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, 53(11), 6745–6767. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y>
- Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Farias-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., & Seehaus, T. C. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130–136.
- Buma, B., Holz, A., Diaz, I., & Rozzi, R. (2021). The world's southernmost tree and the climate and windscapes of the southernmost forests. *Ecography*, 44(1), 14–24. <https://doi.org/10.1111/ecog.05075>
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Rivera, A. (2002). Meteorological and Climatological Aspects of the Southern Patagonia Icefield (pp. 29-41). *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0645-4_4
- Carrasco, J. F., Osorio, R., & Casassa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538-550.
- Carrivick, J. L., Davies, B. J., James, W. H. M., Quincey, D. J., & Glasser, N. F. (2016). Distributed ice thickness and glacier volume in southern South America. *Global and Planetary Change*, 146, 122-132.
- Cavieres, L. A., & Piper, F. I. (2004). Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. Fisiología Ecológica En: *Plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés En Los Ecosistemas* [Cabrera H.M. (ed)], 221-234. Editorial Universitaria.
- Chen, X., Long, D., Liang, S., He, L., Zeng, C., Hao, X., & Hong, Y. (2018). Developing a composite daily snow cover extent record over the Tibetan Plateau from 1981 to 2016 using multisource data. *Remote Sensing of Environment*, 215, 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.021>
- Clem, K. R., Renwick, J. A., McGregor, J., & Fogt, R. L. (2016). The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(16), 9324–9341. <https://doi.org/10.1002/2016JD025305>
- Contador, T., Kennedy, J., Ojeda, J., Feinsinger, P., & Rozzi, R. (2014). Ciclos de vida de insectos dulceacuicolas y cambio climático global en la ecorregión subantártica de Magallanes: investigaciones ecológicas a largo plazo en el

- Parque Etnobotánico Omora, Reserva de Biosfera Cabo de Hornos (55° S). *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 429–437. <https://doi.org/10.4067/50717-92002014000300018>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate.
- Cowan, D. A., & Tow, L. A. (2004). Endangered Antarctic Environments. *Annual Review of Microbiology*, 58(1), 649–690. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.57.030502.090811>
- Dixon, P. (2003). VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 14(6), 927–930.
- Dodson, R., & Marks, D. (1997). Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research*, 8(1), 1–20.
- Dollenz, O. (1980). Estudios fitosociológicos en el archipiélago Cabo de Hornos. I.-Relevamientos en caleta Lientur, isla Wollaston y surgidero Romanche, isla Bayly. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 11, 225–238.
- Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Wehner, M. F., & Sun, L. (2016). Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, 11, 17–27. <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2016.01.001>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1), 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., & Eyring, V. (2014). Evaluation of climate models. 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* (pp. 741–866). Cambridge University Press.
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(1), 38–44.
- Frei, A., Tedesco, M., Lee, S., Foster, J., Hall, D. K., Kelly, R., & Robinson, D. A. (2012). A review of global satellite-derived snow products. *Advances in Space Research*, 50(8), 1007–1029. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2011.12.021>
- Garreaud, R. (2018). Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Climate Research*, 74(3), 217–229. <https://doi.org/10.3354/cr01505>
- Garreaud, R., López, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- GDAL/OGR contributors. (2020). {GDAL/OGR} Geospatial Data Abstraction software Library. Retrieved from <https://gdal.org>
- Glasser, N. F., Jansson, K. N., Harrison, S., & Kleman, J. (2008). The glacial geomorphology and Pleistocene history of South America between 38°S and 56°S. *Quaternary Science Reviews*, 27(3–4), 365–390. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2007.11.011>
- Gleckler, P. J., Taylor, K. E., & Doutriaux, C. (2008). Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science (New York, N.Y.)*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hijmans, R. J., & van Etten, J. (2016). raster: Geographic data analysis and modeling. *R Package Version*, 2(8).
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2017). Package 'factoextra': Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses, 76.
- Kent, M. (2011). *Vegetation description and data analysis: a practical approach*. John Wiley & Sons.
- Kohshima, S. (1985). Migration of the Himalayan wingless glacier midge (*Diamesa* sp.): slope direction assessment by sun-compacted straight walk. *Journal of Ethology*, 3(2), 93–104.
- Kohshima, S., Takeuchi, N., Uetake, J., Shiraiwa, T., Uemura, R., Yoshida, N., Matoba, S., & Godoi, M. A. (2007). Estimation of net accumulation rate at a Patagonian glacier by ice core analyses using snow algae. *Global and Planetary Change*, 59(1–4), 236–244.

- Körner, C. (1998). A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115(4), 445-459. <https://doi.org/10.1007/s004420050540>
- Legendre, P., & Legendre, L. F. J. (2012). *Numerical ecology*. Elsevier.
- Liston, G. E., & Elder, K. (2006). A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 217-234.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Editorial Universitaria.
- Mansilla, A., Ojeda, J., & Rozzi, R. (2012). Cambio climático global en el contexto de la ecorregión subantártica de Magallanes y la reserva de biósfera Cabo de Hornos. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 40(1), 69-76. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2012000100008>
- Maraun, D., & Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press.
- Markgraf, V., & Huber, U. M. (2010). Late and postglacial vegetation and fire history in Southern Patagonia and Tierra del Fuego. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297(2), 351-366. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2010.08.013>
- Mayewski, P. A., Meredith, M. P., Summerhayes, C. P., Turner, J., Worby, A., Barrett, P. J., Casassa, G., Bertler, N. A. N., Bracegirdle, T., Naveira Garabato, A. C., Bromwich, D., Campbell, H., Hamilton, G. S., Lyons, W. B., Maasch, K. A., Aoki, S., Xiao, C., & van Ommen, T. (2009). State of the Antarctic and Southern Ocean climate system. *Reviews of Geophysics*, 47(1), RG1003. <https://doi.org/10.1029/2007RG000231>
- Meier, W. J.-H., Griesinger, J., Hochreuther, P., & Braun, M. H. (2018). An updated multi-temporal glacier inventory for the Patagonian Andes with changes between the Little Ice Age and 2016. *Frontiers in Earth Science*, 6, 62.
- Melkonian, A. K., Willis, M. J., Pritchard, M. E., Rivera, A., Bown, F., & Bernstein, S. A. (2013). Satellite-derived volume loss rates and glacier speeds for the Cordillera Darwin Icefield, Chile. *Cryosphere*, 7(3), 823-839. <https://doi.org/10.5194/tc-7-823-2013>
- Miteva, V. (2008). Bacteria in Snow and Glacier Ice. In *Psychrophiles: from Biodiversity to Biotechnology* (pp. 31-50). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74335-4_3
- Moorman, M. C., Anderson, C. B., Gutiérrez, A. G., Charlin, R., & Rozzi, R. (2006). Watershed conservation and aquatic benthic macroinvertebrate diversity in the Alberto D'Agostini National Park, Tierra del Fuego, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 34, 41-58.
- Moreno, P. I., Francois, J. P., Moy, C. M., & Villa-Martínez, R. (2010). Covariability of the Southern Westerlies and atmospheric CO₂ during the Holocene. *Geology*, 38(8), 727-730. <https://doi.org/10.1130/G30962.1>
- Mudelsee, M. (2014). *Climate time series analysis: classical statistical and bootstrap methods*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04450-7>
- Ohsawa, M. (1990). An Interpretation of Latitudinal Patterns of Forest Limits in South and East Asian Mountains. *The Journal of Ecology*, 78(2), 326. <https://doi.org/10.2307/2261115>
- Pandas development team, T. (2020, February). pandas-dev/pandas: Pandas. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- Peterson, B. G., Carl, P., Boudt, K., Bennett, R., Ulrich, J., Zivot, E., Cornilly, D., Hung, E., Lestel, M., & Balkissoon, K. (2018). Package 'PerformanceAnalytics.' *R Team Cooperation*.
- Pisano, E. (1977). Fitogeografía de Fuego-Patagonia chilena. I.-Comunidades vegetales entre las latitudes 52 y 56°S. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 8, 121-250
- Pisano, E. (1980). Distribución y características de la vegetación del archipiélago del Cabo de Hornos. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 11, 191-224.
- Pisano, E. (1981). Bosquejo fitogeográfico de FuegoPatagonia. *Anales del Instituto de la Patagonia*. 12, 159-171. QGIS Development-Teams. (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Rozzi, R., Crego, R.D., Contador, T., Schüttler, E., Rosenfeld, S., Mackenzie, R., Barroso, O., Silva-Rodríguez, E.A., Álvarez-Bustos, X., Silva, A., Ramírez, I., Mella, J., Herreros, J., Rendoll-Cárcamo, J., Marambio, J., Ojeda, J., Méndez, F., Moses, K.P., Kennedy, J.H. Massardo, F. (2020). Un centinela para el monitoreo del cambio climático y su impacto sobre la biodiversidad en la cumbre austral de América: la nueva red de estudios ecológicos a largo

- plazo Cabo de Hornos. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 48, 45–81. Rodríguez, E., Morris, C. S., & Belz, J. E. (2006). A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249–260. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>
- Rozzi, R. (2018). Cabo de Hornos: Un crisol biogeográfico en la cumbre austral de América. *Magallania (Punta Arenas)*, 46(1), 79–101.
- Rozzi, R., & Jiménez, J. (2014). *Ornitología Subantártica de Magallanes: Primera Década de Estudios de Aves en el Parque Etnobotánico Omora, Reserva de Biosfera Cabo de Hornos*.
- Rozzi, R., Massardo, F., Anderson, C. B., Heidinger, K., & Silander Jr, J. A. (2006). Ten principles for biocultural conservation at the southern tip of the Americas: the approach of the Omora Ethnobotanical Park. *Ecology and Society*, 11(1).
- Rozzi, R., Crego, R.D., Contador, T., Schüttler, E., Rosenfeld, S., Mackenzie, R., Barroso, O., Silva-Rodríguez, E.A., Álvarez-Bustos, X., Silva, A., Ramírez, I., Mella, J., Herreros, J., Rendoll-Cárcamo, J., Marambio, J., Ojeda, J., Méndez, F., Moses, K.P., Kennedy, J.H. Massardo, F. (2020). Un centinela para el monitoreo del cambio climático y su impacto sobre la biodiversidad en la cumbre austral de América: la nueva red de estudios ecológicos a largo plazo Cabo de Hornos. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 48, 45–81.
- Rozzi, R., Armesto, J., Goffinet, B., Buck, W., Massardo, F., Silander, J., Kalin-Arroyo, M., Russell, S., Anderson, C. B., Cavieres, L., & Callicott, J. B. (2008). Changing lenses to assess biodiversity: patterns of species richness in sub-Antarctic plants and implications for global conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 131–137.
- Rozzi, R., Armesto, J. J., Gutiérrez, J., Massardo, F., Likens, G., Anderson, C. B., Poole, A., Moses, K., Hargrove, G., Mansilla, A., Kennedy, J. H., Willson, M., Jax, K., Jones, C., Callicott, J. B., & Kalin, M. T. (2012). Integrating ecology and environmental ethics: Earth stewardship in the southern end of the Americas. *BioScience*, 62, 226–236.
- Rydin, H., Jeglum, J. K., & Bennett, K. D. (2013). *The biology of peatlands*, 2e. Oxford University Press.
- Santibáñez, P. A., Kohshima, S., Scheihing, R. A., Silva, R., Jaramillo M, J. I., Labarca P, P. J., & Casassa R, G. (2011). First record of testate amoebae on glaciers and description of a new species *Puytoracia jenswendti* nov. sp. (Rhizaria, Euglyphida). *Acta Protozoologica*, 50(1).
- Santibáñez, P., Kohshima, S., Scheihing, R., Jaramillo, J., Shiraiwa, T., Matoba, S., Kanda, D., Labarca, P., & Casassa, G. (2008). Glacier mass balance interpreted from biological analysis of firn cores in the Chilean lake district. *Journal of Glaciology*, 54(186), 452–462.
- Sato, K., & Inoue, J. (2018). Comparison of Arctic sea ice thickness and snow depth estimates from CFSR with in situ observations. *Climate Dynamics*, 50(1-2), 289–301. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3607-z>
- Schiermeier, Q. (2010). The real holes in climate science. *Nature*, 463(7279), 284–287. <https://doi.org/10.1038/463284a>
- Schulzweida, U. (2019, October). CDO User Guide. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Srur, A. M., Villalba, R., Rodríguez-Catón, M., Amoroso, M. M., & Marcotti, E. (2018). Climate and *Nothofagus pumilio* establishment at upper treelines in the Patagonian Andes. *Frontiers in Earth Science*, 6, 57.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535.
- Takeuchi, N. (2011). Glacial Ecosystems. In V. Singh, P. Singh, & U. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of snow, ice and glaciers* (pp. 330–331). Springer.
- Takeuchi, N., & Kohshima, S. (2004). A snow algal community on Tyndall Glacier in the Southern Patagonia Icefield, Chile. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 92–99.
- Thioulouse, J., & Dray, S. (2007). Interactive multivariate data analysis in R with the ade4 and ade4TkGUI packages. *Journal of Statistical Software*, 22(5), 1–14.
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R., & Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1), 11–14. <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>
- Vera, A., Zúñiga-Reinoso, A., & Muñoz-Escobar, C. (2012). Perspectiva histórica sobre la distribución de *Andiperla willinki* "dragón de la Patagonia" (Plecoptera: Gripopterygidae). *Revista Chilena de Entomología*, 37, 87–93
- Villalba, R., Grosjean, M., & Kiefer, T. (2009). Long-term multi-proxy climate reconstructions and dynamics in South America (LOTRED-SA): State of the art and perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 175–179. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2009.08.007>

- Wang, C., Graham, R. M., Wang, K., Gerland, S., & Granskog, M. A. (2019). Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution. *The Cryosphere*, 13(6), 1661-1679.
- Wardle, P. (1974). Alpine timberlines. In J. D. Ives & R. G. Barry (Eds.), *Arctic and alpine environments* (pp. 371-402). Methuen.
- Weidemann, S., Sauter, T., Schneider, L., & Schneider, C. (2013). Impact of two conceptual precipitation downscaling schemes on mass-balance modeling of Gran Campo Nevado ice cap, Patagonia. *Journal of Glaciology*, 59(218), 1106-1116. <https://doi.org/10.3189/2013JoG13J046>
- Weidemann, S., Sauter, T., Kilian, R., Steger, D., Butorovic, N., & Schneider, C. (2018). A 17-year Record of Meteorological Observations Across the Gran Campo Nevado Ice Cap in Southern Patagonia, Chile, Related to Synoptic Weather Types and Climate Modes. *Frontiers in Earth Science*, 6, 53. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00053>
- Weidemann, S., Arigony-Neto, J., Jaña, R., Netto, G., González, I., Casassa, G., & Schneider, C. (2020). Recent Climatic Mass Balance of the Schiaparelli Glacier at the Monte Sarmiento Massif and Reconstruction of Little Ice Age Climate by Simulating Steady-State Glacier Conditions. *Geosciences*, 10(7), 272. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070272>
- Woodward, F. I., Smith, T. M., & Emanuel, W. R. (1995). A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4), 471-490.

Apéndice: Afiliación de cada autor

Número afiliación	Nombre de la institución y/o organización Afiliación
1	Programa de Conservación Biocultural Subantártica, Parque Etnobotánico Omora, Universidad de Magallanes - Instituto de Ecología y Biodiversidad, Puerto Williams, Chile.
2	Centro de Investigación Gaia Antártica (CIGA), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
3	Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB), www.ieb-chile.cl
4	Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
5	Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Avenida Raúl Bitrán 1305, La Serena, Chile.
6	Smithsonian National Zoo and Conservation Biology Institute, Conservation Ecology Center, 1500 Remount Rd, Front Royal, VA 22630, USA.
7	Department of Integrative Biology, University of Colorado, 1121 Arapahoe, Denver, CO 80204, USA.
8	Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
9	Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, CR ² , Santiago, Chile.
10	Departamento Científico, Instituto Antártico Chileno, Punta Arenas, Chile.
11	Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
12	Sub-Antarctic Biocultural Conservation Program, Department of Philosophy and Religion & Department of Biological Sciences, University of North Texas, 1155 Union Circle, Denton, TX, USA.

Autor	Afiliación
Francisco Aguirre	1, 2
Francisco A. Squeo	3, 4, 5
David López	5
Ramiro Crego	6
Brian Buma	7
Danny Carvaja	1, 3, 8, 9
Ricardo Jaña	10
Gino Casassa	2, 11
Ricardo Rozzi	1, 3, 12