



Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

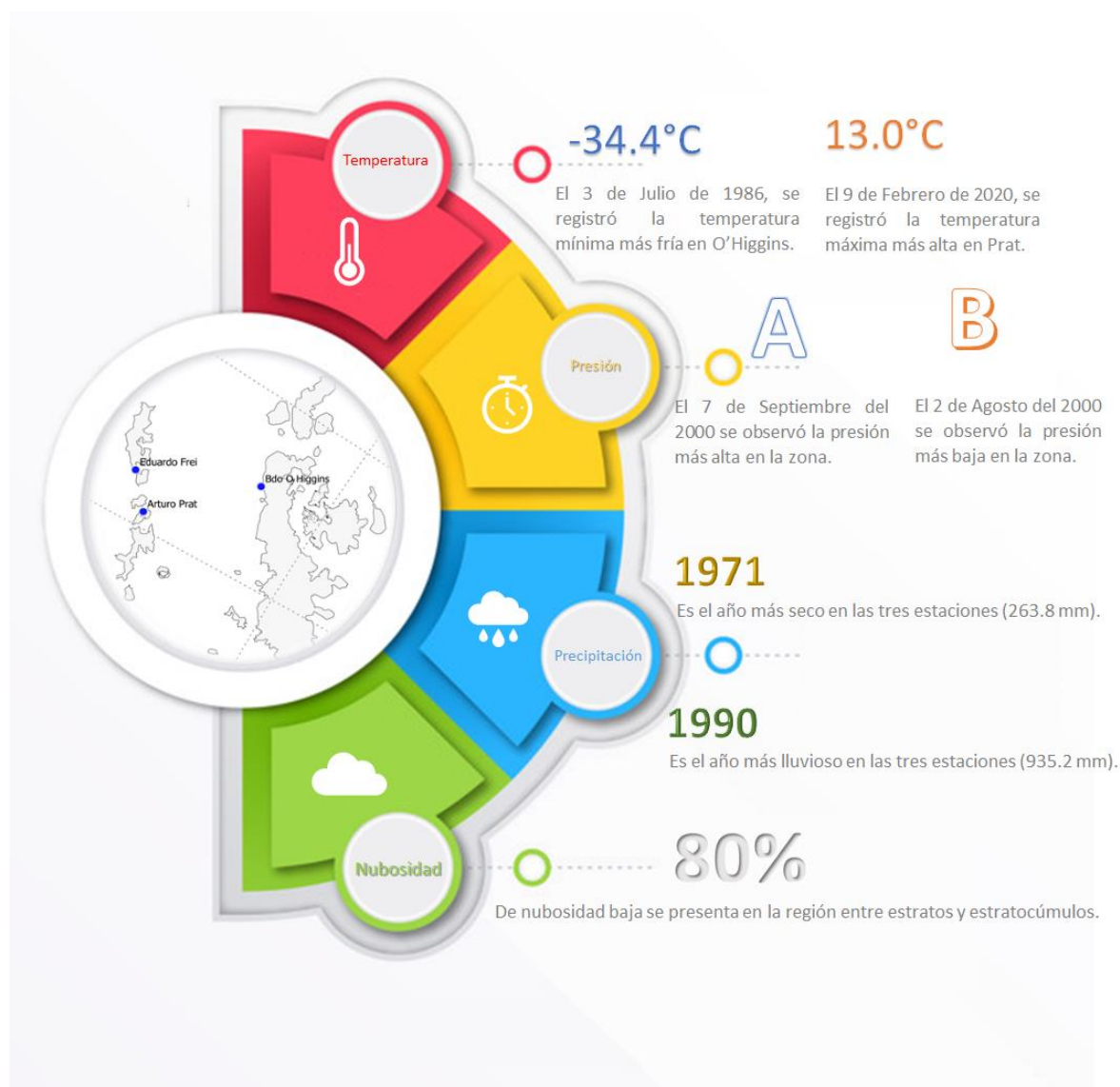
Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Elaborado por:
Dirección Meteorológica de Chile
Sección Climatología
Mayo 2021

Tabla de Contenidos

INTRODUCCIÓN	5
DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA	6
DATOS	6
EL CLIMA DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA Y LOS FACTORES QUE LA CONTROLAN	9
EL ENTORNO CLIMATOLÓGICO DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA	10
COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ESTACIONES CHILENAS EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA	15
TEMPERATURAS EXTREMAS	15
PRECIPITACIÓN	23
PRESIÓN	28
VIENTO	32
HUMEDAD RELATIVA	39
NUBOSIDAD	43
VISIBILIDAD	52
TIEMPO PRESENTE	56
HORAS DE SOL	57
ÍNDICE DE RADIACIÓN	60
ANEXOS	61
BIBLIOGRAFÍA	62

Resumen



INTRODUCCIÓN

La Península Antártica es una región de especial interés climatológico. El final del siglo XX ha sido un período de aumento de las temperaturas de superficie, de la pérdida de masa de hielo por el derretimiento de los glaciares y de las nevadas, que tienen un impacto directo y medible en los niveles globales del mar. Sin embargo, el período de observación para la Antártida es corto, estos solo comenzaron en la década de 1940 y gran parte de nuestra comprensión de la variabilidad climática espacial más amplia y la dinámica glacial se limita a la era de los satélites (después de 1979).

El interés de Chile en la Península Antártica se ha demostrado desde 1947 cuando se inaugura la primera base chilena en la Antártica perteneciente a la Armada de Chile, más adelante en diciembre de 1969 se estableció la base Eduardo Frei Montalva como Centro de Comunicaciones Antártica y Centro Meteorológico Antártico con la responsabilidad de la colección de datos meteorológicos de las estaciones localizadas en la península [Carrasco, 2007].

Debido a los impactos del cambio climático observados en los alrededores de la Península Antártica, como la pérdida de masas de hielo en la costa, el aumento del área de distribución de especies vegetales en la región occidental de la Península Antártica y en las islas cercanas en los últimos 50 años [IPCC, 2014], las estaciones de observación de variables atmosféricas son fuente de valiosa información para monitoreo y estudios de cambio climático en la región, por lo que se hace necesario actualizar toda la información del clima y la variabilidad climática que está teniendo lugar en la Península Antártica.

El presente documento se centra en las observaciones meteorológicas en las estaciones de superficie chilenas ubicadas al Noroeste de la Península Antártica, siguiendo los procedimientos y protocolos para el análisis y cálculo de valores normales exigidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011).

DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

TERRITORIO ANTÁRTICO CHILENO

En 1940, durante el gobierno del presidente Pedro Aguirre Cerda se precisan los límites del Territorio Chileno Antártico, constituido por los meridianos 53° y 90° longitud oeste de Greenwich. El territorio chileno incluye la Península Antártica, que corresponde a la porción de tierra más septentrional del continente antártico, rodeada por el mar de Bellingshausen al oeste y por el mar de Weddell al este. La Península Antártica por su ubicación, presenta mejores condiciones climáticas que hacia el interior del continente, por lo tanto, es la región de la Antártica que alberga la mayor cantidad de bases e instalaciones, las cuales están destinadas principalmente a apoyar la investigación científica, sea para la colaboración directa, o el apoyo logístico y funcionamiento de los equipos que registran información.

BASES ANTÁRTICAS CHILENAS

En 1946, el presidente Gabriel González Videla logra realizar la primera expedición oficial de Chile a la Antártica a cargo de representantes de las Fuerzas Armadas y de civiles. Esta expedición construyó la primera base chilena en la Antártica, llamada base naval “Capitán Arturo Prat”, localizada en la isla Greenwich (sin registros entre los años 2004-2008). Luego en 1948, se llevó a cabo la segunda expedición chilena a la Antártica, construyéndose la segunda base chilena “Bernardo O’Higgins”, la cual es operada por el Ejército. Posteriormente, en 1955 se inauguró la base aérea, “presidente Pedro Aguirre Cerda”, en la Isla Decepción, la cual fue destruida por una erupción volcánica, debiendo reemplazarse en 1969 por el Centro Meteorológico “Presidente Eduardo Frei Montalva” ubicado en la Isla Rey Jorge.

El Centro Meteorológico es el organismo encargado de mantener la vigilancia permanente sobre el espacio aéreo del territorio antártico, con la elaboración de pronósticos y observaciones meteorológicas, principalmente referidos al Aeródromo Teniente Marsh, el cual sirve como punto de ingreso a gran cantidad de bases de esa área. La Base Frei comprende además la Villa Las Estrellas, un hospital, una escuela, un banco, un pequeño supermercado, una oficina de correos y una capilla, entre otros servicios.

DATOS

DATOS DE ESTACIONES

En este estudio se utilizan registros diarios de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, suma diaria de la precipitación (líquida y transformada a líquida 1/1), promedios diarios de la presión (a nivel medio del mar) y de la cantidad de cielo cubierto (en octas), registros sinópticos (registros cada 3 horas) de dirección e intensidad del viento, de la visibilidad horizontal, de la altura de la base de la nube y de los fenómenos significativos del tiempo presente, además de la suma diaria de las horas de sol (Frei y O’Higgins) y el índice máximo diario de la radiación UV (Frei), para los períodos 1960-2020 en Arturo Prat y Bernardo O’Higgins y para el período 1970-2020 para Eduardo Frei, ubicadas en el Noroeste de la Península Antártica (Fig. 1 y Tabla 1).

Los registros de precipitación e intensidad del viento en la estación Frei mostraron discontinuidad en las series, debido al cambio de estación (viento) y al cambio de metodología del registro de la precipitación, por lo que se realizó una homogeneidad de los datos, utilizando para ello el paquete estadístico Climatol del software RStudio, empleando el procedimiento SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) Alexandersson, 1986; Alexandersson and Moberg, 1997. Los resultados de la aplicación del test a las estaciones del estudio, se muestran en el anexo. Aunque, Climatol entrega las series rellenas, se

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

mantuvo el registro de los días faltantes en el caso del viento por estar asociado a la dirección.

Tabla 1: Estaciones meteorológicas con el período utilizado, su ubicación geográfica y la altura

Estación	Período	Latitud	Longitud	Altura (m)	Institución
Eduardo Frei	1970-2020	- 62.2°	- 58.9°	45	DMC
Arturo Prat	1960-2020	- 62.5°	- 59.6°	5	Armada de Chile
Bernardo O'Higgins	1960-2020	- 63.3°	- 57.9°	10	Ejército de Chile

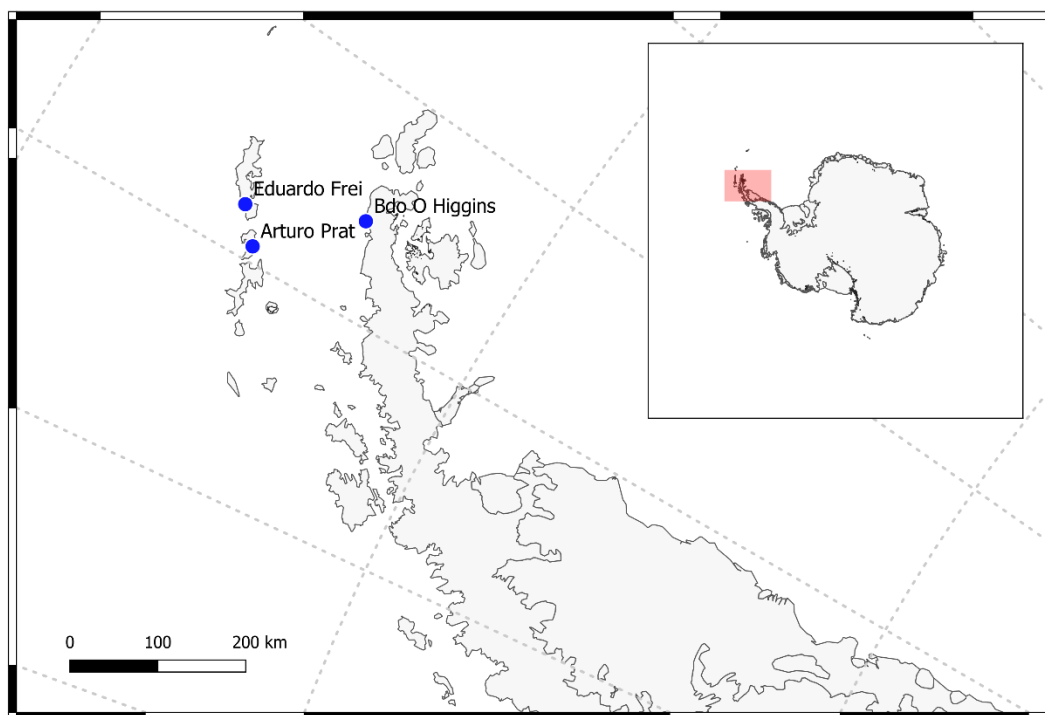


Figura 1: Ubicación de estaciones de la península Antártica

Para el cálculo de los promedios mensuales, se omitió el registro en el caso de que se observen 11 o más días faltantes del mes y en el caso de que los días faltantes superen los 5 días consecutivos. Para el cálculo de valores mensuales provenientes de sumas diarias como el caso de la precipitación y las horas de sol, el valor mensual sólo se calculó cuando se dispuso de la totalidad de registros diarios en el mes, respetando la normativa OMM (2017). Se consideró también que los datos faltantes durante el año no superen el 85%, en caso contrario se estableció que el año completo queda como “no disponible”, ya que al utilizar estos registros podrían alterar el ciclo anual de las variables usadas (Tabla 2). El control de calidad de los datos, dejó fuera de este estudio las observaciones registradas en la década de 1960-1969, debido a inconsistencia en los datos.

Tabla 2: Porcentaje de datos faltantes por variables en cada estación

Variable	Frei	Prat	O'Higgins
Temperatura Mínima	2.2	13.2	4
Temperatura Máxima	2.2	15.1	4.1
Temperatura Media	2.2	15.1	4.5
Precipitación	0.3	10.6	3.6
Presión (QFF)	4.7	11.7	4.8
Humedad	4.8	12.3	7.5
Cielo Cubierto	4.6	10.5	2.9
Visibilidad	2.1	10.7	2.5
Dirección Viento	3.8	10.1	6.5
Intensidad Viento	3.8	10.2	6.5
Nubosidad	6	21.4	15.6
Tiempo Presente	0.3	27.4	23.5
Horas de Sol	10.3(*)	-	11.2(**)
Índice UV	0.8(***)	-	-

(*) Porcentaje de datos faltantes durante el período 1981-2016

(**) Porcentaje de datos faltantes durante el período 1982-2020

(***) Porcentaje de datos faltantes durante el período 2009-2018

Para el registro de valores normales, se calculó el promedio del período cuando se dispuso de por lo menos el 85% de los registros anuales, en caso contrario (estación Arturo Prat), se realizó el cálculo y se presentan a modo de referencia, se utilizó el último período climático 1991-2020.

La tendencia lineal analizada en todas las variables meteorológicas de este estudio, se obtuvo a través del método de mínimos cuadrados con los valores anuales y estacionales, aplicándose el estadístico F para determinar su significancia estadística al nivel del 5% de confianza. Para el cálculo de la tendencia de la zona, se omitió la estación Arturo Prat por la escasez de registros de la estación.

Para la variable humedad relativa, se utilizaron los registros medios de la zona debido a la coincidencia de los valores en cada una de las estaciones de este estudio.

Se presenta el análisis de los fenómenos significativos del tiempo presente en la estación de Eduardo Frei, debido a la escasez de registros en Arturo Prat y Bernardo O'Higgins.

EL CLIMA DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA Y LOS FACTORES QUE LA CONTROLA

PATRONES OBSERVADOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

MODO ANULAR DEL SUR

La distribución norte-sur de la presión en superficie alrededor de la Antártica está sometida a una variabilidad en la intensidad del gradiente meridional de presión. Debido al carácter circumpolar de esta variación, a este fenómeno se le denomina Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés), conocida también como Oscilación Antártica (AAO). El SAM es un índice climático que se expresa como la diferencia entre los campos de presión a nivel del mar entre las latitudes 40° S - 65° S del hemisferio sur.

El SAM es el principal modo de variabilidad de la circulación atmosférica de las zonas extra tropicales del hemisferio sur. La estructura y variabilidad del SAM son consecuencia de la dinámica interna de la atmósfera y es una expresión de la variabilidad de la trayectoria de las bajas presiones y de la corriente en chorro [Hartmann et Lo, 1998; Limpasuvan et Hartmann, 2000]. Marshall (2003) definió un índice SAM basado en observaciones de estaciones adecuadamente situadas. Debido tanto al alza en la concentración de GEI como a la influencia del agujero de ozono sobre la Antártica [Thompson et al., 2011], el SAM presenta desde hace varias décadas una tendencia hacia valores positivos [Thompson et al., 2011; Gillett et al., 2013; Jones et al., 2016], esto implica que las rutas de las tormentas se desplazan hacia los polos.

BAJA DEL MAR DE AMUNDSEN-BELLINGSHAUSEN (ABSL)

La Península Antártica atraviesa la Vaguada Circumpolar (CPT) de baja presión media al nivel del mar que rodea el continente antártico. Las partes central y norte de la Península están, bajo la influencia de los fuertes vientos del oeste que prevalecen al norte del mínimo de la vaguada, mientras que en las partes más meridionales de la región predominan los vientos del este costeros. La CPT, sin embargo, no es completamente simétrica, además que hay centros climatológicos de baja presión dentro de esta característica, se pueden distinguir en ella tres núcleos climatológicos de bajas presiones, centrados en torno a 20°E, 90°E y 150°W, que se extienden a todo el espesor de la tropósfera [King et Turner 1997, Turner et al. 2013]. Al tercero se le suele denominar baja del mar de Amundsen-Bellingshausen (ABSL) (Fig. 2) [Fogt et al. 2012], y es la estructura sinóptica climatológicamente más relevante al oeste de la Península Antártica.

La variabilidad de la circulación atmosférica sobre los mares de Amundsen y Bellingshausen es mayor que en cualquier otra región del hemisferio sur [Lachlan-Cope et al. 2001], y se puede comprobar tanto en la presión en superficie y geopotencial en altura, así como en la densidad de vórtices ciclónicos [Turner et al. 2013]. Se ha demostrado que la razón de este

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

máximo de variabilidad reside en la asimetría de la orografía antártica, en concreto el desplazamiento del centro de masas del continente respecto del Polo Sur [Lachlan-Cope et al. 2001].

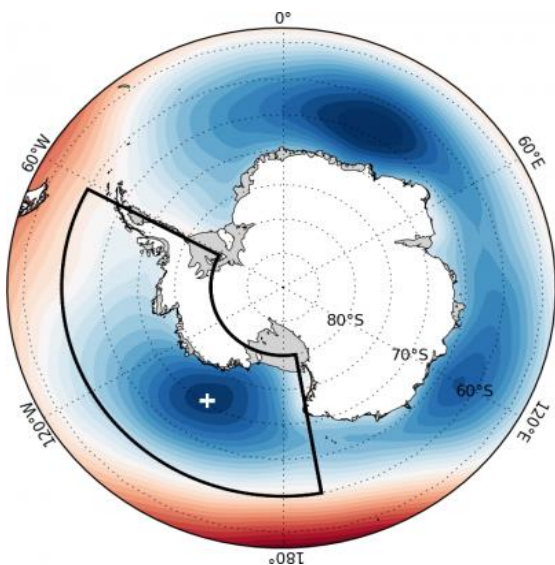


Figura 2: Presión media estacional al nivel del mar alrededor de la Antártida con la ubicación de la ASL marcada con un símbolo '+'. El sector utilizado para derivar los índices de ABSL (versión 2) está encerrado por el recuadro de línea negra [contribución de S. Hosking].

EL ENTORNO CLIMATOLÓGICO DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Como se mencionó, la ABSL tiene una gran influencia en el clima de la Península Antártica. La presencia de la ABSL baja significa que los vientos que influyen en la costa oeste de la Península son, en promedio, del noroeste en lugar del oeste, transportando masas de aire de latitudes medias relativamente cálidas hacia esta región y manteniéndola suave en comparación con otras regiones en una latitud similar. A niveles bajos en el lado este de la Península, el aire frío continental fluye hacia el norte como una barrera de viento, impulsado por el centro climatológico de baja presión al este del mar de Weddell [Schwerdtfeger, 1975; Parroquia, 1983]. Los contrastes de vientos de baja altura de los dos lados de la Península, provocan que las temperaturas superficiales medias anuales en la costa oeste sean entre 5 y 10 ° C más cálidas que las de latitudes similares en la costa este [Schwerdtfeger, 1975; Martin y Peel, 1978]. Las diferencias entre el clima de la península de la costa este y oeste aumentan aún más al contrastar los regímenes de hielo marino en los dos lados. Los campos medios de los meses extremos de máxima y mínima extensión de hielo marino correspondientes a septiembre y febrero muestran que sobre el mar de Weddell existen las mayores concentraciones de hielo marino y que alcanzan menores latitudes que en Bellingshausen y Amundsen. Durante el invierno el hielo marino alcanza latitudes cercanas a 55°S sobre el este del mar de Weddell y sólo 65°S sobre Bellingshausen y Amundsen. Durante la retracción del verano el sector este del Weddell sufre el mayor cambio estacional presentando mínimos valores en muy altas latitudes, mientras que, en el

sector oeste del mar de Weddell la retracción de verano es mínima, encontrándose valores de concentración de hielo marino cercanos a 70°S. En los mares de Bellingshausen y Amundsen la retracción es regular hacia el continente quedando hielo sólo en una angosta franja costera [Compagnucci y Barreira, 2006].

EL CLIMA MEDIO EN LAS ESTACIONES CHILENAS DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

La Península Antártica presenta diferencias entre el sector este y oeste de esta, los gradientes térmicos de la temporada de verano austral (DEF) son relativamente débiles en toda la Península, la temperatura media de verano en la zona este es del orden de 1°C más fría que en la costa oeste, y el noroeste presenta una diferencia del orden de 0.5°C respecto al suroeste de la Península Antártica. En el invierno austral (JJA), los gradientes de temperatura tanto meridionales como zonales son más marcados. En la costa oeste de la Península, y a lo largo de la parte norte de la costa oeste, el ciclo anual de temperatura es típico del observado en gran parte de la Antártica marítima, con un amplio máximo de verano y las temperaturas más frías que ocurren en los meses invernales. A lo largo de las partes central y sur de la costa este, el ciclo anual se asemeja más al observado en la Antártida continental, con una temporada de verano corta y un invierno largo [Turner et al., 1995].

Las estaciones chilenas de la Península Antárticas (ubicadas en la costa oeste), presentan un ciclo anual de temperatura como el observado en el clima marítimo, temperaturas medias positivas y escasa variabilidad en la temporada de verano, mientras que en los meses invernales las medias descienden y presentan mayor variabilidad. Cabe destacar que las estaciones ubicadas en las islas (Eduardo Frei en Rey Jorge y Arturo Prat en Greenwich), son relativamente más cálidas que la estación continental (Bernardo O'Higgins), con diferencias del orden de 1°C en la temporada de verano austral, incrementándose a 2°C en la temporada invernal, durante el período completo del análisis. La temperatura media anual varía entre -3.6°C en O'Higgins y -2.3°C en Eduardo Frei (Fig. 3).

La mayoría de las precipitaciones que caen en la costa oeste de la Península provienen de frentes asociados con sistemas meteorológicos de escala sinóptica que se desplazan a través del mar de Bellingshausen [Turner et al., 1995]. La precipitación frontal se ve reforzada a medida que el aire se ve obligado a elevarse sobre la escarpada orografía de la Península. La orografía montañosa de la Península genera grandes variaciones locales de acumulación, destacando la precipitación en los picos de la costa oeste durante las estaciones de transición (otoño-primavera) [Turner et al., 1997]. En estas épocas del año la ABSL es más profunda y está ubicada más al sur, por lo que el número e intensidad de ciclones de escala sinóptica que inciden en la Península es máximo.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

En cuanto a las precipitaciones registradas en las estaciones chilenas de la Península Antártica durante el período 1970-2020, muestran las características propias de la precipitación de la costa oeste, es decir, presentan un ciclo anual con dos máximos centrados en los meses de marzo y octubre. Cabe destacar que, la estación más lluviosa es Arturo Prat con un promedio anual de 708.9 mm, seguida por Bernardo O'Higgins con 558.3 mm y finalmente Eduardo Frei con un promedio anual de 510.4 mm (Fig. 3).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

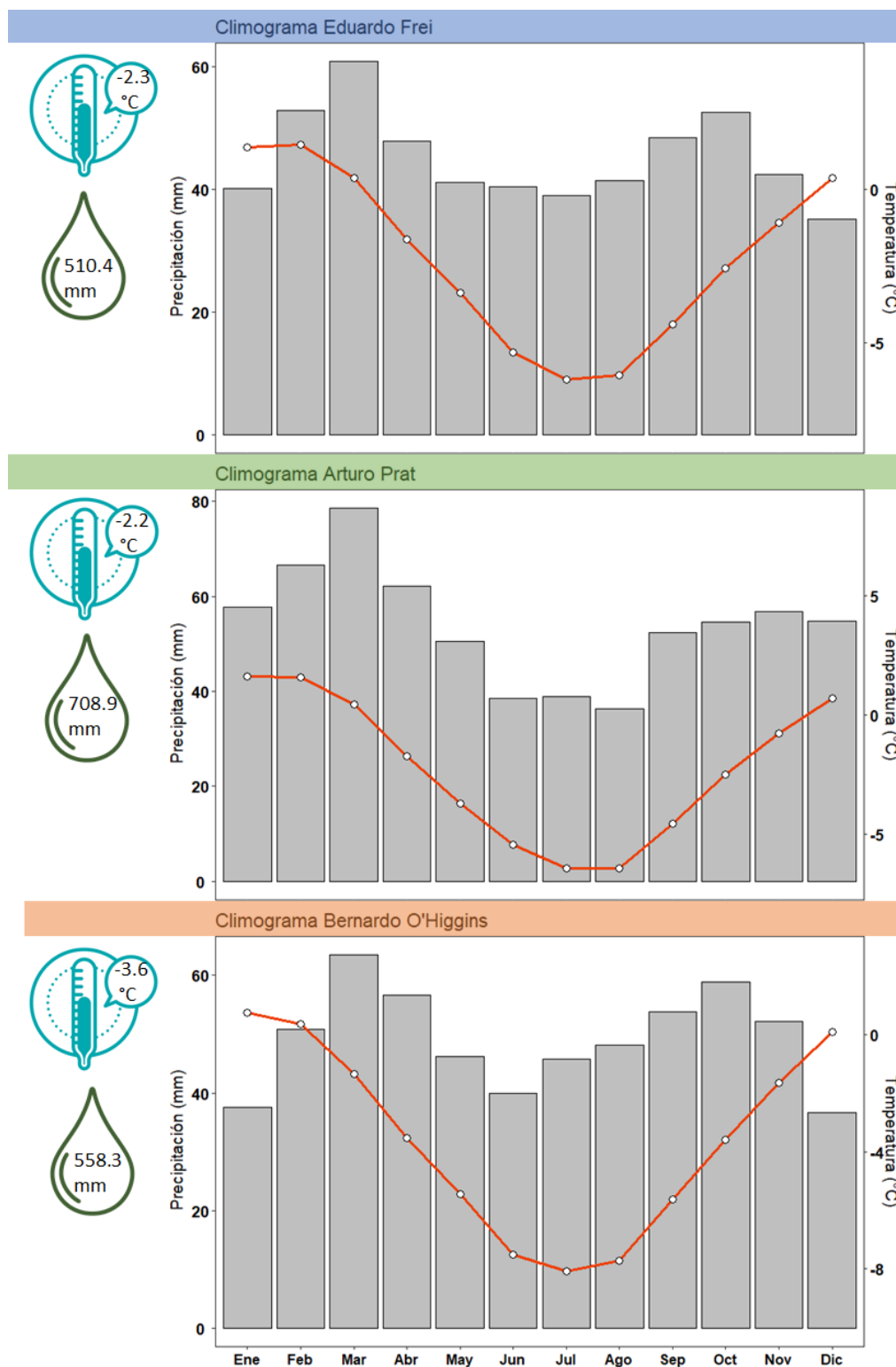


Figura 3: Climogramas de las estaciones chilenas de la Península Antártica. Las barras grises indican la precipitación y línea anaranjada muestra la temperatura media para el período completo del estudio (1970-2020). Los íconos muestran la temperatura y precipitación media anual para el período completo de estudio.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

La temperatura media anual de las estaciones chilenas de la península ha aumentado 0.8°C desde 1970 hasta la actualidad. El valor climatológico del período actual de 30 años 1991-2020 es de -2.60°C . 1989 ha sido el año más cálido hasta ahora en las estaciones de chilenas de la Península Antártica con una temperatura media de -1.3°C , mientras que el año más frío es 1980 con una temperatura media anual de -4.3°C (Fig. 4).

La precipitación media anual en el sector noroeste de la Península Antártica, representado por las estaciones chilenas de la Península, ha aumentado 30.9 mm desde 1970 hasta la actualidad. El valor climatológico del último período 1991-2020 es de 621.0 mm. En cuanto a los años extremos, 1990 ha sido el año más lluvioso hasta ahora en las estaciones de chilenas de la Península Antártica con un registro de 935.2 mm, mientras que el año más seco es el 1971 con 263.8 mm en promedio (Fig. 5).

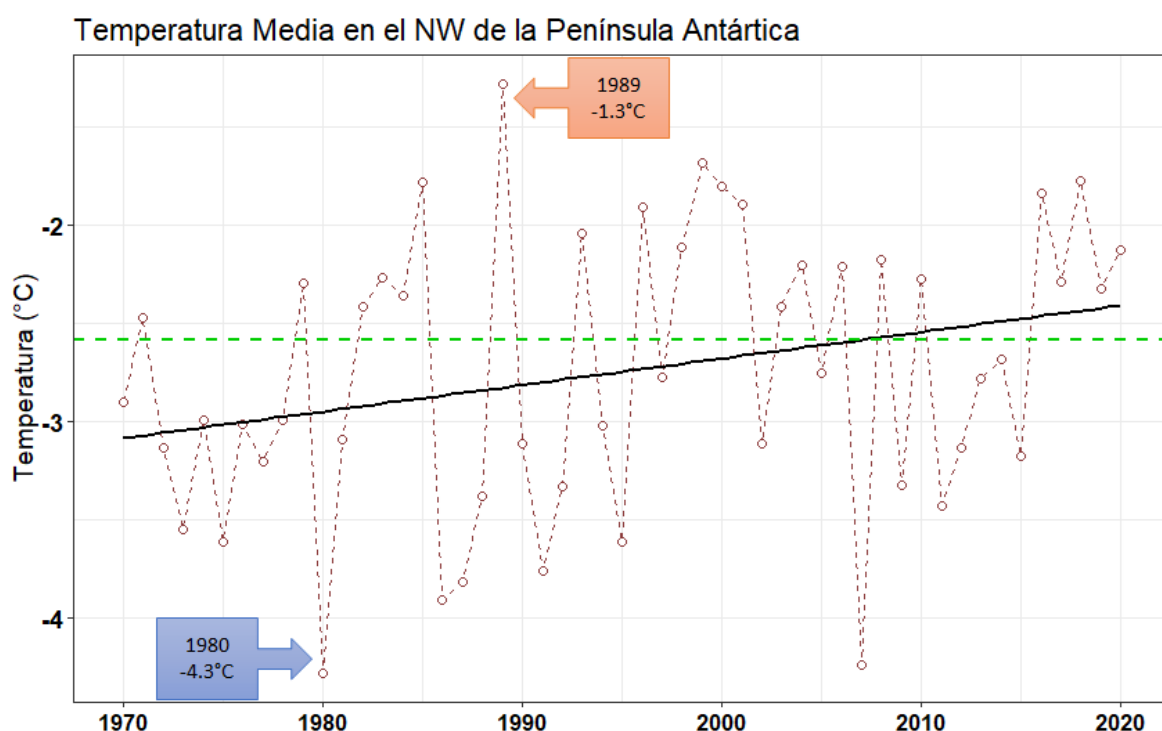


Figura 4.- Temperatura media anual de las estaciones chilenas en la Península Antártica (valores medios del área) de 1970 a 2020 (línea roja), tendencia lineal de la temperatura media (línea negra) y valor climatológico para el período 1991-2020 (línea verde). Las cajas de colores representan el año más cálido (rojo) y el año más frío (azul).

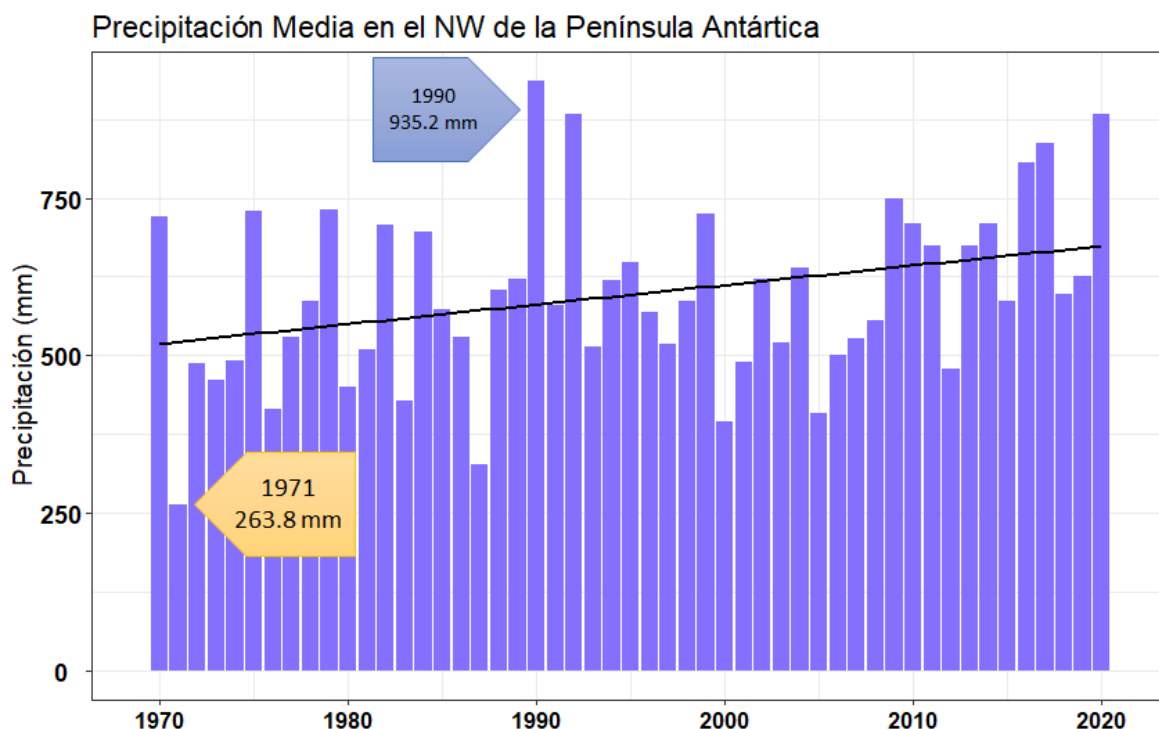


Figura 5: Precipitación media anual de las estaciones chilenas en la Península Antártica (valores medios del área) de 1970 a 2020 (barras azules), tendencia lineal de la precipitación (línea negra) y valor climatológico para el período 1991-2020 (línea verde). Las cajas de colores representan el año más lluvioso (azul) y el año más seco (amarillo).

COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ESTACIONES CHILENAS EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

TEMPERATURAS EXTREMAS.

El promedio de las temperaturas extremas de las estaciones chilenas de la Península Antártica, presenta escasa variación entre los registros del sector insular y el continental, La temperatura máxima promedio de O'Higgins es más baja que en Frei y Prat entre 1.1°C y 1.6°C, mientras que el promedio de la mínima en O'Higgins es más frío que Frei en 1.4°C y en Prat 1.6°C, calculadas para el período climatológico 1991-2020. Cabe señalar la escasa variación térmica entre la máxima y la mínima que presentan las estaciones, donde no superan los 4°C (Fig. 6).

En términos generales, los registros en las estaciones chilenas de la península, presentan valores negativos, tanto en la mínima como en la máxima, salvo en los meses de verano, incluyendo hasta el otoño en la máxima, esta condición de valores positivos se observa también en los registros de temperatura mínima en los meses de enero y febrero en las estaciones insulares. Los promedios estacionales, indican que el invierno es la estación más

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

fría, el verano la más cálida y que en primavera se observan temperaturas más bajas que en otoño tanto para la mínima como para la máxima. Además, la diferencia entre estaciones insulares y continental se es mayor en los períodos de otoño e invierno que en los meses de primavera y verano (Fig. 6). Las temperaturas extremas, al igual que la media presentan un marcado ciclo estacional con valores máximos en enero y mínimos en julio. Con relación a los valores extremos, el percentil 10% tiene registros negativos durante todo el año en la temperatura mínima observándose sobre los -15°C , por lo que encontrar temperaturas bajo este umbral son anómalos para la zona. Mientras que el percentil 90% en la temperatura máxima se observa bajo los 4.5°C (Tablas 1 y 2).

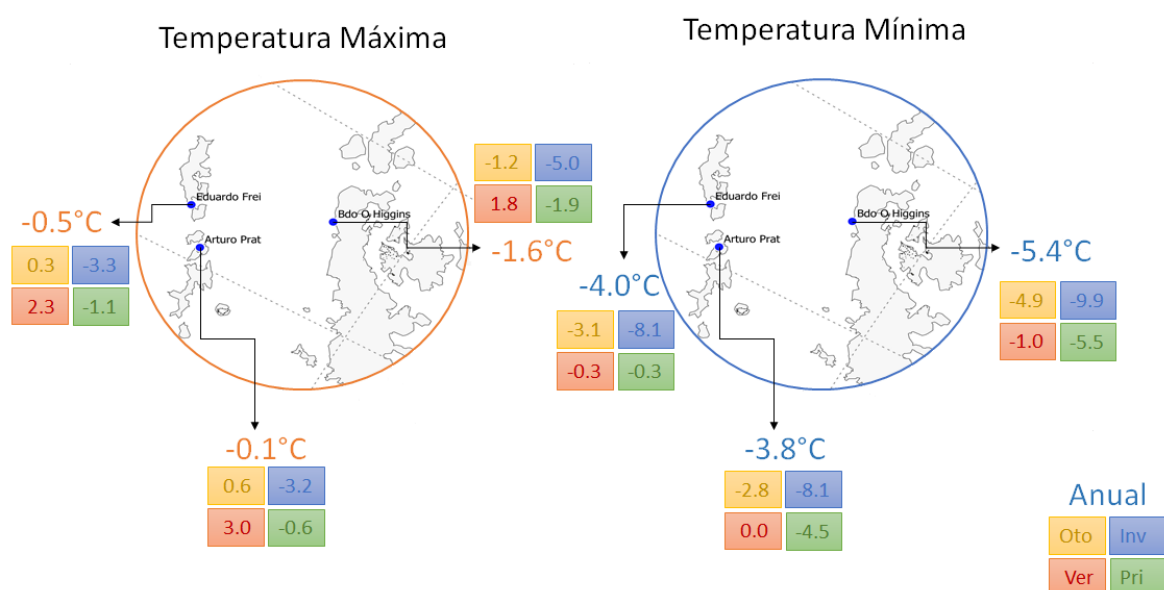


Figura 6: Promedio anual climatológico de temperatura máxima (en rojo) y de temperatura mínima (en azul) para el período 1991 y 2020 en las estaciones chilenas en la Península Antártica. Los cuadros de color muestran los promedios estacionales (amarillo, otoño; azul, invierno; verde primavera y rojo, verano).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Tabla 1: Climatología mensual de la temperatura máxima en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de Temperatura Máxima Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-0.5	2.8	2.8	1.8	0.1	-1.1	-3.0	-3.5	-3.3	-2.3	-1.1	0.1	1.4
P10	-1.1	1.6	1.9	1.0	-1.3	-2.8	-5.1	-6.8	-5.6	-3.8	-1.8	-0.8	0.6
P33	-0.7	2.6	2.6	1.6	-0.2	-1.0	-4.1	-3.7	-3.6	-2.7	-1.2	-0.3	1.2
P66	-0.1	3.1	3.1	2.1	0.5	-0.4	-2.2	-2.3	-2.6	-1.7	-0.9	0.6	1.8
P90	0.1	3.5	3.6	2.4	1.3	0.1	-1.0	-1.7	-1.6	-0.9	-0.2	0.9	2.1
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-0.1	3.4	3.4	2.2	0.5	-1.0	-2.9	-3.4	-3.3	-2.1	-0.6	0.8	2.3
P10	-1.0	2.7	2.1	1.4	-0.7	-2.8	-5.0	-5.7	-5.6	-4.0	-1.8	-0.1	1.3
P33	-0.3	3.1	3.1	1.8	0.1	-1.0	-3.9	-3.8	-3.6	-2.6	-0.6	0.4	1.9
P66	0.4	3.8	3.6	2.8	1.0	-0.3	-2.1	-2.3	-2.5	-1.4	-0.1	1.3	2.7
P90	0.7	4.1	4.4	3.1	2.0	0.2	-1.0	-1.3	-1.6	-0.8	0.5	1.9	3.2
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-1.6	2.3	1.7	0.5	-1.5	-2.7	-4.8	-5.3	-4.9	-3.4	-1.9	-0.2	1.3
P10	-2.5	1.5	0.7	-0.5	-3.0	-4.2	-7.8	-9.4	-6.7	-5.0	-3.2	-1.5	0.5
P33	-1.9	2.0	1.5	0.1	-1.7	-2.8	-5.9	-6.2	-5.4	-4.1	-2.5	-0.5	1.2
P66	-1.3	2.7	2.2	0.8	-0.9	-2.0	-3.9	-4.3	-4.3	-2.6	-1.1	0.4	1.7
P90	-0.7	3.2	2.8	1.5	0.3	-0.7	-1.9	-2.7	-3.3	-1.7	-0.4	0.9	2.2

Tabla 2: Climatología mensual de la temperatura mínima en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de Temperatura Mínima Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-4.0	0.1	0.0	-1.2	-3.2	-5.0	-7.6	-8.6	-8.2	-6.6	-4.4	-2.5	-1.0
P10	-5.2	-0.8	-1.0	-2.3	-5.5	-6.9	-10.5	-13.4	-11.0	-9.9	-6.1	-3.7	-1.8
P33	-4.4	-0.1	-0.2	-1.5	-3.6	-5.0	-9.4	-9.3	-9.0	-7.3	-4.6	-2.9	-1.2
P66	-3.5	0.3	0.4	-0.9	-2.6	-4.4	-6.3	-6.6	-7.3	-5.6	-3.7	-1.9	-0.8
P90	-3.1	0.7	0.8	-0.2	-1.2	-3.2	-4.3	-5.6	-5.8	-4.5	-2.9	-1.7	-0.3
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-3.8	0.4	0.3	-0.9	-2.7	-4.7	-7.4	-8.5	-8.3	-7.0	-4.4	-2.2	-0.7
P10	-5.0	-0.5	-0.7	-2.0	-4.7	-7.5	-10.5	-12.3	-11.1	-10.0	-6.1	-3.5	-1.9
P33	-4.1	0.3	0.0	-1.3	-3.3	-4.8	-8.8	-9.4	-8.8	-7.8	-4.6	-2.6	-0.9
P66	-3.3	0.7	0.8	-0.4	-2.3	-4.0	-6.1	-6.9	-7.5	-5.8	-3.6	-1.5	-0.4
P90	-2.8	1.2	1.2	0.1	-0.5	-3.0	-4.4	-5.7	-5.8	-4.6	-2.7	-1.1	0.1
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	-5.4	-0.6	-1.0	-2.9	-5.1	-6.8	-9.4	-10.3	-10.0	-7.9	-5.5	-3.1	-1.4
P10	-6.3	-1.2	-2.1	-4.4	-7.7	-8.2	-12.4	-14.2	-11.7	-10.6	-7.4	-4.7	-2.2
P33	-5.8	-0.7	-1.1	-3.2	-5.5	-7.0	-11.1	-11.0	-10.7	-9.2	-6.1	-3.6	-1.6
P66	-5.0	-0.4	-0.6	-2.5	-4.1	-6.3	-7.9	-9.1	-9.3	-7.0	-4.7	-2.5	-1.1
P90	-4.4	-0.1	-0.1	-1.7	-3.3	-4.7	-6.1	-7.5	-8.0	-5.3	-3.2	-1.9	-0.7

ANOMALÍA

El promedio de las temperaturas extremas entre los años 1970 y 2020, indica que la temperatura mínima tiene mayor variabilidad que la máxima, observándose en su mayoría bajo el promedio climatológico del período 1991-2020, cabe destacar que, el último período climático es el más cálido con una diferencia de 1.1°C para la mínima y de 0.3°C en la máxima comparado con el período climático 1960-1990 (Tabla 3).

Se observa una tendencia al aumento de temperatura mínima del orden de $0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y en la máxima este aumento es más somero, del orden de $0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el período 1970-2020, cabe mencionar que este aumento de temperatura es más marcado hasta el año 2000 con una tendencia de la temperatura mínima de $0.4^{\circ}\text{C}/\text{década}$, posteriormente, a partir del año 2001 hasta el 2020, el aumento en la tendencia de la temperatura mínima es del orden de $0.01^{\circ}\text{C}/\text{década}$. El año más frío es 1980 con 2.7°C y 1.3°C bajo lo normal para la mínima y máxima respectivamente, mientras que el año más cálido es 1989 con 1.4°C y 1.2°C sobre el valor climático del período 1991-2020 (Fig. 7).

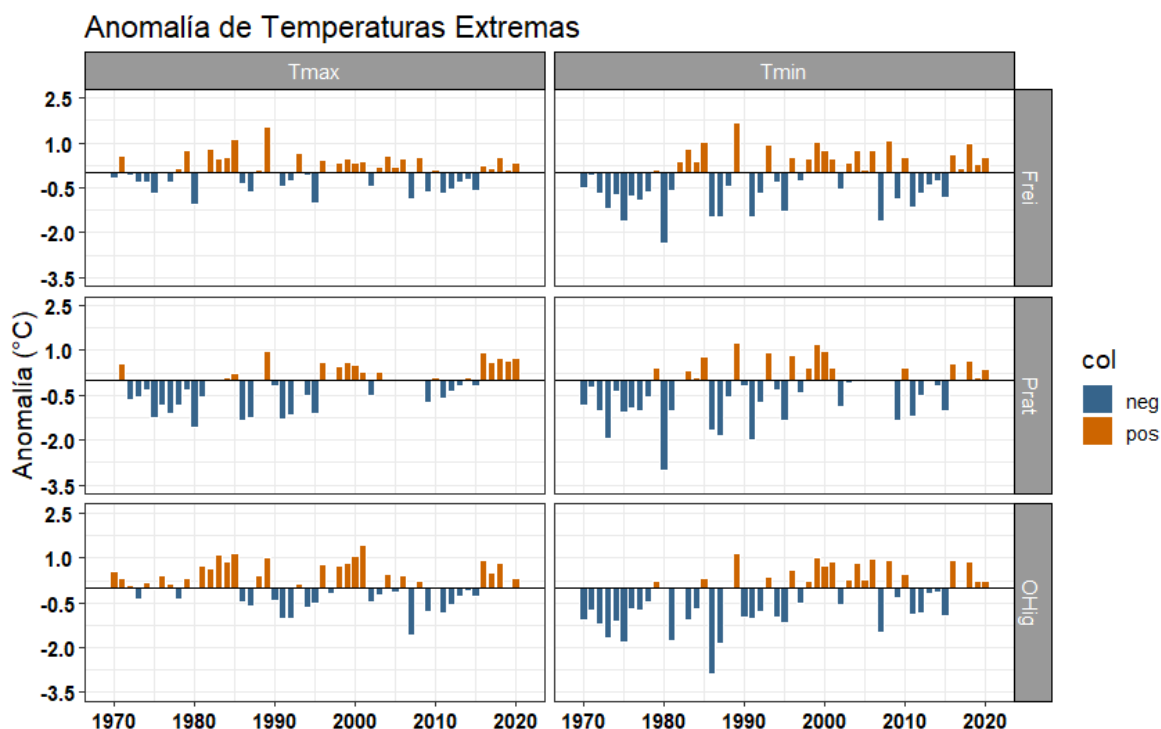


Figura 7: Anomalía de temperatura máxima (panel izquierdo) y de temperatura mínima (panel derecho) desde 1970 a 2020, calculadas en base al período climatológico 1991 y 2020 en las estaciones chilenas en la Península Antártica.

Tabla 3: Valores normales de las temperaturas extremas en las estaciones chilenas de la Península Antártica para los diferentes períodos climatológicos incluidos en este análisis.

Período	Eduardo Frei		Arturo Prat		O'Higgins	
	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax
71-00	-4.4	-0.4	-4.2	-0.4	-6.1	-1.4
81-10	-4.0	-0.3	-3.8	-0.1	-5.7	-1.5
91-20	-4.0	-0.5	-3.8	0.0	-5.4	-1.6

VALORES EXTREMOS

Las temperaturas extremas históricas en las estaciones chilenas van desde -34.4°C registrada el 3 de julio de 1986 hasta los 13.0°C observados el 9 de febrero de 2020. Los valores extremos de temperatura máxima se observan en los meses del verano austral, mientras que los extremos de temperatura mínima se registran en invierno austral (Fig. 8). Las condiciones propicias para temperaturas muy bajas son el aislamiento de masas de aire relativamente suaves de latitudes medias durante períodos prolongados y una extensa capa de hielo marino en las proximidades de la estación para limitar el flujo de calor y humedad del océano.

Las temperaturas más altas registradas en el noroeste de la Península Antártica se han asociado a menudo con profundas depresiones al oeste de la península que advectan aire cálido del norte. Aunque son varios los factores importantes para determinar las temperaturas en dicho sector, incluida la ubicación del centro de baja en el mar de Bellingshausen, la alta presión en el mar de Weddell y el origen de las masas de aire atraída hacia el lado occidental de la península.

En contraste, las bajas temperaturas récord en las estaciones en el lado occidental de la Península Antártica están asociadas con un fuerte flujo hacia el sur, lo que trae masas de aire frío a través de la región, a menudo debido a un dipolo de presión, mostrando un alta relativa al oeste de la península y una baja al este [Turner et al., 2021].

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

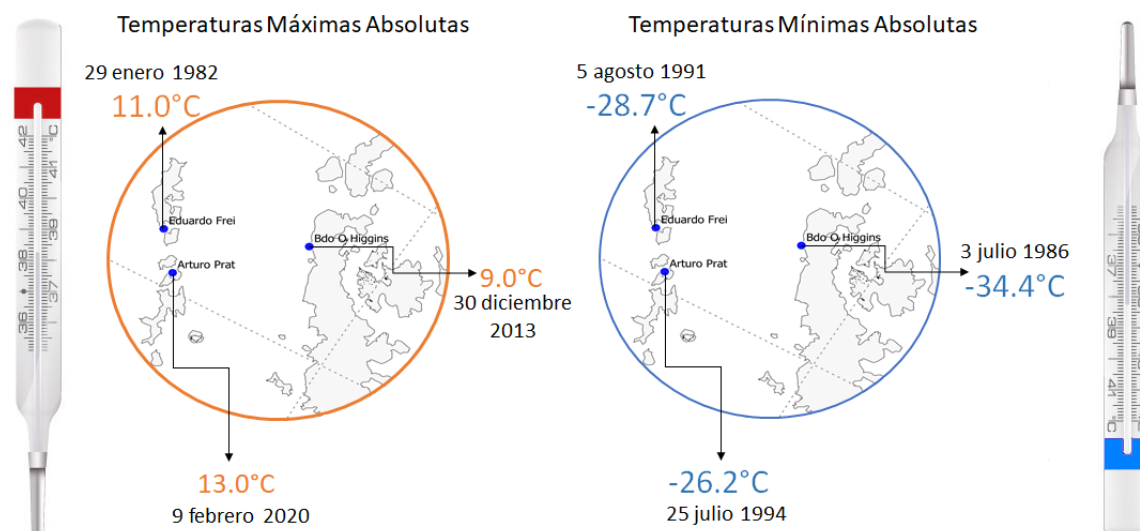


Figura 8: Temperatura máxima absoluta (panel izquierdo) y mínima absoluta (panel derecho) observadas desde 1970 a 2020, en las estaciones chilenas en la Península Antártica.

TENDENCIAS

Las temperaturas extremas en el Noroeste de la Península Antártica muestran un aumento de $0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en la temperatura mínima, con un nivel de significancia al 5% según la evaluación del test estadístico F y una disminución de $0.03^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en la temperatura máxima, sin significancia estadística.

El comportamiento estacional de las temperaturas extremas, indica que el aumento en la mínima se explica por un calentamiento observado en los meses de otoño e invierno, en particular de este último con un aumento de la temperatura mínima a razón de $0.47^{\circ}\text{C}/\text{década}$, valor que es estadísticamente significativo al 5%, mientras que la disminución en la temperatura máxima, se explica por el enfriamiento observado en los meses de primavera y verano a un ritmo de $0.15^{\circ}\text{C}/\text{década}$, valor estadísticamente significativo al 5% (Fig. 9).

El análisis de la tendencia por estación, confirma el comportamiento de la zona en general, con un aumento en la temperatura mínima de $0.18^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en Frei y $0.32^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en O'Higgins y un descenso en la máxima de $0.01^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en Frei y $0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en O'Higgins. La temperatura mínima muestra un aumento en todas las estaciones, salvo en durante el verano que presenta un leve enfriamiento de $0.03^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (en Frei), mientras que la máxima disminuye en los meses de primavera y verano a razón de $0.16^{\circ}\text{C}/\text{década}$ con un nivel de significancia al 5% y un aumento moderado y sin significancia estadística para los meses de otoño e invierno (Tabla 4).

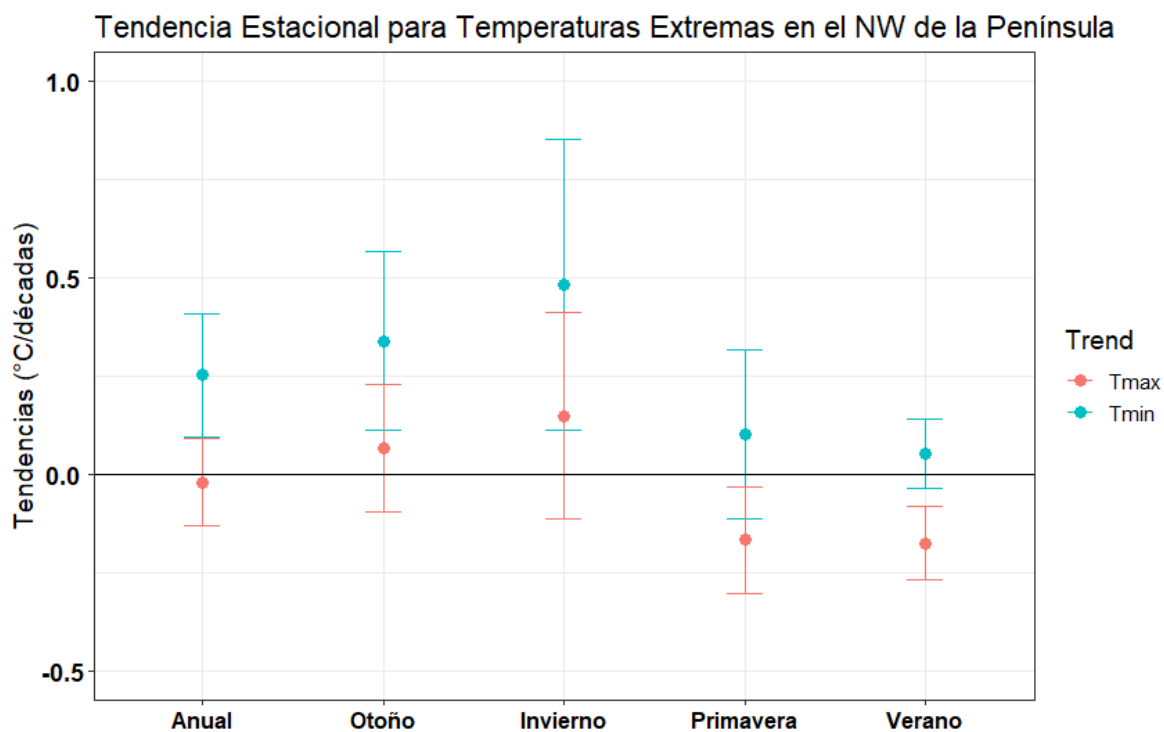


Figura 9: Tendencias de las temperaturas extremas de estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica (°C/década), máxima (puntos rojos) y mínima (puntos calipsos) anual, en invierno, otoño, primavera y verano en el período 1970-2020. Las barras indican los intervalos de confianza al 95%.

Tabla 4: Tendencia anual y estacional de las temperaturas extremas en cada una de las estaciones chilenas de la Península Antártica. En **negrita** se presentan las tendencias con significancia estadística al 5%.

Tendencias Temperaturas Máximas					
Estación	Anual	MAM	JJA	SON	DEF
Eduardo Frei	-0.01	0.07	0.19	-0.15	-0.17
Bernardo O'Higgins	-0.05	0.06	0.08	-0.19	-0.14
Tendencias Temperaturas Mínimas					
Estación	Anual	MAM	JJA	SON	DEF
Eduardo Frei	0.18	0.23	0.45	0.04	-0.03
Bernardo O'Higgins	0.32	0.45	0.47	0.15	0.16

TENDENCIAS ÍNDICES CLIMÁTICOS

Los índices de eventos extremos de cambio climático, son un conjunto de indicadores estandarizados, basados en percentiles y duración, que permiten comparar los cambios o ver la evolución de estos a nivel global. La descripción de estos se presenta en la tabla 1A del Anexo.

En Eduardo Frei los índices de cambio climático asociados a la temperatura, muestran un aumento en los registros relacionados con las temperaturas mínimas, concordante con la tendencia de esta variable, destacando los días gélidos ID (número de días del año donde la temperatura máxima está bajo los 0°C) con un aumento de 5.59 días por década y el aumento de la temperatura mínima absoluta TNn con una tendencia de 0.7°C por década, la excepción se presenta en las noches frías que muestran una disminución de 0.6% por década. Por otra parte, los registros asociados a las temperaturas máximas presentan escasa variación en el tiempo o leves disminuciones, salvo para el caso de los días cálidos que la tendencia es más evidente con -1.45% por década (Fig.10).

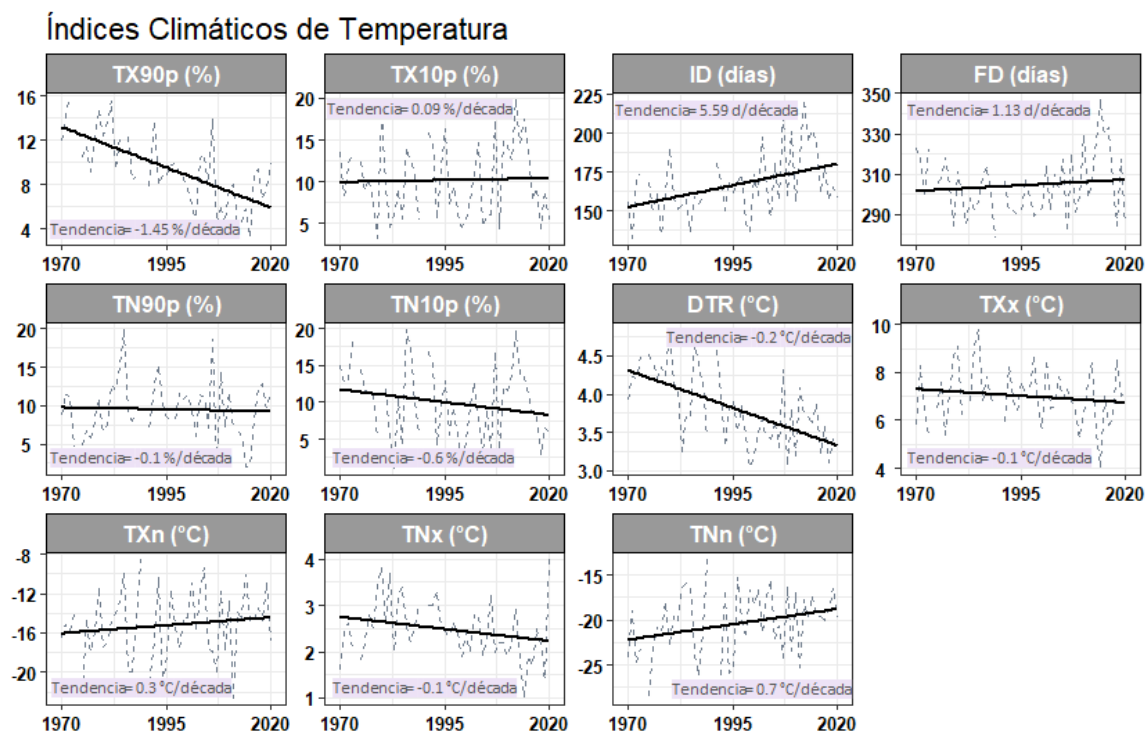


Figura 10: Gráficos de series de tiempo de índices de eventos extremos asociados a la temperatura en las estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica durante el período 1970-2020. La línea sólida negra representa las tendencias de regresión lineal y en lila se muestran los valores de estas.

PRECIPITACIÓN

El modo primario de circulación atmosférica que regula la precipitación en latitudes altas del hemisferio sur es el SAM. Desde finales de la década de 1970, el SAM ha pasado a una fase positiva, especialmente en el verano y otoño austral. Esto ha llevado a vientos circumpolares occidentales más fuertes sobre el Océano Austral, en particular, durante este período la intensidad de los vientos del oeste ha aumentado en un 15 - 20% y se ha combinado con una migración hacia el polo de los vientos del oeste en 1 - 2° de latitud. Estas dos variaciones han impactado los eventos ciclónicos al sur de 40° S, disminuyendo su frecuencia y aumentando su intensidad. Además, estas nuevas condiciones han conducido a una tendencia cada vez más profunda del Bajo del Mar de Amundsen (ABSL) [Thomas and Tetzner, 2018].

La mayor parte de la precipitación en la Península Antártica se localiza en las regiones costeras y se asocia a un sistema meteorológico en escala sinóptica que se mueve hacia el sureste y cruza la península y/o se disipa en los océanos del sur [Carrasco y Cordero, 2020].

El promedio de la precipitación en las estaciones chilenas de la Península Antártica es mayor en la que se encuentra más al sur y más expuesta (Arturo Prat) con un valor climatológico de 708.9 mm anual, en comparación con las ubicadas levemente más al norte que presentan promedios climatológicos de 512.2 y 558.3 mm anual para el período 1991-2020 (Fig. 10 y Tabla 5).

Los promedios estacionales, indican que el otoño es la estación más lluviosa, seguida por la primavera (salvo en Prat que muestra un verano lluvioso), en estas épocas del año la vaguada circumpolar es más profunda y está ubicada más al sur, por lo que el número e intensidad de ciclones a escala sinóptica que inciden en la Península es máximo [King et al., 2003]. La estación más seca en la Península Antártica es invierno (Fig. 11).

Con relación a los valores extremos mensuales, el percentil 10% tiene registros más bajos en junio con valores de 8.8 mm en Frei, 22.3 mm en Prat y 13.5 mm en O'Higgins. El percentil 90% máximo se presenta en marzo con registros de 74.1 mm en Frei, 120.6 mm en Prat y 107.5 mm en O'Higgins (Tabla 5).

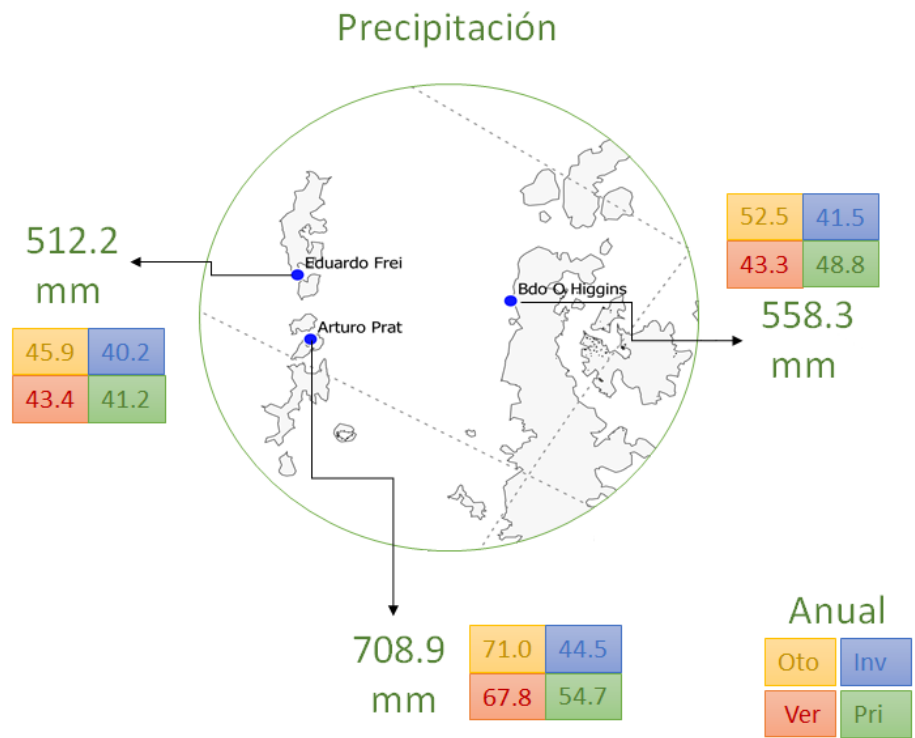


Figura 11: Promedio anual climatológico precipitación para el período 1991 y 2020 en las estaciones chilenas en la Península Antártica. Los cuadros de color muestran los promedios estacionales (amarillo, otoño; azul, invierno; verde primavera y rojo, verano).

Tabla 5: Climatología mensual de la precipitación en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de Precipitación Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	512.2	43.4	47.1	53.3	43.6	40.8	39.0	40.9	40.8	42.0	47.8	40.5	33.1
P10	341.7	23.6	30.5	31.9	19.2	14.5	8.8	18.3	14.5	6.9	22.1	14.8	18.3
P33	428.7	33.2	37.2	45.4	29.4	25.8	20.7	27.0	27.7	32.1	34.7	28.9	24.3
P66	567.7	50.9	54.3	57.3	44.9	43.8	40.5	43.4	43.2	47.0	53.6	49.3	35.4
P90	766.6	65.4	66.8	74.1	75.9	78.0	76.7	72.2	69.1	80.2	87.1	65.9	56.5
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	708.9	75.0	72.7	80.1	72.2	60.8	49.1	43.5	40.8	49.9	61.5	52.6	55.6
P10	576.5	38.9	29.4	39.7	40.3	29.3	22.3	23.1	21.3	19.2	32.0	25.3	25.3
P33	624.8	47.9	59.5	61.9	54.9	46.1	36.2	32.6	30.9	27.5	45.2	37.5	43.5
P66	745.6	93.9	81.0	88.0	74.9	61.4	55.4	50.8	41.4	57.5	67.7	55.2	56.9
P90	944.1	121.5	106.3	120.6	116.2	105.3	82.5	68.9	66.4	83.8	91.4	82.9	106.2
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	558.3	41.4	51.4	62.4	52.0	43.0	40.0	42.0	42.7	47.2	54.6	44.7	37.0
P10	409.9	11.5	16.9	32.9	17.1	17.5	13.5	14.8	14.2	24.1	30.3	20.9	6.8
P33	477.8	29.1	32.6	41.4	37.7	31.5	29.9	25.4	27.1	33.2	41.4	25.8	23.9
P66	622.9	56.2	66.7	68.4	58.1	51.5	49.6	47.4	53.8	52.2	61.7	47.4	41.6
P90	692.9	74.1	81.5	107.5	90.0	68.1	70.7	72.3	77.1	64.6	83.1	71.4	67.2

ANOMALÍA

El promedio de precipitación muestra una gran variabilidad interanual entre los años 1970 y 2020 en el NW de la península. Se observa en su mayoría años bajo el promedio climatológico del período 1991-2020 denominados años más secos que lo normal. Sin embargo, a partir del 2002 en Frei y en los últimos años en las otras estaciones se presentan años sobre la norma climatológica, es decir años lluviosos. Condición que avala un aumento de la precipitación del orden de 30 mm por década en Frei, 50 mm por década en Prat y de 10 mm por década en O'Higgins (Fig. 12).

Los años más lluviosos son 1990 con un total anual acumulado de 895.4 mm en Frei y 938.9 mm en O'Higgins y el 1993 con un valor anual de 840.7 mm en Frei y 958.5 mm en O'Higgins, mientras que en Prat el año más lluvioso es el 2009 y el 2020 con más de 1000 mm acumulados. Los años más secos en Frei se registran en la década de los '90 y en Prat entre los años '70 y '80. En O'Higgins, los años secos se observan en la década de los '70 y desde el 2000 al 2018 (Fig. 12).

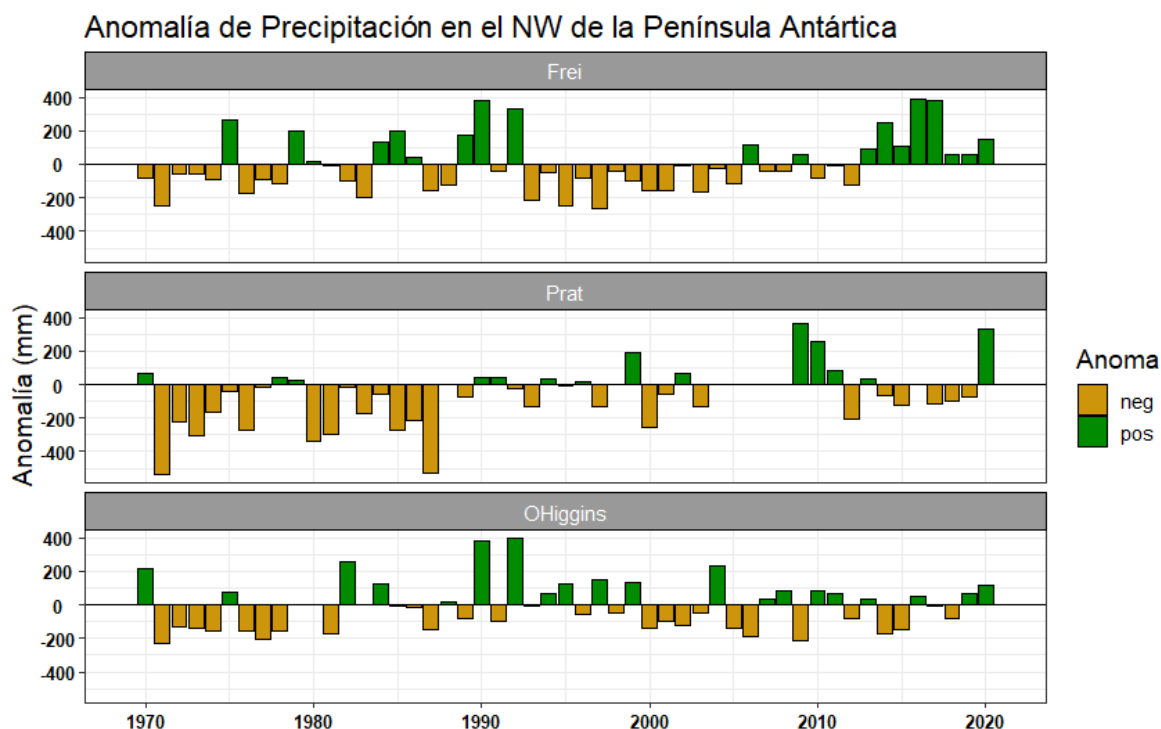


Figura 12: Anomalia de la precipitación desde 1970 a 2020, calculadas en base al período climatológico 1991 y 2020 en las estaciones chilenas en la Península Antártica.

TENDENCIAS

La precipitación en las estaciones Frei y O'Higgins muestran un aumento del orden de 20 mm/década, sin significancia estadística.

Este aumento en la tendencia es significativo en los meses de invierno y primavera en Frei. Cabe destacar que, el mayor aumento en la precipitación se observa en invierno, con incrementos de 24.31 y 5.16 mm/décadas por estación, este aumento es relevante, ya que se presenta en los meses donde se observa la menor acumulación de precipitación. Mientras que en los meses más lluviosos como otoño y primavera se presenta disminución de la precipitación o aumento leve de esta, salvo en Frei que presenta un aumento de 11.26 mm/década en primavera (Fig. 13 y Tabla 6).

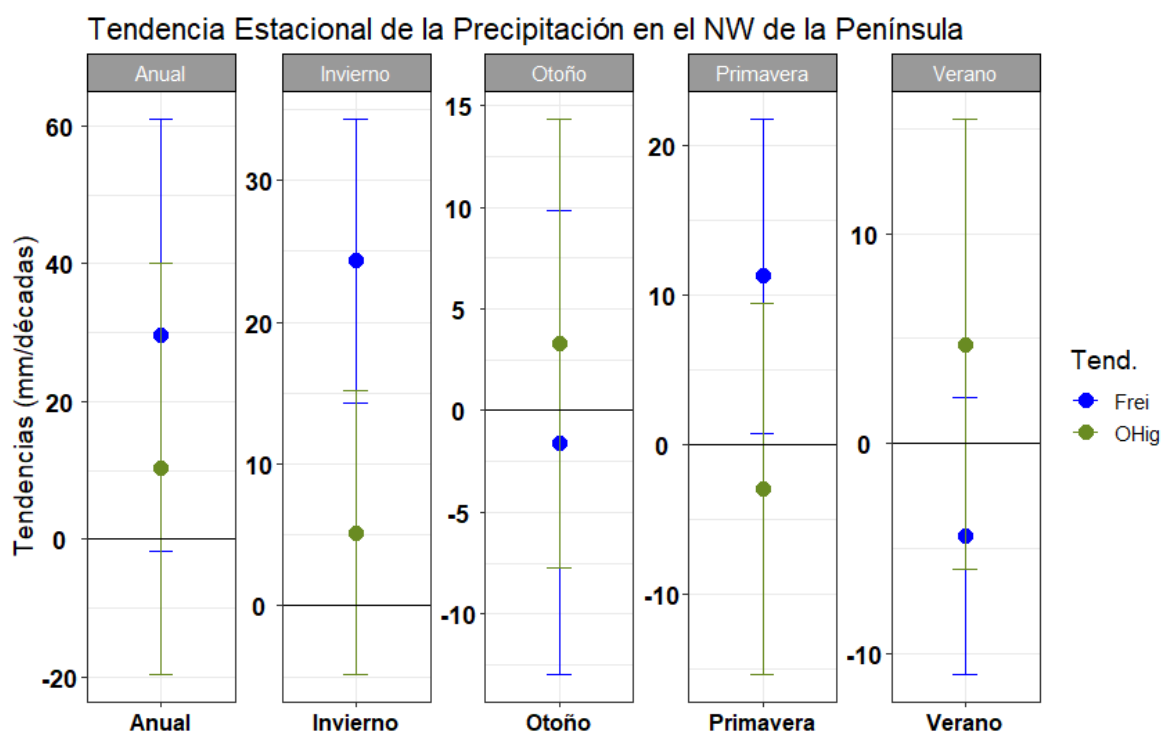


Figura 13: Tendencias de precipitación de estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica (mm/década), anual, en invierno, otoño, primavera y verano en el período 1970-2020. Las barras indican los intervalos de confianza al 95%.

Tabla 6: Tendencia anual y estacional de la precipitación en cada una de las estaciones chilenas de la Península Antártica. En negrita se presentan las tendencias con significancia estadística al 5%.

Tendencias de la Precipitación					
Estación	Anual	MAM	JJA	SON	DEF
Eduardo Frei	29.62	-1.58	24.31	11.26	-4.37
Bernardo O'Higgins	10.26	3.30	5.16	-2.92	4.73

TENDENCIAS ÍNDICES CLIMÁTICOS

Los índices de eventos extremos asociados a la precipitación en Eduardo Frei, muestran escasa variación en el tiempo, salvo para la precipitación anual PRCPTOT (suma de la precipitación sobre 1 milímetro) que presenta un aumento de 30 mm por década y para el caso de los días con precipitación R1mm (número de días en el año con precipitación sobre 1 milímetro) con 6.34 días por década. Cabe destacar que, las únicas tendencias negativas que se asocian con la precipitación corresponden a la longitud máxima de días secos CDD (valor máximo de días consecutivos sin lluvia) con -1.0 días por década y para la precipitación máxima en 5 días Rx5day (valor máximo de precipitación durante 5 días consecutivos) con -0.99 mm por década (Fig.14).

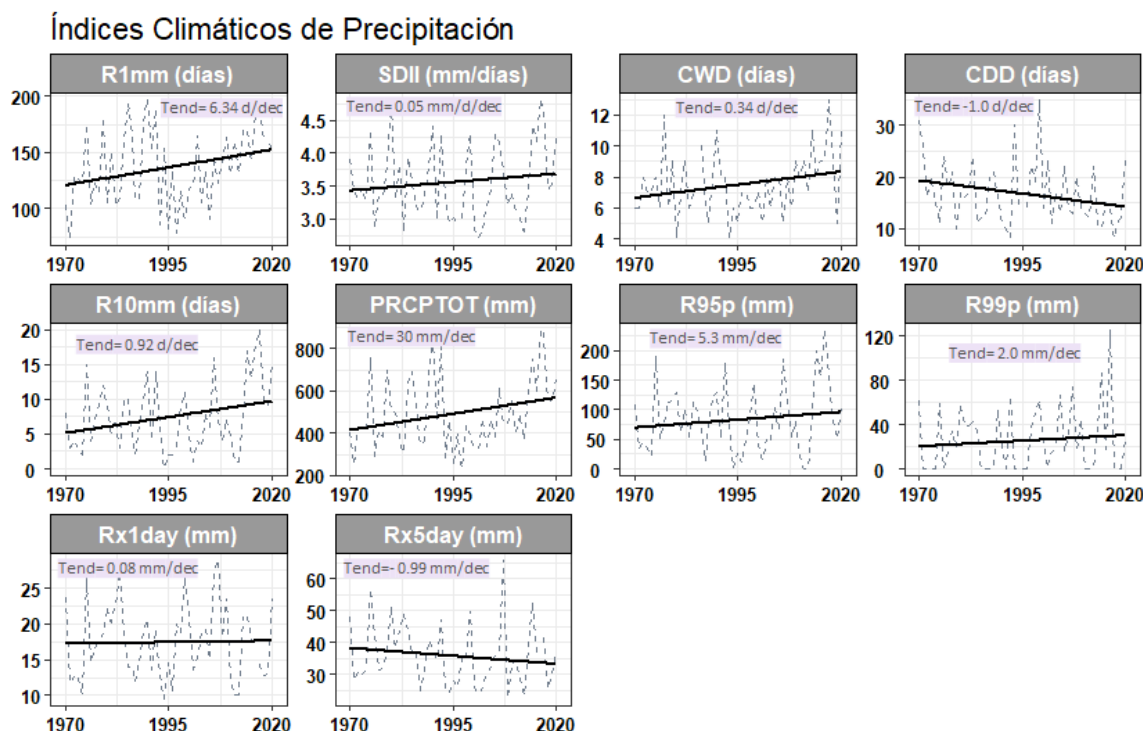


Figura 14: Gráficos de series de tiempo de índices de eventos extremos asociados a la precipitación en las estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica durante el período 1970-2020. La línea sólida negra representa las tendencias de regresión lineal y en lila se muestran los valores de estas.

PRESIÓN

La presión atmosférica, en particular a escala regional y local, es un factor muy importante que influye en los cambios meteorológicos y climáticos, en ese contexto, el continente antártico está rodeado por un cinturón de bajas presiones, el cual influye directamente en el extremo norte de la Península Antártica. Esta banda de bajas presiones se relaciona con la alta frecuencia de actividad ciclónica en los océanos australes [Turner et al., 1998].

En el gráfico de los valores medios mensuales de la presión se puede observar una oscilación semestral con los mínimos de presión registrados a fines del verano y comienzo del otoño (febrero y marzo) y en primavera (octubre y noviembre), lo que podría ser atribuido a la intensa baroclinicidad que se desarrolla en el mar de Bellingshausen en las temporadas de primavera y otoño, cuando la vaguada circumpolar está más al sur, un fenómeno conocido como oscilación semestral [van Loon, 1967, 1972]. Mientras que los máximos de presión se presentan en los meses de invierno (entre mayo y julio) y en el mes de diciembre en cada una de las estaciones (Fig. 15).

La presión atmosférica media a nivel del mar de las estaciones chilenas de la Península Antártica ha ido disminuyendo a razón de 0.46 hPa por década desde 1970 al 2020. El valor climatológico del período 1991-2020 es de 990.1 hPa, valor que se ubica 0.8 hPa bajo el promedio del período 1971-2000 (990.9 hPa), dato relevante tomando en cuenta que el rango de la presión media entre los años 1970 y 2020 es de 7.6 hPa. Cabe destacar la gran variabilidad interanual que presenta la presión atmosférica en el sector, que es consistente con la variabilidad de la actividad ciclónica del área. El año 2000 se observó la presión anual media más alta con 994.5 hPa y el 2015 presentó la presión anual media más baja con 986.9 hPa (Fig. 16).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

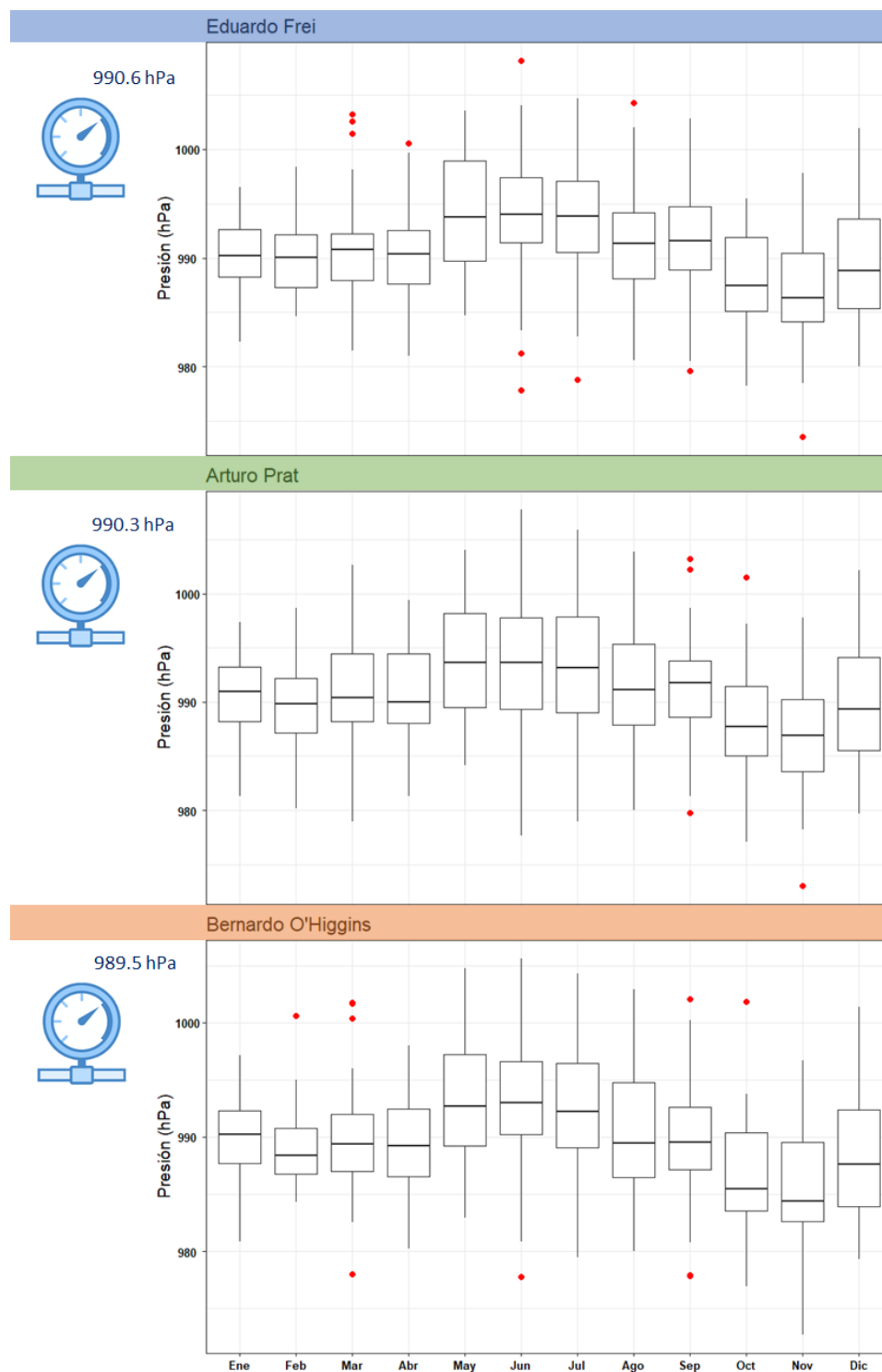


Figura 15. Diagrama de cajas de la presión atmosférica (hPa) a nivel medio del mar en las estaciones chilenas de la Península Antártica. Los bordes (superior e inferior) de las cajas representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites. Además, se presentan los valores promedios climatológicos de la presión atmosférica a nivel medio del mar para el período 1991-2020, por estación.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Tabla 7: Climatología mensual de la presión en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de la Presión Atmosférica Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	990.6	989.0	990.4	990.7	990.7	993.4	992.7	993.3	991.8	992.4	987.6	987.1	988.4
P10	988.6	985.6	986.5	984.9	987.0	987.3	987.1	986.0	986.6	984.2	982.7	981.1	982.0
P33	989.8	988.2	987.7	988.7	988.5	990.1	991.6	991.4	989.2	990.9	985.3	984.8	985.3
P66	991.2	990.3	992.2	991.2	992.3	994.7	994.3	995.5	992.6	994.6	989.7	988.7	990.5
P90	992.8	992.7	995.5	997.1	996.0	999.2	997.8	1000.1	999.5	1000.2	993.8	994.6	995.5
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	990.3	988.9	989.9	991.2	990.9	992.6	992.3	992.5	991.3	991.7	986.9	986.5	988.0
P10	988.4	985.1	985.4	986.5	986.5	987.4	984.4	985.5	985.7	983.9	981.6	980.9	981.9
P33	988.9	987.9	987.2	988.9	988.3	989.6	991.5	990.0	988.5	990.4	985.0	984.2	984.2
P66	991.1	990.9	991.2	991.9	993.5	993.7	994.4	995.0	992.8	993.3	989.2	987.9	989.5
P90	993.0	992.6	994.7	997.4	995.7	999.1	998.0	1000.8	998.2	998.4	992.7	993.9	995.7
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	989.5	988.2	988.9	989.5	989.9	992.7	992.1	992.3	990.4	990.4	986.3	985.8	987.2
P10	987.4	984.6	984.6	984.2	986.1	987.0	986.8	985.1	984.6	981.7	982.0	979.9	981.2
P33	988.3	986.2	986.8	987.8	987.4	989.9	990.4	989.9	987.6	988.5	983.6	983.3	984.4
P66	990.3	989.9	990.3	990.0	992.3	994.4	994.1	994.2	991.1	992.5	988.5	987.3	988.9
P90	991.7	991.3	994.0	995.7	995.3	998.8	997.3	999.8	997.6	998.9	991.8	993.6	994.8

Presión Atmosférica en el NW de la Península Antártica

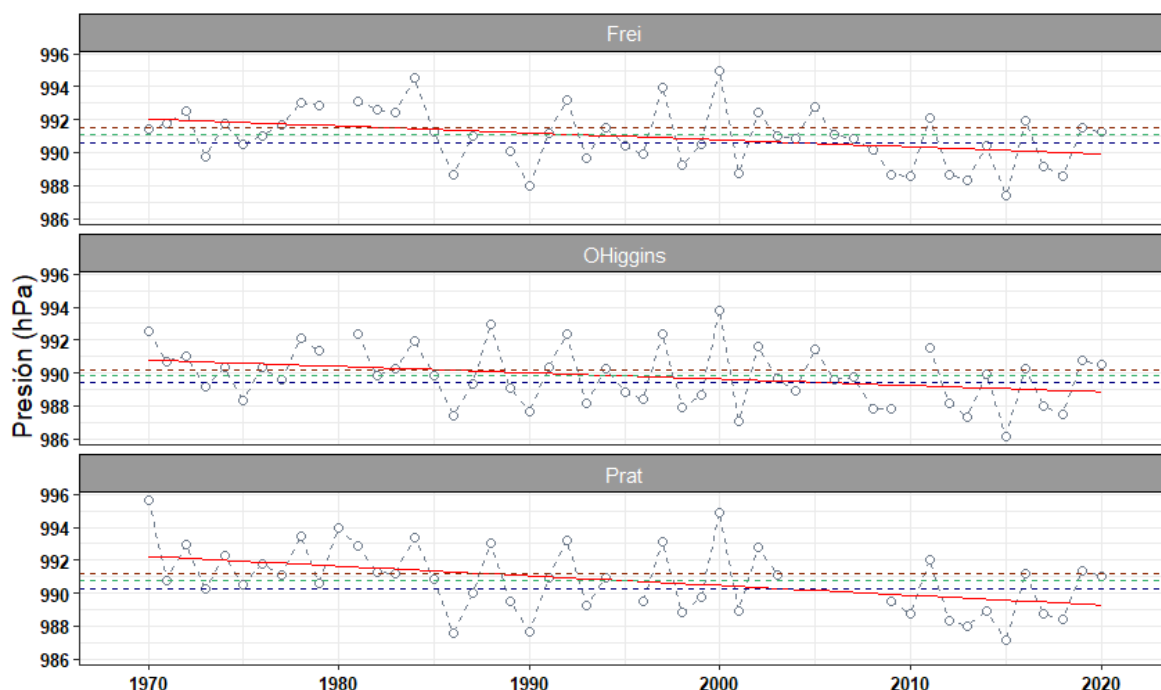


Figura 16.- Presión media anual en las estaciones chilenas en la Península Antártica de 1970 a 2020 (línea segmentada con puntos), tendencia lineal de la presión media (línea roja) y valor de los registros climatológicos para los períodos 1971-2000 (línea segmentada roja), 1981-2010 (línea segmentada verde) 1991-2020 (línea segmentada azul).

VALORES EXTREMOS

Los valores extremos de presión absoluta en las estaciones chilenas del norte de la Península Antártica indican que la presión atmosférica más alta observada se registró el día 7 de septiembre de 2000 para todas las estaciones, como consecuencia del posicionamiento de un intenso anticiclón en el mar de Bellingshausen, destacándose el registro de Arturo Prat (1036,8 hPa). Durante este día se observó un evento extremo de temperatura mínima y máxima bajo el percentil 10%, así como una baja cobertura nubosa con promedio diario de 3.5 octas y una humedad relativa de 75%. Por otra parte, el valor más bajo de presión se observó el día 2 de agosto de 1984, producto de la presencia de una intensa baja posicionada en el extremo norte de la península, específicamente en el sector conocido como Paso Drake (tramo de mar que separa América del Sur de la Antártida, entre el cabo de Hornos (Chile) y las islas Shetland del Sur (Antártida)). Este día se observó con cielo cubierto, con precipitaciones entre 10 a 15 mm en las estaciones chilenas de la península y con alzas en las temperaturas extremas, registrando un evento extremo de temperatura máxima y mínima sobre el percentil 90% (Fig. 17).

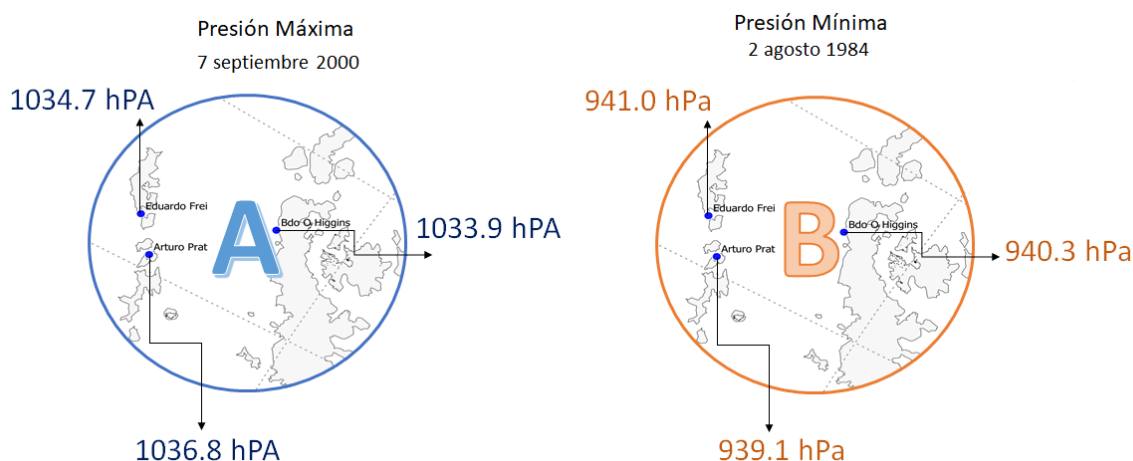


Figura 17: Presión máxima absoluta (panel izquierdo) y mínima absoluta (panel derecho) observadas desde 1970 a 2020, en las estaciones chilenas en la Península Antártica.

TENDENCIA

La presión de las estaciones chilenas ubicadas al NW de la Península Antártica presenta una disminución de 0.5 hPa/década, con un nivel de significancia al 5% según la evaluación del test estadístico F, la disminución de la presión superficial en las estaciones costeras, es una señal de que el SAM se estaría moviendo hacia valores positivos en las últimas décadas [Turner, et al., 2005].

El comportamiento estacional, indica que todas las estaciones del año muestran un descenso en la presión, sin embargo, en las temporadas de verano y otoño el decrecimiento de la presión se intensifica observándose 0.7 hPa/ década, valor estadísticamente significativo al 5% durante el verano (Fig. 18).

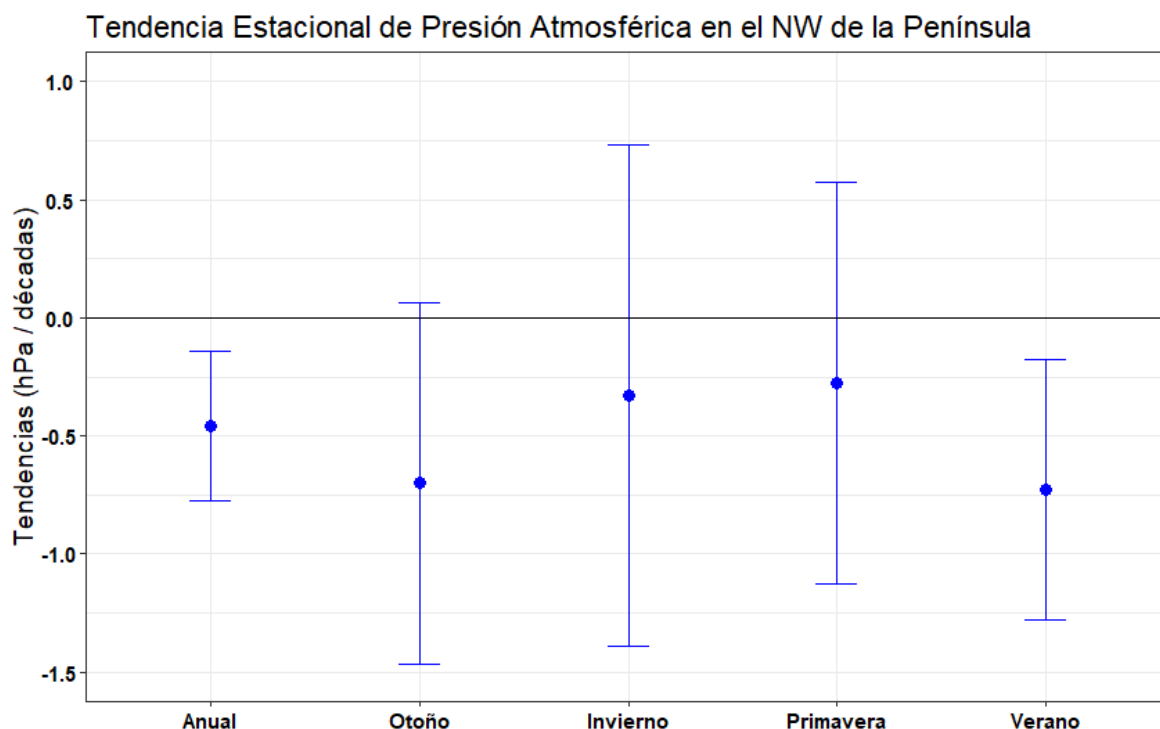


Figura 18: Tendencia estacional de la presión en estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica (hPa/década), para el período 1970-2020. Las barras indican los intervalos de confianza al 95%.

VIENTO

Las estaciones chilenas de la Península Antártica son estaciones marítimas, ubicadas en el lado occidental de la Península Antártica. No experimentan vientos catabáticos persistentes, aunque sus climas están fuertemente influenciados por la orografía local. Están ubicados en la latitud de la vaguada circumpolar y, por lo tanto, están frecuentemente bajo la influencia de sistemas ciclónicos profundos sobre el mar de Bellingshausen y pasando por el paso de Drake [Turner et al., 2009]. Además, son moderadas por los patrones de variabilidad climática que influyen en el área como el SAM, observándose los vientos del oeste más intensos cuando el SAM es positivo [Lipzig, et al., 2008] y por la variabilidad de ABSL, ya que esta influye fuertemente en el clima de la Antártida Occidental al controlar el componente meridional de la circulación atmosférica a gran escala, con consecuencias para la velocidad del viento de (10 m) entre otros parámetros (temperatura superficial, precipitación, hielo marino) [Hosking, et al., 2013].

La intensidad del viento en las tres estaciones chilenas de la Península Antártica muestra un ciclo anual con un mínimo en verano, particularmente en enero, con valores climáticos de 14.8 kt en Frei, 10.1 kt en Prat y 10.0 kt en O'Higgins y un máximo en invierno, específicamente en junio, con valores climáticos de 14.1 kt en Prat y 15.3 kt en O'Higgins, salvo en la estación Frei que presenta el máximo en octubre de 19.6 kt (Tabla 6), estas diferencias en la intensidad media del viento en las tres estaciones podría ser atribuible al cambio de ubicación de la estación de Frei, quedando más expuesta a la intensidad del viento.

En Eduardo Frei predominan los vientos del noroeste, salvo en meses de otoño e invierno que aparece la componente este del viento, cabe mencionar que durante todo el año la intensidad máxima del viento proviene desde el este. En Prat, en cambio, los vientos predominantes son los que vienen desde el norte, aunque son de baja intensidad, mientras que los vientos más intensos se asocian los vientos del este. O'Higgins presenta una mayor dispersión en la dirección del viento, destacando la dirección proveniente desde el suroeste, son frecuentes también los vientos del norte, aunque con menor intensidad. Al igual que en las otras estaciones el viento más intenso se asocia a viento proveniente del este (Fig. 19 al 21).

Además de la gran variabilidad interanual que presenta la intensidad del viento en las estaciones chilenas de la Península Antártica, se observa un aumento de esta del orden de 0.67 kt por década entre 1970 y 2020, esta variabilidad interanual al igual que en la presión es consistente con la variabilidad de la actividad ciclónica propia del sector [Capps, et al., 2010] (Fig. 22).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

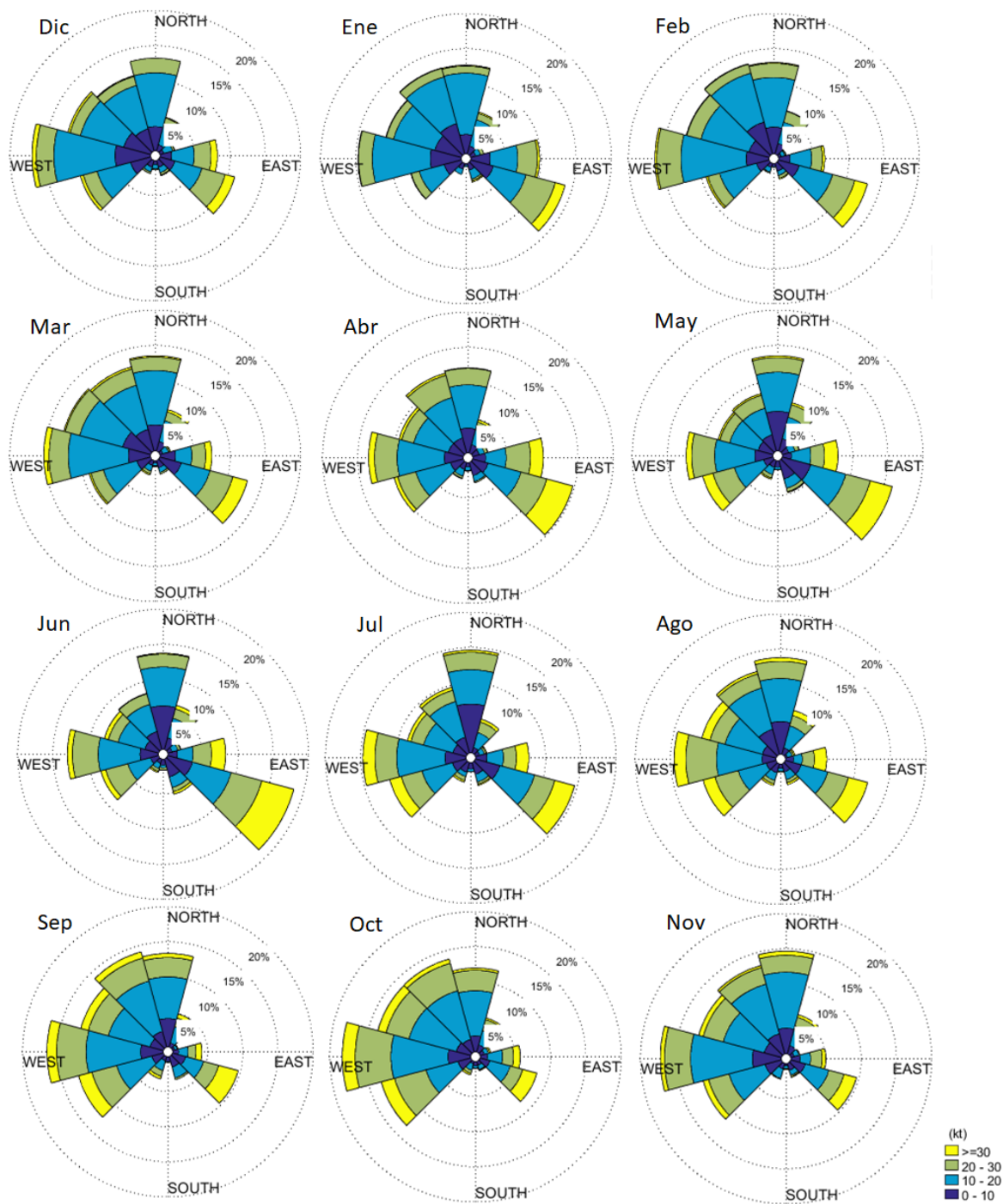


Figura 19.- Dirección en intensidad del viento registrado en Eduardo Frei a las 18Z, para el período 1970-2020.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

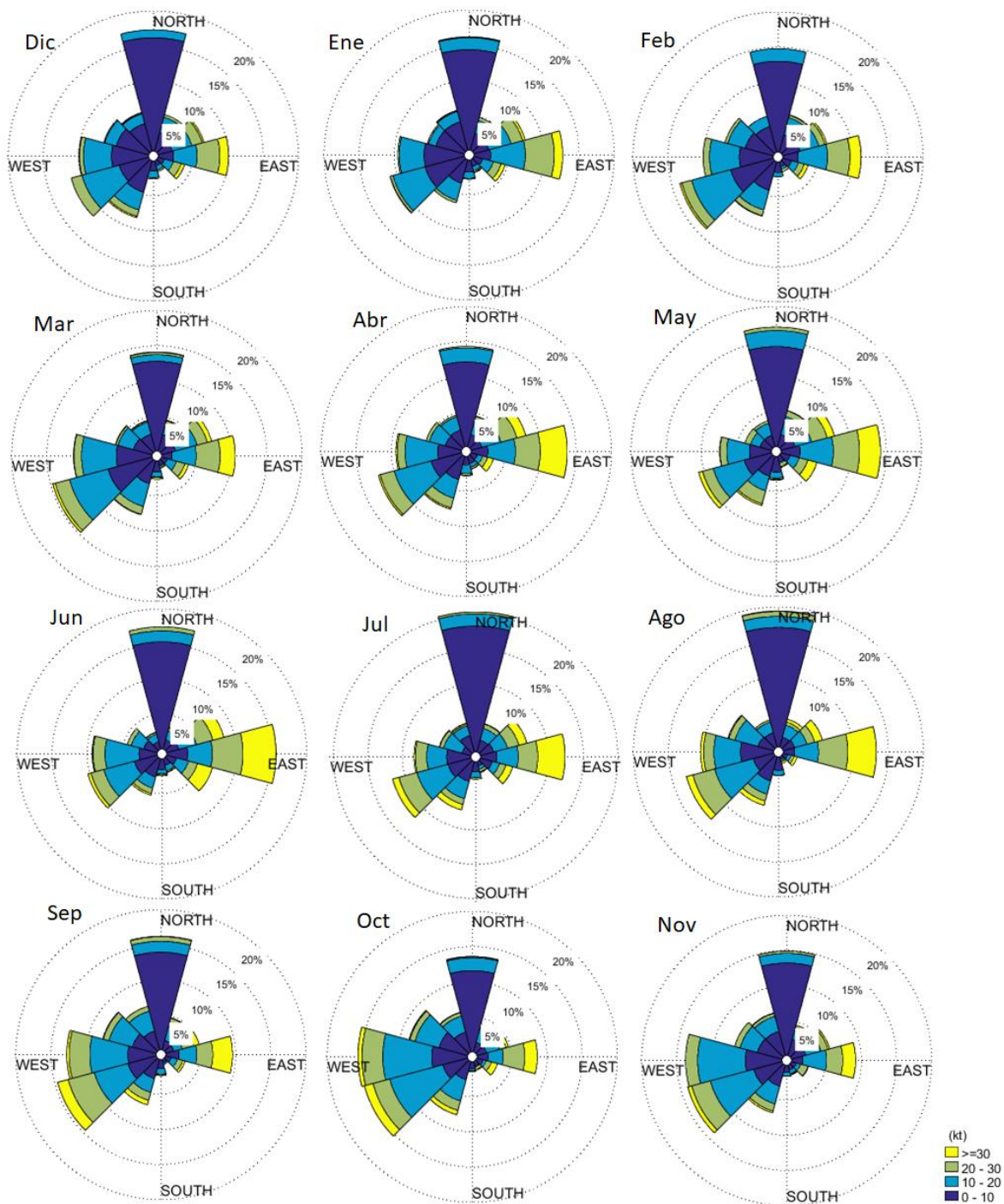


Figura 20.- Dirección en intensidad del viento registrado en Arturo Prat a las 18Z, para el período 1970-2020.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

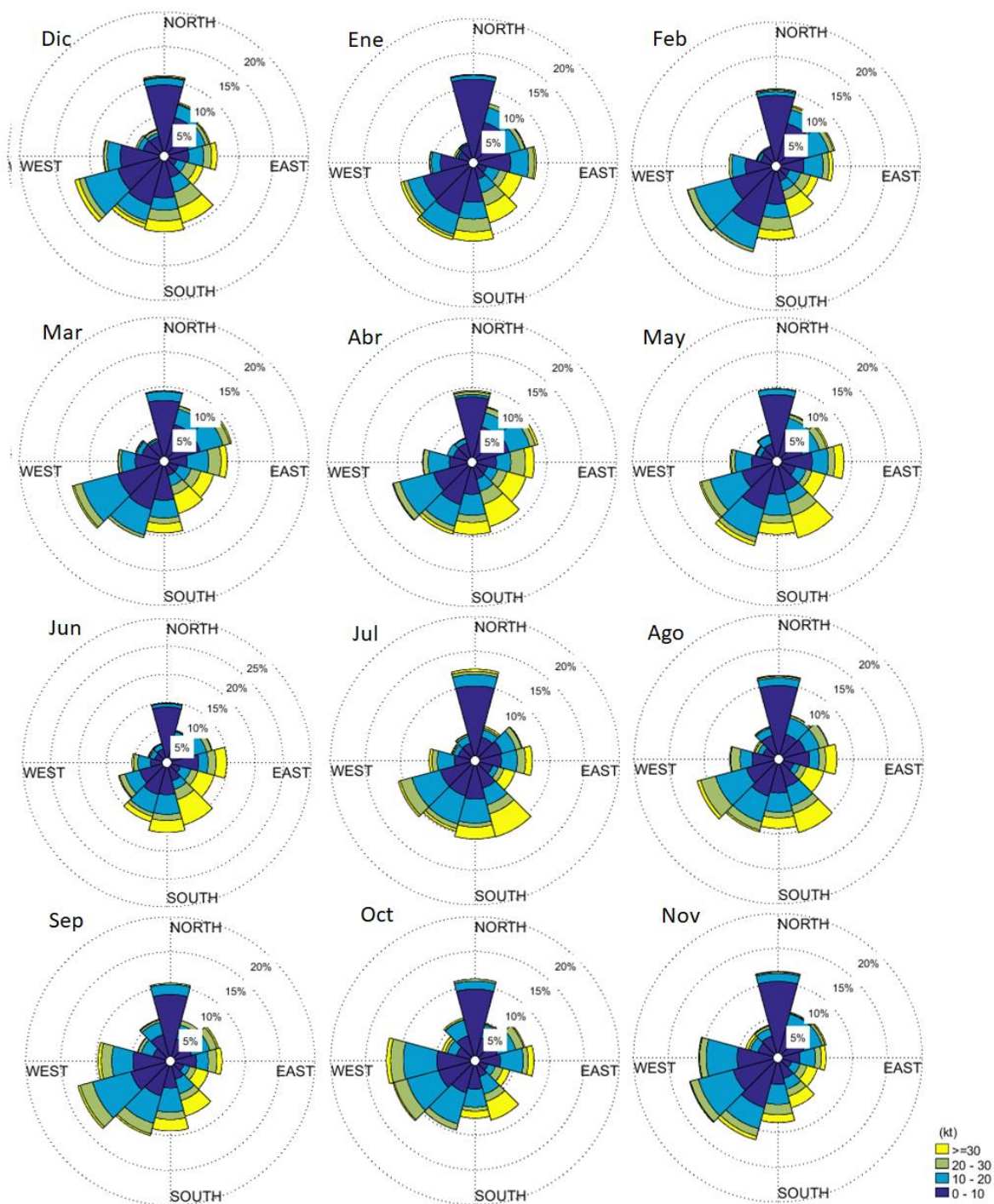


Figura 21.- Dirección en intensidad del viento registrado en Bernardo O'Higgins a las 18Z, para el período 1970-2020.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Tabla 8: Climatología mensual de la intensidad del viento (en nudos) a las 18Z en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de la Intensidad del Viento Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	17.4	14.8	16.1	16.7	17.8	17.4	18.4	17.8	19.0	18.8	19.6	17.3	15.7
P10	16.4	13.1	12.9	14.0	15.2	15.0	16.0	14.5	15.8	15.3	16.9	14.5	13.0
P33	17.1	14.1	15.1	15.6	17.0	16.3	17.5	17.0	17.7	17.1	18.6	16.0	15.1
P66	17.9	15.4	16.7	18.1	19.1	18.2	19.1	18.9	20.0	20.1	20.6	18.4	16.4
P90	18.4	16.8	18.7	19.4	20.3	20.5	21.8	21.0	22.7	22.5	21.5	19.9	18.1
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	12.2	10.1	10.5	11.8	12.5	12.5	14.1	12.9	13.3	13.7	13.4	11.7	10.1
P10	10.6	7.1	7.8	9.2	10.5	9.9	10.9	9.5	8.7	10.4	10.9	8.8	7.2
P33	11.6	9.8	9.9	10.3	11.8	11.5	12.5	11.6	12.6	12.3	13.2	10.0	9.4
P66	12.9	10.7	11.6	12.8	13.1	13.5	15.3	14.2	14.6	14.2	14.2	13.0	11.5
P90	13.6	12.7	12.6	14.8	15.5	15.3	17.8	16.5	15.3	17.4	15.4	15.2	12.6
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	12.8	10.0	10.8	12.4	13.1	12.8	15.3	13.2	14.0	14.1	13.8	12.8	11.7
P10	11.6	6.7	7.3	9.2	10.2	9.7	12.2	11.1	11.2	10.7	11.4	9.5	8.3
P33	12.4	9.4	9.2	11.2	12.2	11.0	14.0	12.2	12.6	13.1	13.0	11.4	9.6
P66	13.1	10.9	11.5	13.1	13.3	13.7	15.9	13.7	15.2	15.5	14.5	13.8	12.9
P90	14.3	12.8	15.1	15.2	16.9	16.7	18.1	15.8	17.4	17.3	16.7	16.4	15.8

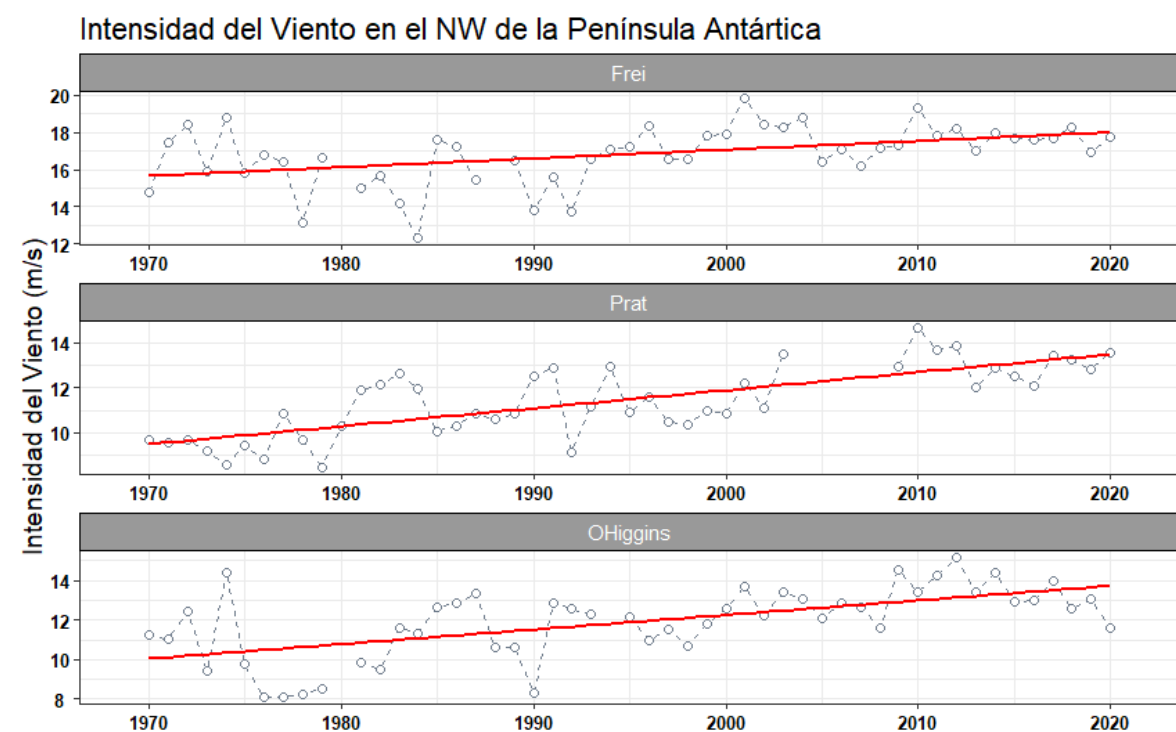


Figura 22.- Intensidad media anual de la intensidad del viento a las 18Z en las estaciones chilenas en la Península Antártica de 1970 a 2020 (línea segmentada con puntos) y tendencia lineal de la presión media (línea roja).

TENDENCIA

La intensidad del viento en las estaciones chilenas de la Península Antártica presenta un aumento constante del orden de 0.67 kt/ década, con un nivel de significancia al 5% según la evaluación del test estadístico F (Fig. 17), este aumento en la velocidad del viento en las estaciones de la Península Antártica es consistente con el cambio en la naturaleza del SAM durante las últimas décadas [Turner, et al., 2005], además se relaciona con las tendencias negativas de la presión superficial, que fortalece los vientos del oeste [Yu, Lejiang, et al., 2020].

Las tendencias estacionales de la intensidad del viento, son considerablemente positivas, en todas las estaciones chilenas de la Península Antártica, salvo en el período de verano que, si bien siguen siendo positivas, estas decrecen en comparación con las otras épocas del año. Las tendencias son significativas en invierno y primavera, épocas donde presentan mayor alza, en particular en O'Higgins, con una tendencia de 1.0 y 1.29 kt/década respectivamente (Fig. 23 y Tabla 9).

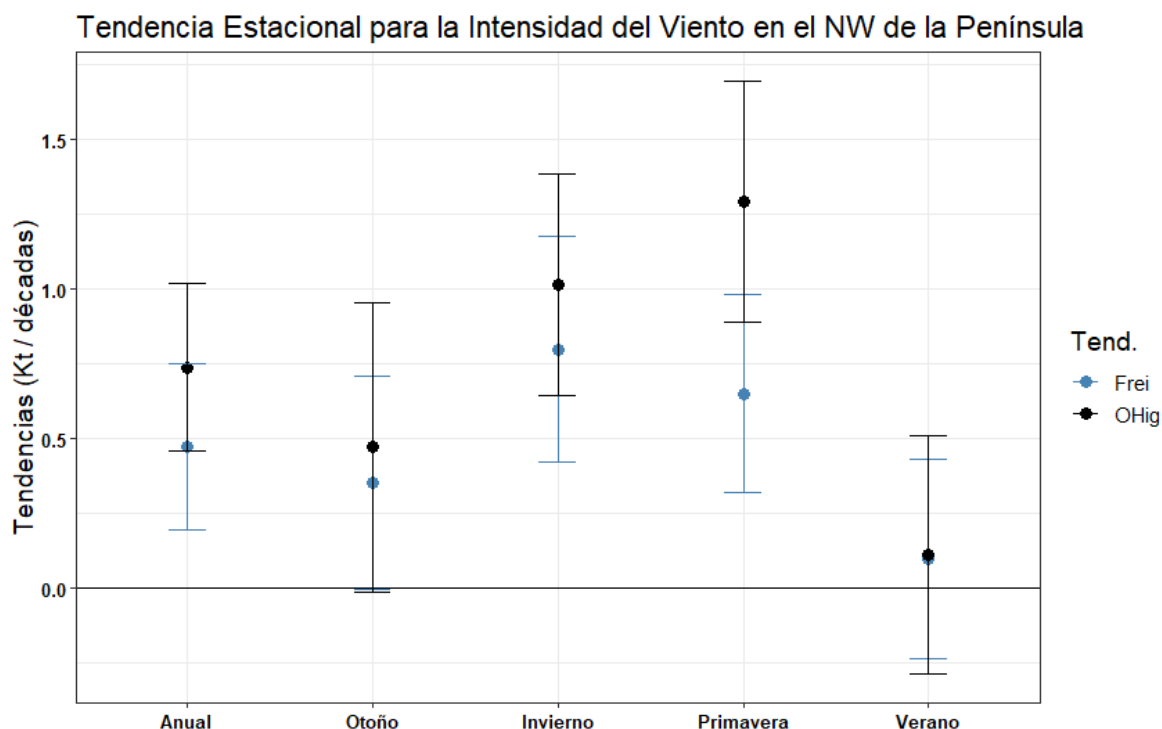


Figura 23: Tendencia estacional de la presión en estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica (hPa/década), para el período 1970-2020. Las barras indican los intervalos de confianza al 95%.

Tabla 9: Tendencia anual y estacional de la intensidad del viento en cada una de las estaciones chilenas de la Península Antártica. En negrita se presentan las tendencias con significancia estadística al 5%.

Tendencias de la Intensidad del Viento (18Z)					
Estación	Anual	MAM	JJA	SON	DEF
Eduardo Frei	0.473	0.353	0.798	0.651	0.097
Bernardo O'Higgins	0.739	0.472	1.015	1.291	0.112

HUMEDAD RELATIVA

Debido a las características marítimas de la Península Antártica, los valores de la humedad relativa del aire son muy altos durante todo el año, además, la distribución anual de la humedad del aire en el noroeste de la Península Antártica tiene un comportamiento homogéneo en las tres estaciones, manteniendo una media anual superior al 80% durante el año, sin embargo, en los meses invernales se observan valores más altos (oscilan de 86 a 87%) que los registrados en verano (84-85%) (Fig. 24 y Tabla 10).

Con relación a los valores extremos de la humedad, debido a las condiciones sinópticas que predominan en el área de la Península Antártica, con influencia de bajas presiones y paso de sistemas frontales, los días que alcanzan el 100% de humedad (días saturados) se presentan en variadas oportunidades, para la estación de Frei en un 3% de la totalidad de los casos, en Arturo Prat y O'Higgins, en un 1% del total, mientras que los mínimos de humedad si se pueden reconocer y se presentan en la figura 25.

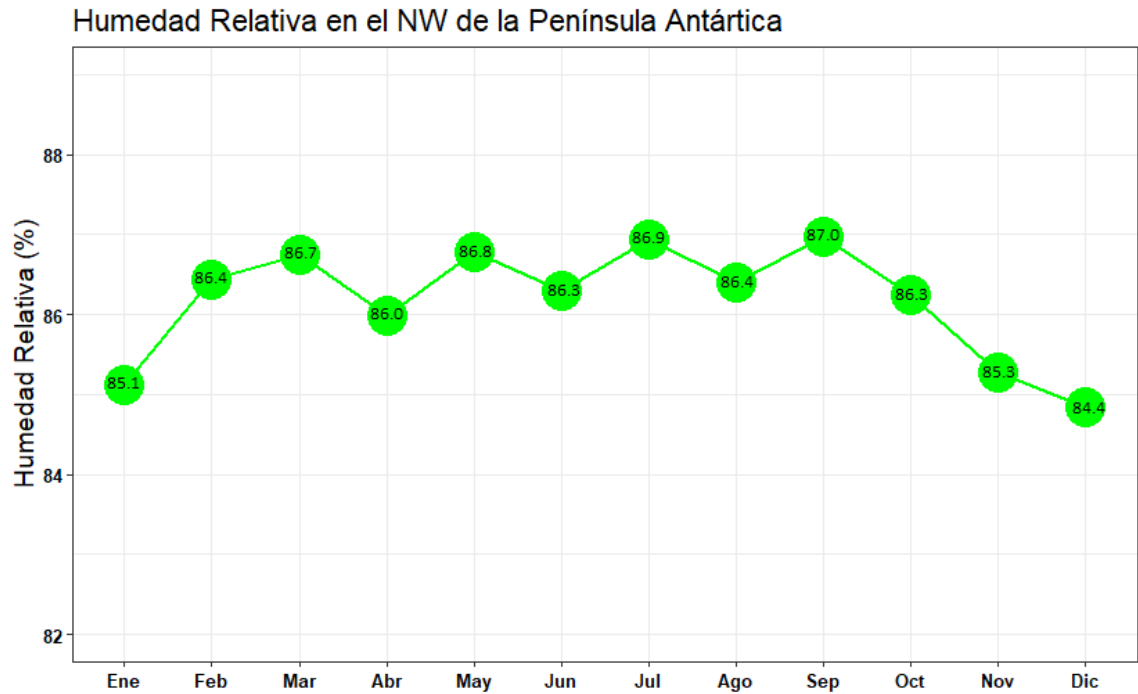


Figura 24.- Humedad Relativa media anual de las estaciones chilenas en la Península Antártica (valores medios del área) para el período 1970 a 2020.

Tabla 10: Climatología mensual de la presión en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1991-2020. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de la Humedad Relativa del Aire Período 1991-2020													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	89.4	90.2	89.7	89.3	89.1	89.0	88.5	89.1	89.1	89.7	89.8	89.9	89.1
P10	87.8	86.8	86.7	83.6	84.8	84.6	85.2	86.3	84.8	84.4	86.1	87.0	83.0
P33	88.9	89.2	89.1	88.9	88.4	87.8	87.4	87.8	87.8	88.2	88.6	88.2	87.1
P66	89.6	91.6	91.3	91.1	90.7	90.9	90.0	89.7	90.5	91.1	90.8	91.3	91.4
P90	91.2	93.4	92.8	92.6	92.5	92.3	92.6	92.3	92.6	93.8	93.6	93.6	92.6
Arturo Prat	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	87.7	86.8	87.0	88.2	88.2	88.4	88.7	89.1	88.7	88.4	88.0	87.0	85.7
P10	84.6	80.4	82.7	85.4	83.2	83.1	85.4	84.0	84.2	82.9	84.9	80.5	79.6
P33	86.2	85.7	85.5	86.5	87.6	87.1	87.3	87.6	87.9	86.5	86.7	85.9	83.2
P66	88.7	88.5	88.4	89.6	89.5	90.7	89.6	91.7	90.1	90.0	88.9	88.7	87.3
P90	90.8	90.8	90.2	91.1	92.2	92.4	92.5	93.0	92.9	93.1	91.6	91.9	91.8
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	85.1	83.3	85.8	86.2	84.6	86.2	85.8	86.3	85.6	86.2	84.8	83.5	83.2
P10	82.1	77.0	80.5	82.6	78.6	81.5	79.8	81.9	79.2	81.3	79.4	77.0	76.7
P33	84.3	82.2	83.6	85.4	83.3	84.7	85.4	83.4	84.5	83.9	82.8	81.6	81.0
P66	86.3	84.8	88.7	87.6	86.0	88.2	87.6	88.0	87.8	88.2	86.3	85.3	85.0
P90	87.9	88.0	91.1	89.7	90.3	89.5	89.5	91.8	90.5	91.1	91.3	88.8	90.0

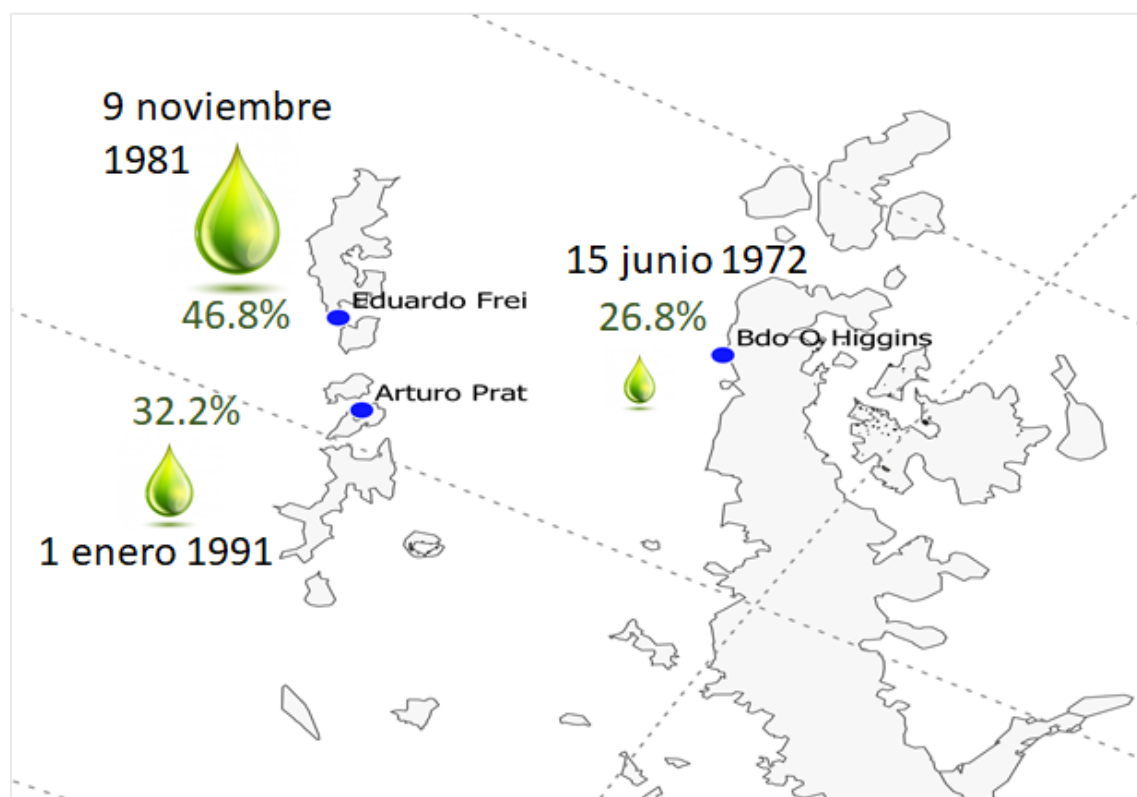


Figura 25: Humedad relativa mínima absoluta (panel derecho) observadas desde 1970 a 2020, en las estaciones chilenas en la Península Antártica.

La humedad relativa del aire en el Noroeste de la Península Antártica ha ido aumentando a razón de 0.91% por década desde 1970 al 2020, valor significativo al 5%. El valor climatológico del período 1991-2020 es de 87.3%, ubicándose 2% sobre el valor climatológico del período 1971-2000, este aumento en la media climática es relevante, ya que, el rango de la humedad entre los años 1970 y 2020 es de 14%. El año 1986 es en promedio el año más seco con una humedad media de 76.9%, mientras que el 2020 es el más húmedo con una humedad relativa del aire de 90.9% (Fig. 26).

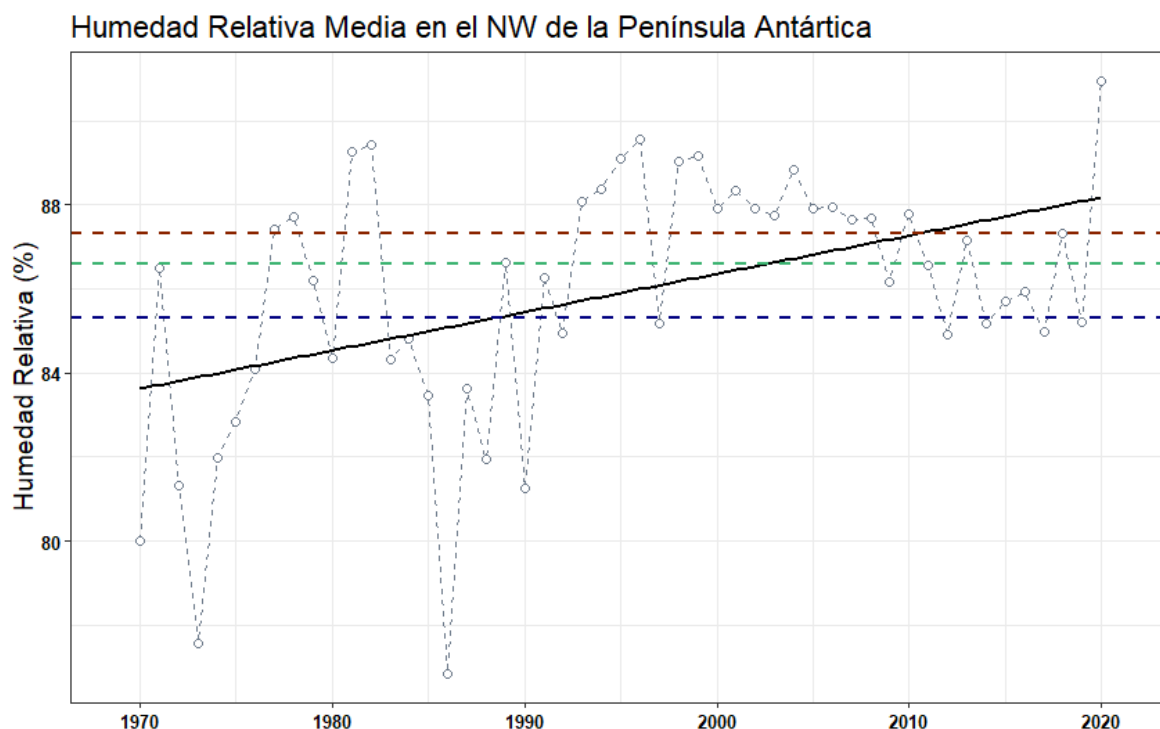


Figura 26.- Humedad relativa media anual de las estaciones chilenas en la Península Antártica (valores medios del área) de 1970 a 2020 (línea segmentada), tendencia lineal de la presión media (línea negra) y valor los registros climatológicos para los períodos 1971-2000 (línea segmentada roja), 1981-2010 (línea segmentada verde) y 1991-2000 (línea segmentada azul).

TENDENCIA

La humedad relativa del aire ha ido aumentando del orden de 0.91% por década, con un nivel de significancia al 5% según la evaluación del estadístico F. Este aumento es homogéneo y significativo al 5% durante todas las estaciones del año, sin embargo, se destaca el aumento de humedad observado en primavera de 0.96% por década (Fig. 27).

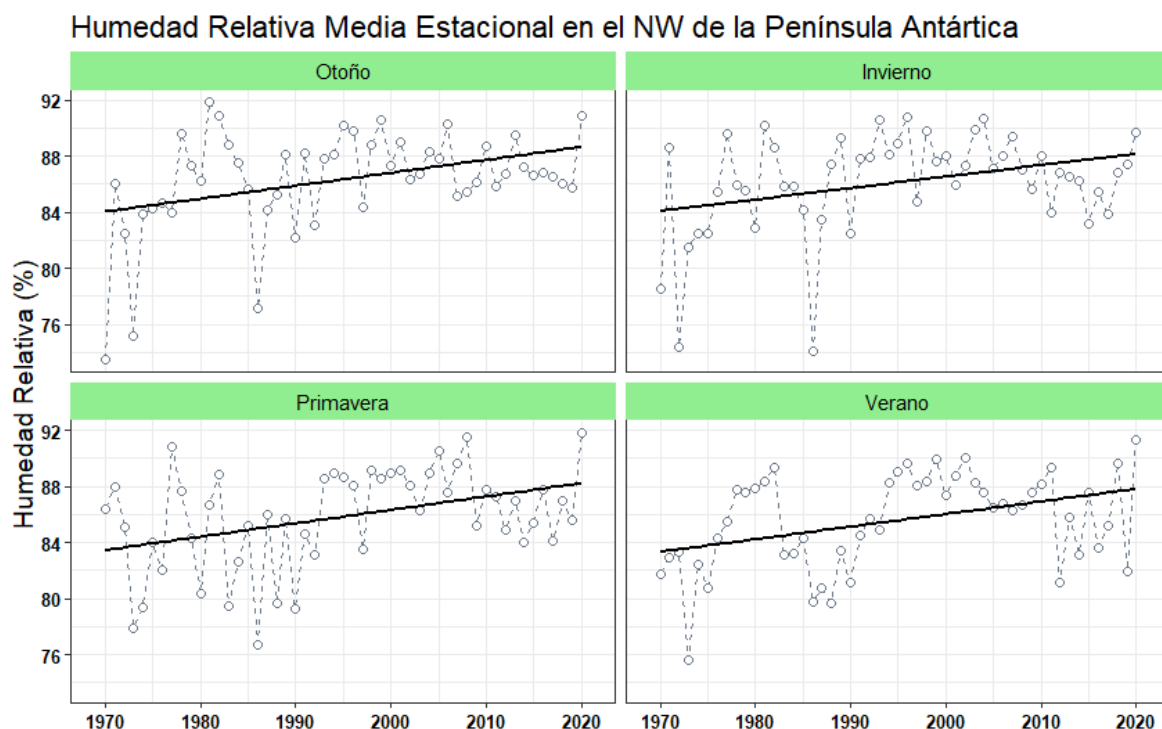


Figura 27: Humedad Relativa del aire estacional de estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica, con su respectiva línea de tendencia (líneas negras) para el período 1970-2020.

NUBOSIDAD

Las funciones más importantes de las nubes son modular la radiación de la Tierra y producir precipitaciones. Como fuente de precipitación, las nubes son parte integral de la reposición de la capa de hielo antártica por las nevadas y, por lo tanto, de su estado de equilibrio y contribución al nivel medio global del mar. A través de sus propiedades radiativas de onda corta y onda larga, las nubes influyen en la temperatura de la atmósfera. Esto, a su vez, puede tener efectos directos en la criosfera cuando las temperaturas alcanzan el punto de fusión o mediante cambios en el contenido de humedad atmosférica (ley de Clausius-Clapeyron) y su posible impacto en las nevadas. De manera similar, las nubes ejercen un control importante sobre los presupuestos de calor y agua dulce del Océano Austral, un componente clave de la circulación oceánica global y el ciclo global del carbono. Además, los estudios de modelización han demostrado que los cambios en las propiedades de las nubes sobre la Antártida pueden afectar a regiones del mundo mucho más allá de las latitudes altas del sur [Bromwich et al., 2012].

Las nubes pueden calentar o enfriar la superficie según sea la combinación de varios factores como la altura de la nube, su tamaño y la distribución de las partículas que la forman. Las nubes bajas y gruesas reflejan la radiación solar y contribuyen al enfriamiento

de la superficie de la Tierra. Las nubes altas y delgadas transmiten la radiación solar hacia la superficie de la Tierra y, al mismo tiempo, atrapan parte de la radiación infrarroja (IR) emitida por la Tierra y la irradian nuevamente hacia abajo contribuyendo al calentamiento de la Tierra.

CIELO CUBIERTO

La nubosidad en el Océano Austral y en los mares antárticos es mayor que en la parte continental de la Antártica. Allí, la fracción de nubes alcanza valores superiores al 90%, debido al desplazamiento del ASL más al norte, lo que trae humedad desde latitudes más bajas a las laderas de las costas del sector oeste de la Antártica [Listowsky et al., 2019]. Mientras que, otros autores atribuyen el alto grado de nubosidad del Océano Austral con la intensa actividad ciclónica que se mueve hacia el este alrededor del continente antártico [King y Turner, 1997; Carrasco et al., 2003; Simmonds et al., 2003].

Consistente con lo anterior, y con la ubicación geográfica de las estaciones chilenas de la Península Antártica, la cobertura nubosa en dicho sector es alta, con promedios anuales del orden de 6.6 octas de nubosidad. No obstante, al promediar los valores medios mensuales de la cobertura de nubes durante el período completo, se hace evidente un ciclo anual. Su característica principal es que en los meses de primavera y verano se presenta mayor cobertura nubosa (con un promedio para el sector de 6.8 octas), mientras que en los meses de invierno disminuye levemente esta condición, en particular durante junio con promedio para el sector de 6.0 octas, presentando también en estos meses mayor variabilidad (Fig. 28).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

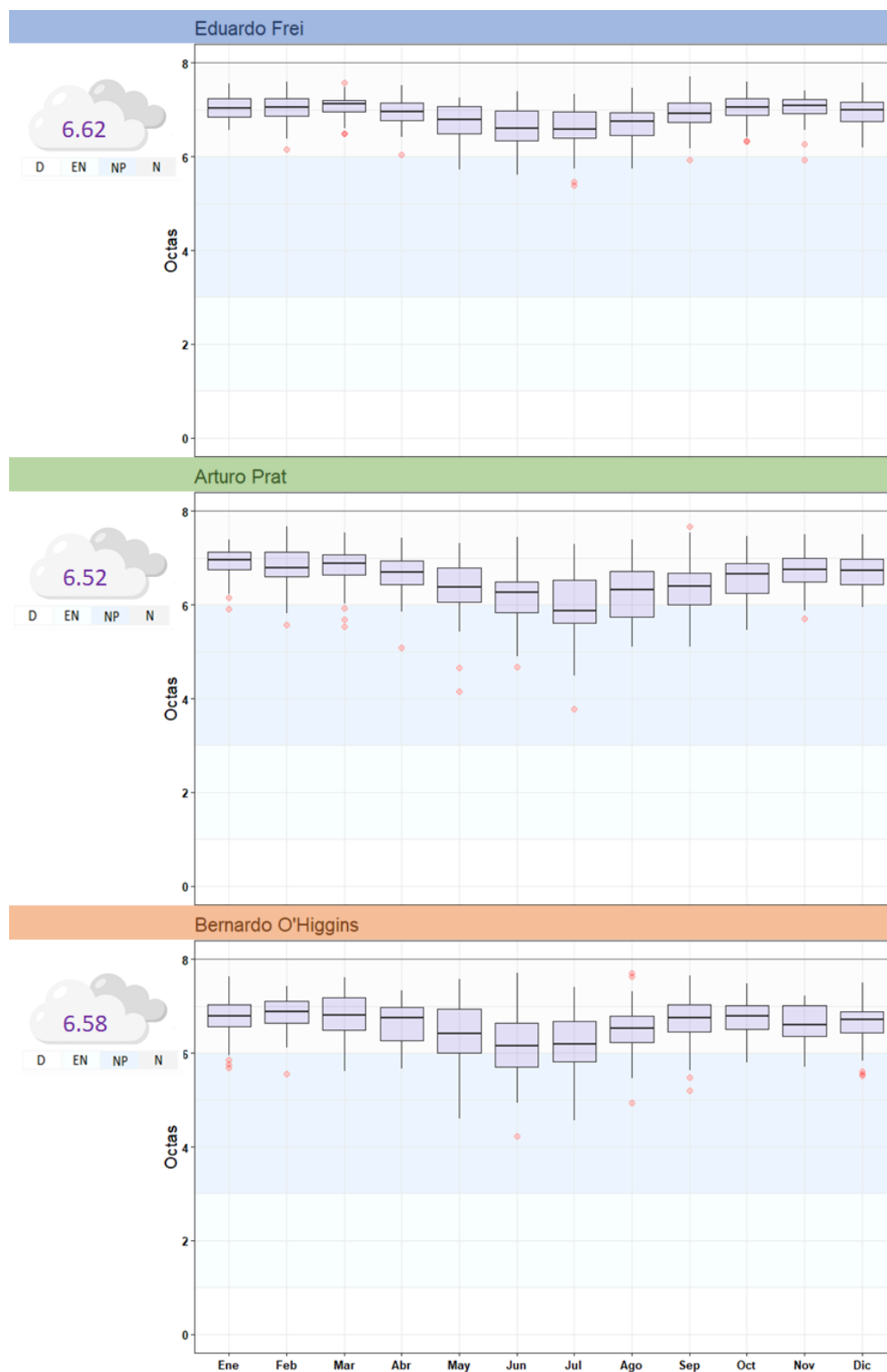


Figura 28. Diagrama de cajas de cielo cubierto por octas en las estaciones chilenas de la Península Antártica. Los bordes (superior e inferior) de las cajas representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites. Además, se presentan los valores medios anuales de la nubosidad por estación.

La serie temporal de promedios anuales de nubosidad muestra cierta variabilidad interanual y, aunque ha habido un ligero aumento en la media entre 1970 y 2020, es de sólo del orden de 0,1 octas por década (0.054 y de 0.075 octas por década en Frei y O'Higgins). Los valores climatológicos para el período 1991-2020 son de 6.96, 6.57 y 6.61 octas, para Frei, Prat y O'Higgins, valores que presentan un aumento del orden de 3% en promedio, comparadas con el periodo 1971-2000. La tendencia de la nubosidad en los primeros años presenta valores negativos, sin embargo, a fines de los años 70 (Frei) y durante el año 1984 (Prat y O'Higgins), la tendencia presenta un punto de inflexión, pasando de valores negativos a positivos (Fig. 29).

El comportamiento estacional de la cobertura nubosa muestra que la tendencia positiva está presente en todas las temporadas. La tendencia es mayor durante los meses de invierno (0.12 y 0.17 octas por década en Frei y O'Higgins). La tendencia anual es significativa al nivel del 5% en ambas estaciones, mientras que en invierno sólo lo es en O'Higgins (Fig. 30 y Tabla 11). Estos resultados son consistentes con los resultados de Kirchgäßner [2010], quien estima un aumento significativo de la cobertura total de nubes entre 1960 y 2005 en Vernadsky / Faraday, con un aumento más intenso en invierno. Este aumento de la nubosidad, podría estar vinculado con la disminución de la capa de hielo marino en el mar de Bellingshausen, este aumento en la nubosidad también es consistente con el debilitamiento de la oscilación semestral observada desde la década de 1970 [van den Broeke, 2000].

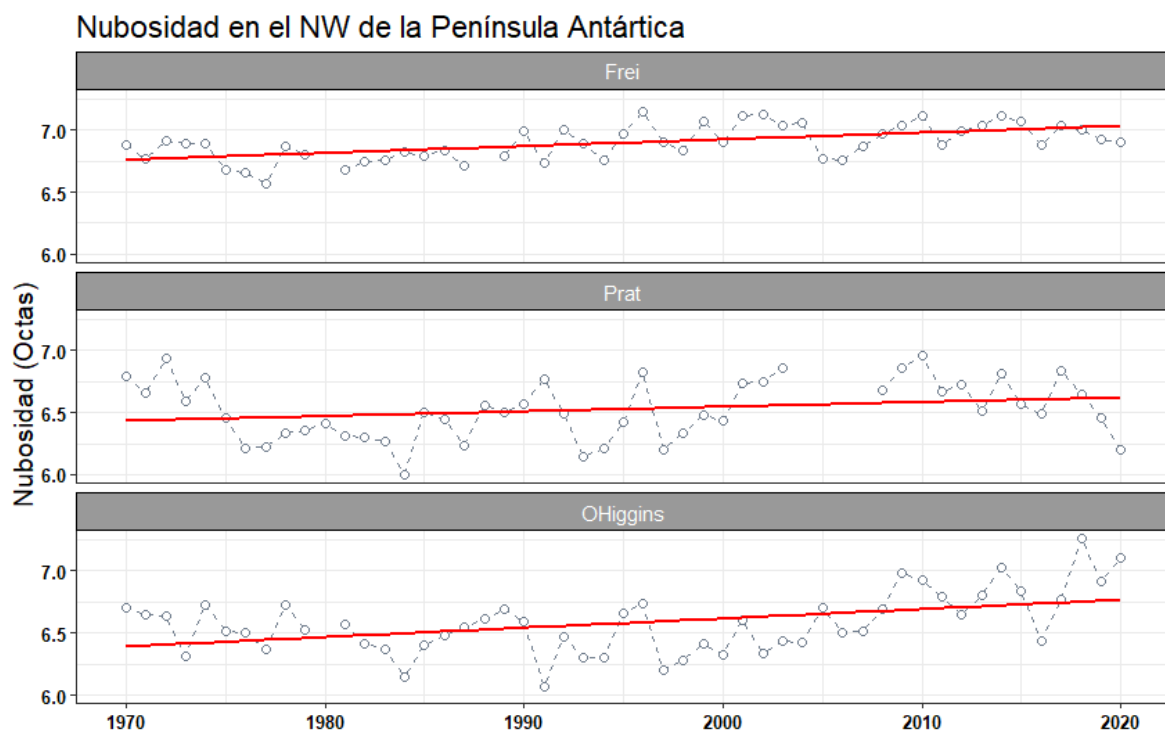


Figura 29.- Nubosidad media anual de las estaciones chilenas en la Península Antártica de 1970 a 2020 (línea segmentada con puntos), junto con la tendencia lineal (línea roja).

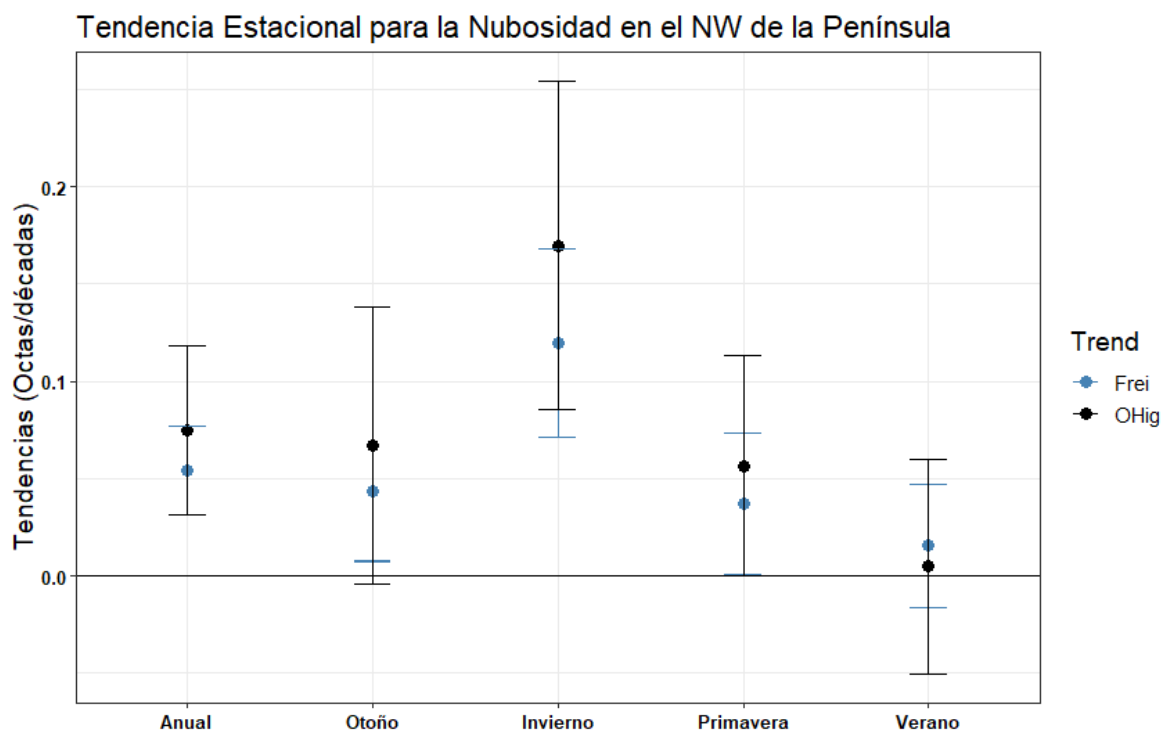


Figura 30: Tendencia estacional de la nubosidad en estaciones chilenas ubicadas en la Península Antártica (Octas/década), para el período 1970-2020. Las barras indican los intervalos de confianza al 95%.

Tabla 11: Tendencia anual y estacional de nubosidad en las estaciones chilenas de la Península Antártica. En negrita se presentan las tendencias con significancia estadística al 5%.

Tendencias de la Nubosidad					
Estación	Anual	MAM	JJA	SON	DEF
Eduardo Frei	0.054	0.044	0.120	0.037	0.016
Bernardo O'Higgins	0.075	0.067	0.170	0.057	0.005

El análisis de la cantidad de días con cielo cubierto (8 octas), indica que O'Higgins es el lugar que presenta mayor frecuencia con cielo cubierto, observándose en promedio 154.6 días con 8 octas, lo que representa un 45% del total anual, además se puede reconocer un ciclo estacional con un mínimo en julio y dos máximos en marzo y octubre. En Prat se observan 143.0 días con cielo cubierto (40%) con un ciclo anual menos definido, aunque, se observa un máximo que se presenta en marzo. En Frei se observa la menor cantidad de días con cielo cubierto 121.1 días, abarcando un 33% del total anual y desaparece el ciclo anual, permaneciendo relativamente estable la cantidad de días con cielo cubierto (Fig. 31).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

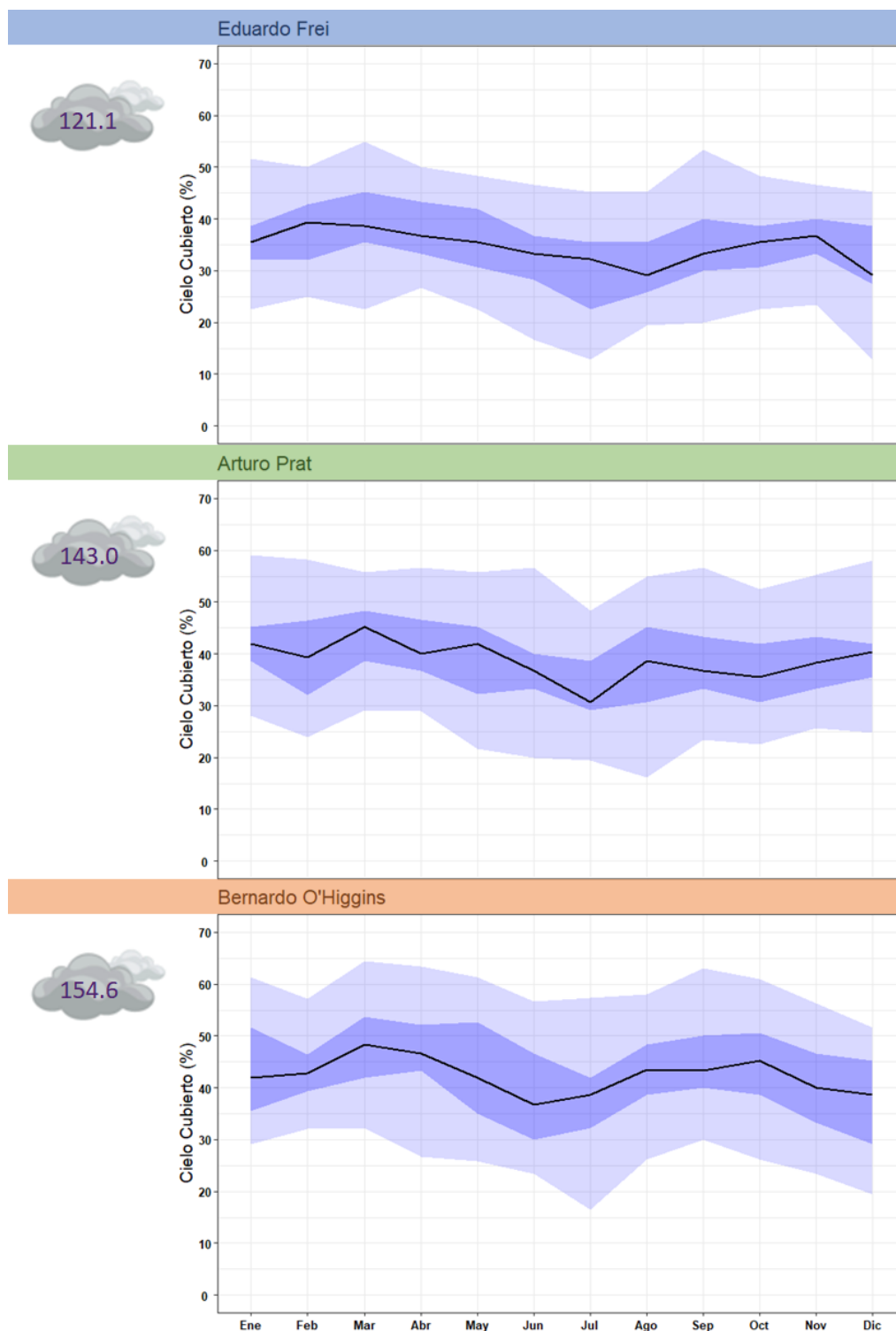


Figura 31.- Porcentaje de cielo cubierto en las estaciones chilenas en la Península Antártica para el período 1991-2020. Los gráficos muestran el promedio mensual de cielo cubierto (línea negra), valores normales mensuales de cielo cubierto, entre las bandas de los percentiles 33% y 66% (franja morada oscuro), promedio mensual entre los percentiles 10% y 90% (franja lavanda) y el promedio anual de días con cielo cubierto. Promedio anual de días con cielo cubierto 8 octas (nubes).

TIPOS DE NUBES (ALTURA)

Sobre el Océano Austral, la mayor cobertura de nubes (> 50%) ocurre en la troposfera inferior, por debajo de ~3 km sobre el nivel del mar. Esta abundancia de nubes de bajo nivel implica la presencia de estratos cuasi permanentes [Listowsky et al., 2018]. Aunque, las nubes medias y altas a menudo quedan ocultas a la vista por nubes más bajas donde las nubes bajas son más frecuentes (Fig. 32).

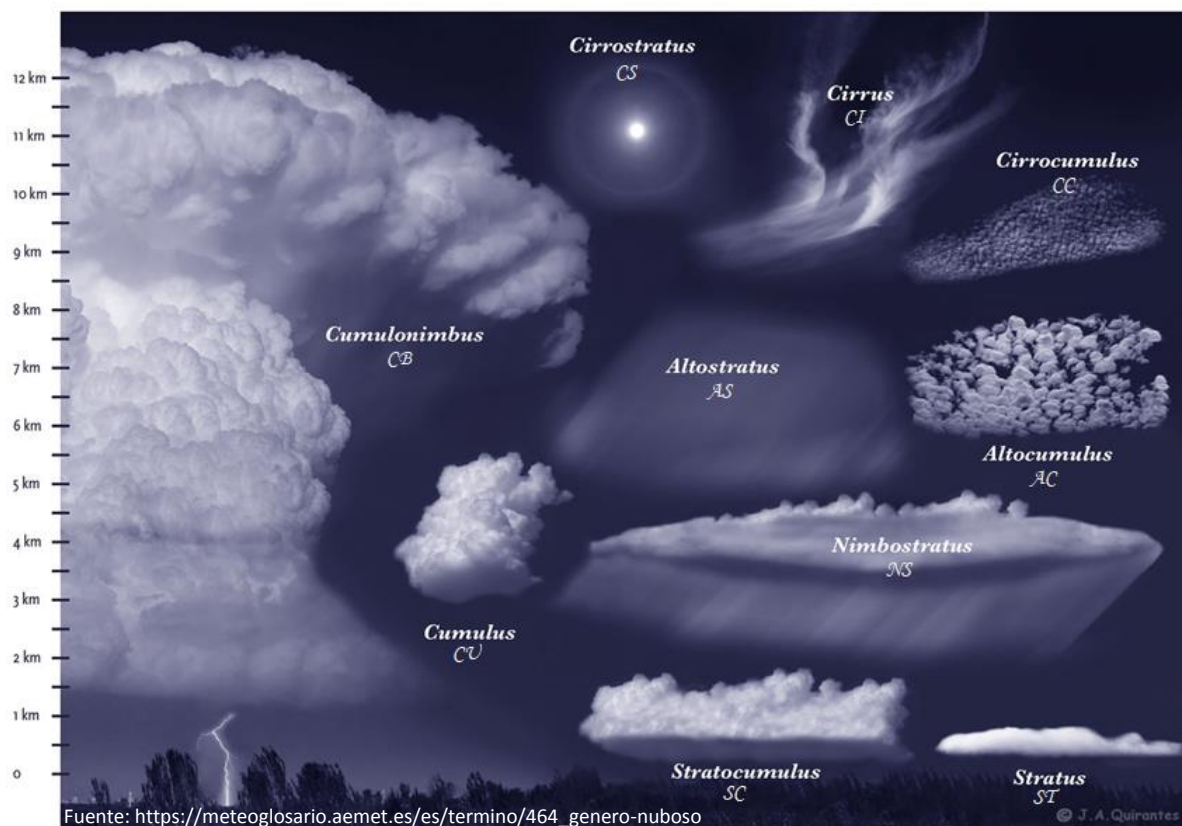


Figura 32. Esquema conceptual del tipo y altura de nubes principales.

El ciclo diario del tipo de nubes clasificado según su altura en las estaciones chilenas de la Península Antártica, no muestra mucha diferencia en cada una de las estaciones. Predominando la nubosidad baja, con una frecuencia del orden del 80%, destacando el tipo estrato (ST) en Frei y Prat (aunque la estación presenta sobre el 12% de datos perdidos), mientras que en O'Higgins el tipo de nube más frecuente es el estrato cúmulo (SC). Las nubes altas, no contribuyen sustancialmente a la ocurrencia total de nubes (2%) (Fig. 33).

Los promedios mensuales se calcularon utilizando la frecuencia de ocurrencia de cada tipo de nube por la cantidad total de días del mes.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

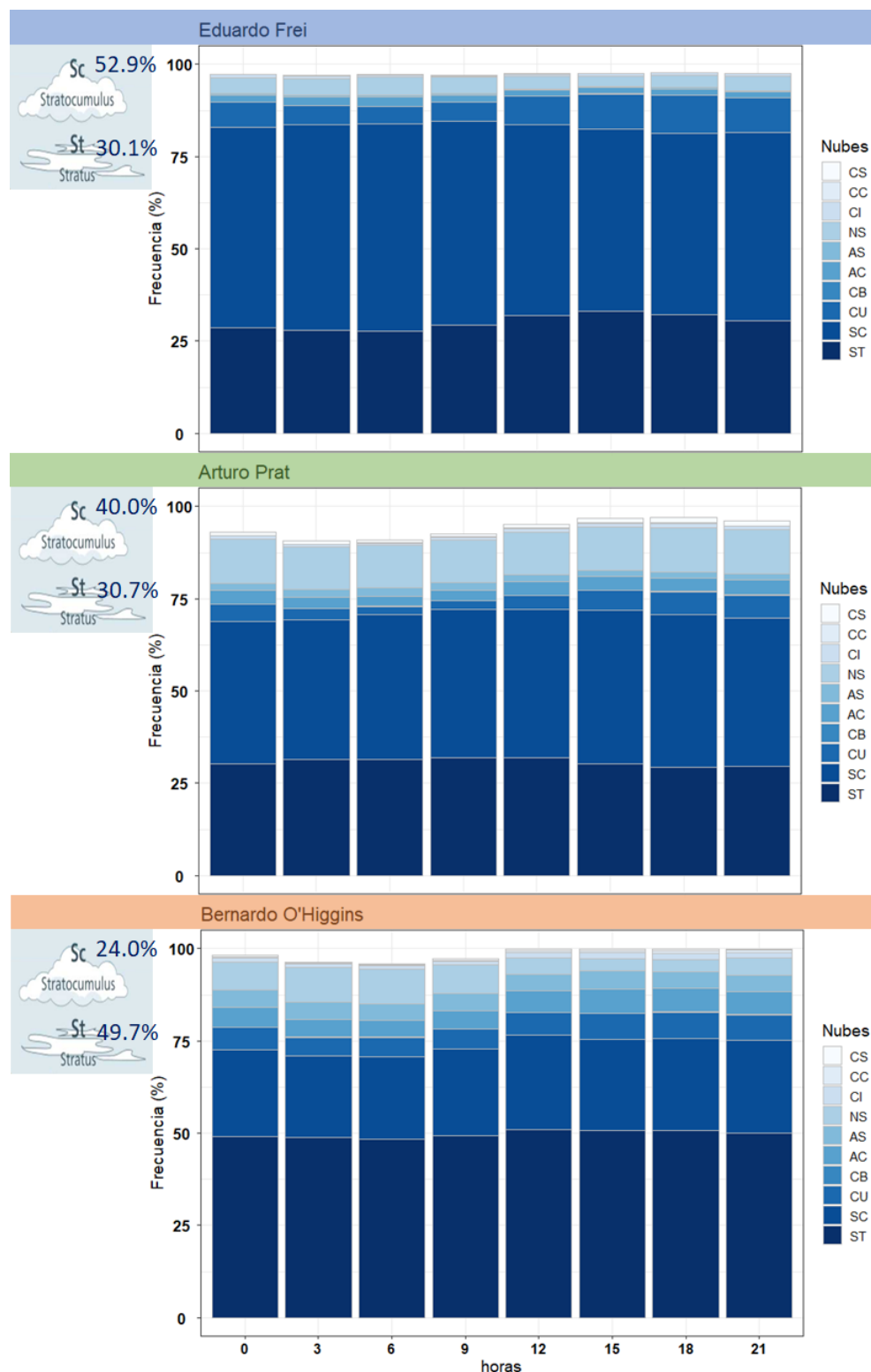


Figura 33.- Tipos de nubes clasificados según su altura en las estaciones chilenas en la Península Antártica para el período 1991-2020. Los gráficos muestran los registros sinópticos cada 3 horas (en hora UTC), los colores más oscuros representan las nubes bajas, mientras que los colores claros las nubes altas.

Nota: Los datos perdidos no se muestran en el gráfico.

VISIBILIDAD

Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial, 1994, 2017), la visibilidad se define como la mayor distancia a la que se puede reconocer un objeto negro durante el día o la luz de una intensidad moderada especificada durante la noche. Esta puede verse reducida por condiciones meteorológicas naturales como la precipitación, formación de niebla, neblina, gotas de nubes en condiciones de alta humedad del aire, o por la presencia de factores como humo, polvo, arena y ventisca. La visibilidad también es un indicador útil para la contaminación del aire, debido a que se detecta de manera fácil a simple vista.

La visibilidad en las estaciones chilenas de la Península Antártica muestra una variación diurna, observándose la mayor reducción en horas de la mañana de 6 a 9 horas UTC, mientras que en horas de la tarde (18 UTC) la visibilidad es mayor. Esta variación diurna es similar en las tres estaciones, sin embargo, O'Higgins muestra mayor variabilidad diurna que Frei y Prat, cabe destacar que Frei reporta la menor visibilidad con un promedio climatológico anual a las 06Z de 7564 m, mientras que en Prat se observa la mayor visibilidad con un promedio climatológico anual a las 06Z de 8105 m (Fig. 34).

La reducción de visibilidad se puede producir por condiciones meteorológicas húmedas o secas. Los factores meteorológicos dominantes que desencadenan eventos de baja visibilidad son diferentes dependiendo de si prevalecen las condiciones climáticas húmedas o secas. Por tanto, la variabilidad de los registros de visibilidad debería diferir para cada grupo de condiciones meteorológicas. Sin embargo, los eventos de reducción de visibilidad que se producen en las estaciones chilenas de la Península Antártica, se asocian principalmente a condiciones de atmósfera húmeda (niebla (FG), bruma (HZ), neblina (BR) y llovizna (DZ) para condiciones de clima húmedo y polvo (DU) y arena para condiciones de clima seco), debido a los altos valores de humedad que se presentan en el sector y a los bajos episodios de reducción de visibilidad por polvo y arena.

Una vez identificado el horario en que la visibilidad muestra la mayor reducción (06Z) en el NW de la Península Antártica, se analiza el comportamiento mensual en dicho horario para cada una de las estaciones durante el período 1991-2020, donde la visibilidad mensual mostró un amplio rango desde 0 a 6.000 Km, observándose un patrón similar en cada uno de los meses para todas las estaciones, con un registro de sobre el 50% de visibilidad entre 10 a 20 Km, es decir, cielo claro (Fig. 35).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

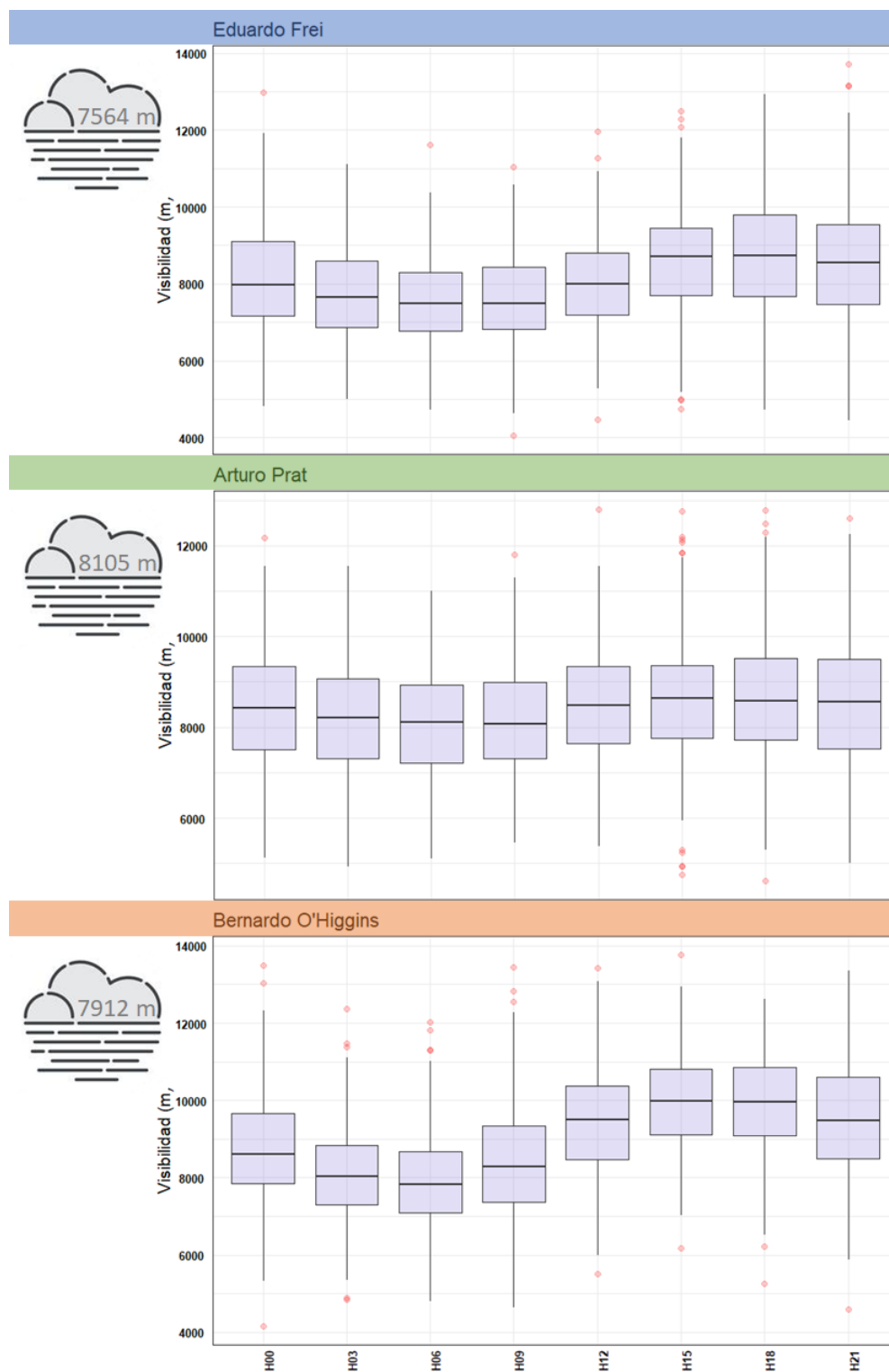


Figura 34. Diagrama de cajas de los patrones diurnos de visibilidad en las estaciones chilenas de la Península Antártica. Los bordes (superior e inferior) de las cajas representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites. Promedios anuales (1991-2020) de visibilidad (nubes).

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

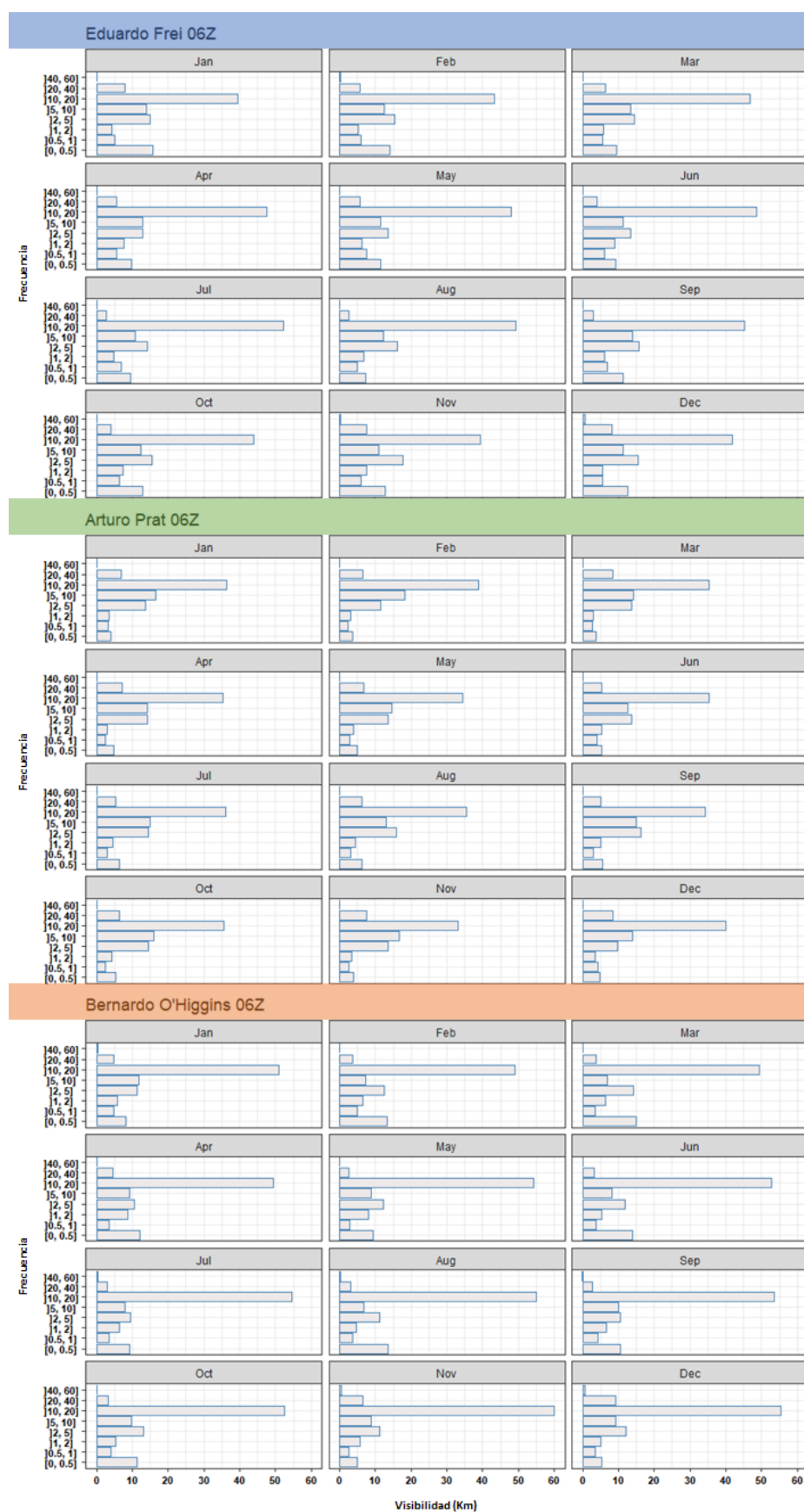


Figura 35.- Visibilidad mensual de las estaciones chilenas en la Península Antártica para el período 1991 a 2020.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Luego, se calcula la cantidad de días que se presenta reducción de visibilidad menor o igual a 5 KM en el horario definido como el de mayor reducción de visibilidad (06Z), lo que representa aproximadamente el 40% de los datos. En la década de los 70 en las estaciones de la Península, muestran mayor frecuencia de días con reducción de visibilidad bajo los 5 Km, particularmente en Prat y O'Higgins que presentan años con más de 300 días con visibilidad reducida (1972, 1974 y 1978), no obstante, el promedio anual de días con visibilidad reducida es similar en las tres estaciones de 150.6, 152.8 y 152.7 días en Frei, Prat y O'Higgins respectivamente (Fig. 36).

Tabla 12: Reducción de visibilidad (m) en función del fenómeno meteorológico imperante.

Condición Climática	Visibilidad Meteorológica (Km)
Niebla Densa	0.03
Niebla Moderada	0.16
Niebla Ligera	0.35
Niebla muy Ligera	0.54 - 1.03
Neblina Ligera	1.08 - 2.16
Neblina muy Ligera	2.16 - 5.4
Cielo Claro	5.4 - 10.8
Cielo muy Claro	> 10.8

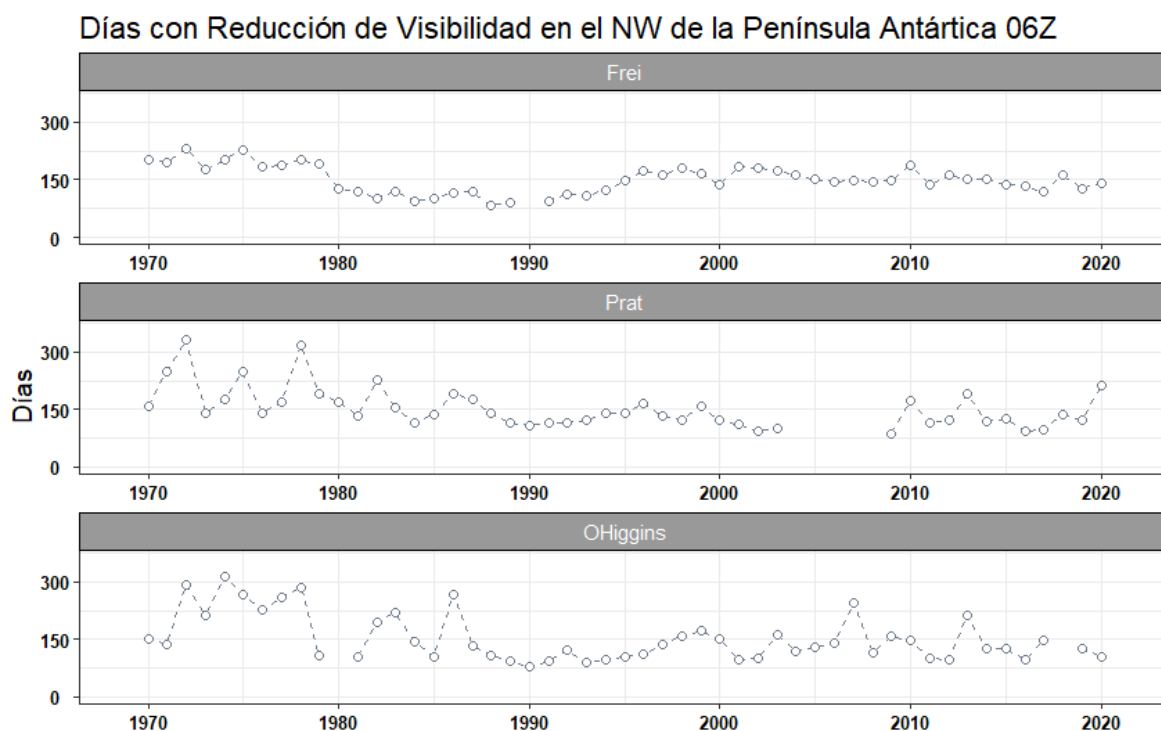


Figura 36.- Días con reducción de visibilidad a las 06Z en las estaciones del Noroeste de la Península Antártica.

TIEMPO PRESENTE

El elemento sinóptico del tiempo presente de un registro, consiste en un código de dos dígitos que va de 00 a 99. Es una selección de un código único para representar las condiciones observadas en un momento y lugar particulares que se logra mediante un conjunto bien definido de criterios y prioridades publicados por la Organización Meteorológica Mundial (1974). Muchas de las definiciones de códigos de WW difieren en unos aspectos bastante sutiles entre sí. Por lo tanto, para determinar las características climatológicas generales de las estaciones chilenas en la Península Antártica, se agruparon estos códigos (Tabla 13).

Tabla 13: Códigos sinópticos del tiempo presente de la OMM.

Tiempo Presente	
Fenómeno	Código
Niebla	FG
Neblina	BR
Bruma	HZ
Lluvia	RA
Llovizna	DZ
Nieve	SN
Lluvia-Nieve	RASN
Granizo	GR
Ventisca	BL

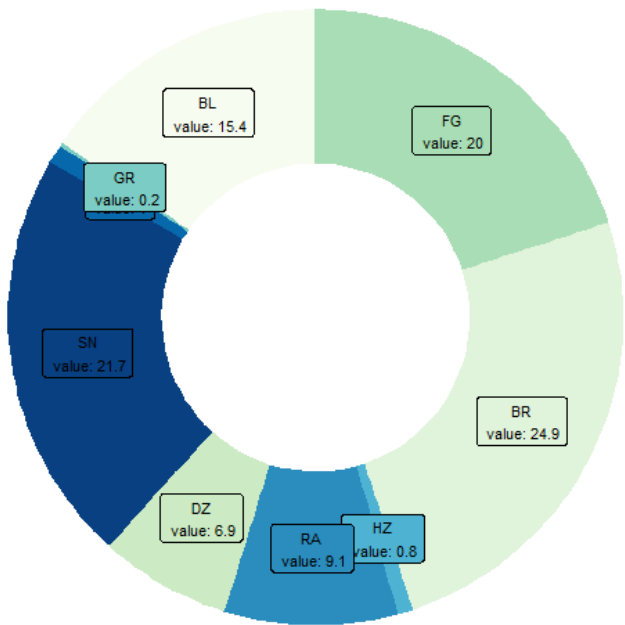


Figura 37.- Frecuencia (%) de los fenómenos de tiempo presente en Eduardo Frei para el período 1991-2020. Clasificación según códigos presentados en la tabla 13.

Los fenómenos de tiempo presente que se reportan con mayor frecuencia en Eduardo Frei son la Niebla (FG), Neblina (BR), Nieve (SN) y las ventiscas (BL), Se reportan también, aunque con menor frecuencia episodios de Lluvia (RA) y Llovizna (DZ) (Fig. 37).

La niebla ocurre cuando muchas gotas de agua y/o cristales helados se suspenden en la atmósfera cerca de la superficie. Tanto la niebla como la neblina pueden reducir la visibilidad de la atmósfera, lo que podría impactar de manera negativa en el desarrollo socioeconómico y la vida de las personas (Ramanathan y Ramana, 2005), y causar graves pérdidas económicas (Gultepe et al., 2007). Además, pueden concentrar aerosoles

en la superficie, lo que podría aumentar la contaminación del aire y empeoraría la calidad del aire, pudiendo causar daños importantes a la salud humana (Afroz et al., 2003; Bai et al., 2006; Greeneand Morris, 2005).

En cuanto al comportamiento mensual de los fenómenos de tiempo presente, se observa que la niebla y neblina tienen un ciclo anual opuesto a la nieve y ventisca, ya que, los máximos y mínimos de niebla y neblina se presentan en los meses de verano e invierno, la nieve y las ventiscas se desarrollan con mayor frecuencia en los meses de invierno y los mínimos se presentan en los meses de verano (Fig. 38).

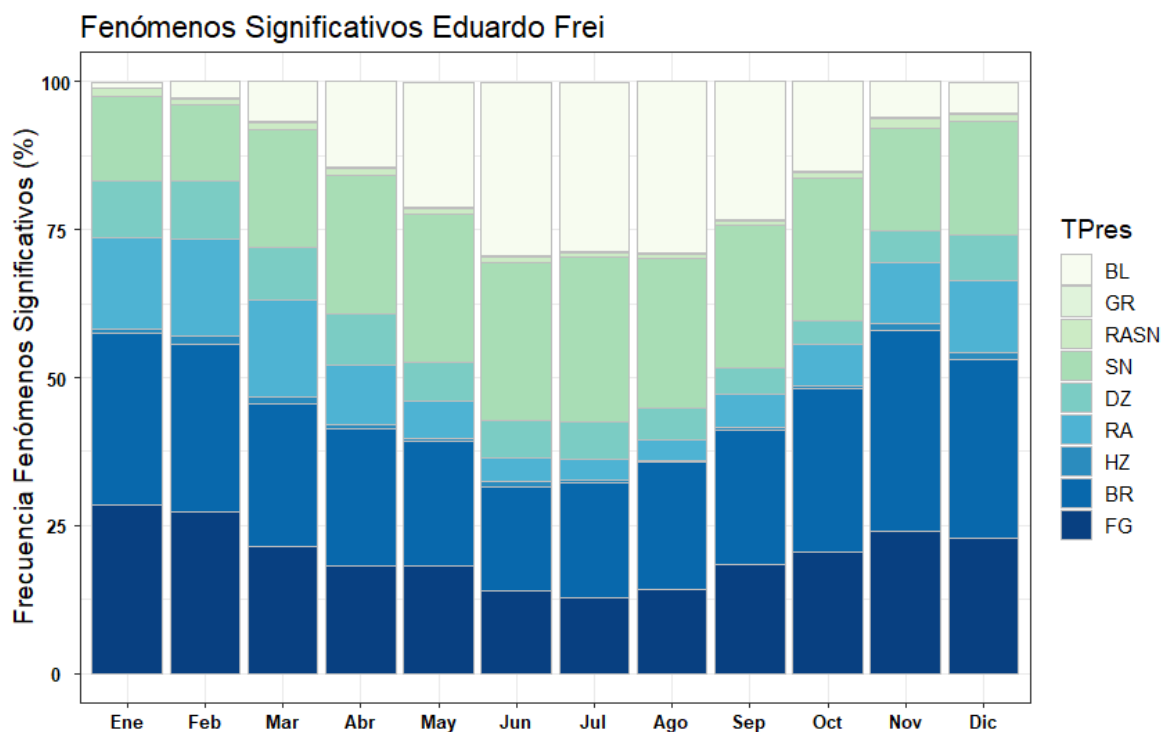


Figura 38.- Frecuencia de los fenómenos significativos de tiempo presente en Eduardo Frei para el período 1991-2020. Clasificación según códigos presentados en la tabla 9.

HORAS DE SOL

La duración de las horas de sol, es un indicador climático que mide la cantidad total de horas de luz durante el día, también definido como el período del día durante el cual la irradiancia solar directa supera un valor umbral de $120 \text{ W} / \text{m}^2$.

Las estaciones ubicadas en la Península Antártica suelen presentar un par de semanas a mediados de invierno (alrededor del 21 de junio) cuando no sale el sol, presentando valores climatológicos de 3.6 y 5.7 horas de sol por mes (del orden de 0.2 horas de sol por día) durante junio en Frei y O'Higgins, y un par de semanas en verano alrededor de Navidad cuando el sol no se pone, observándose valores climatológicos para diciembre de 91.0 y 105.4 horas de sol por mes en cada estación (aproximadamente 3 horas de sol por día) (Fig. 39 y Tabla 14).

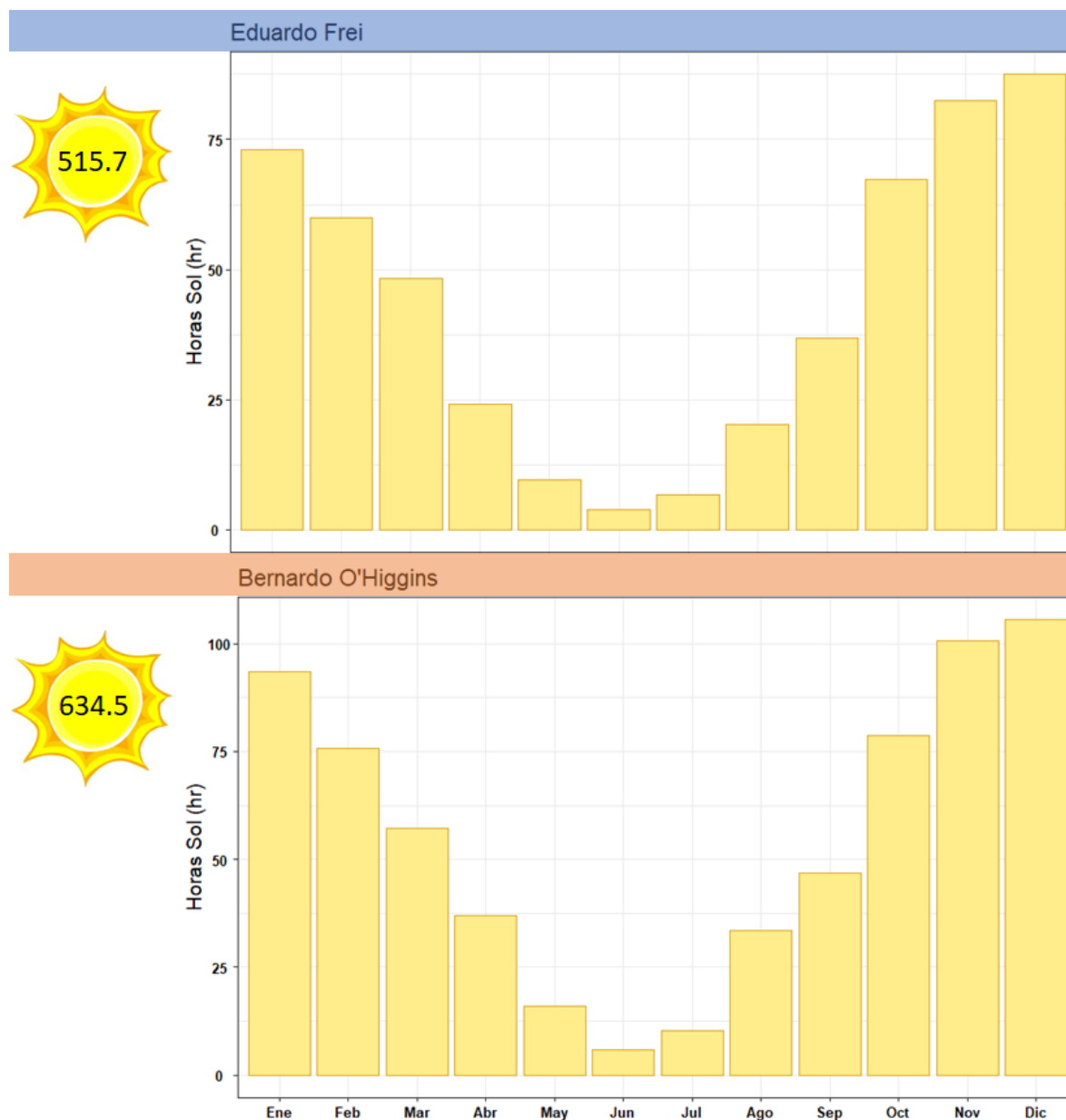


Figura 39.- Suma mensual de la cantidad de horas de sol en Frei y O'Higgins para el período 1981-2010. Además, se muestra el promedio anual de las horas de sol por estación.

La serie de las sumas anuales de la duración de las horas de sol en el NW de la península Antártica presenta gran variabilidad interanual, no obstante, en Eduardo Frei aún se pueden reconocer patrones. En la segunda mitad de la década de los '90 y primeros años de la del 2000 se observan períodos más prolongados de luz solar, sin embargo, durante la última década de medición de la estación (hasta 2016) se presentaron los registros más bajos de horas de sol. Los años con mayor cantidad de horas de sol son el 2000 en Frei con 712.6 horas de sol por año y el 2016 en O'Higgins con 915.6 horas de sol por año (en el año más cálido a nivel planetario) (Fig. 40), ambos años sobre el valor climatológico 522.6 y 601.0

horas de sol por año, lo que equivale a aproximadamente 1.5 y 1.8 horas de sol por día (Tabla 14).

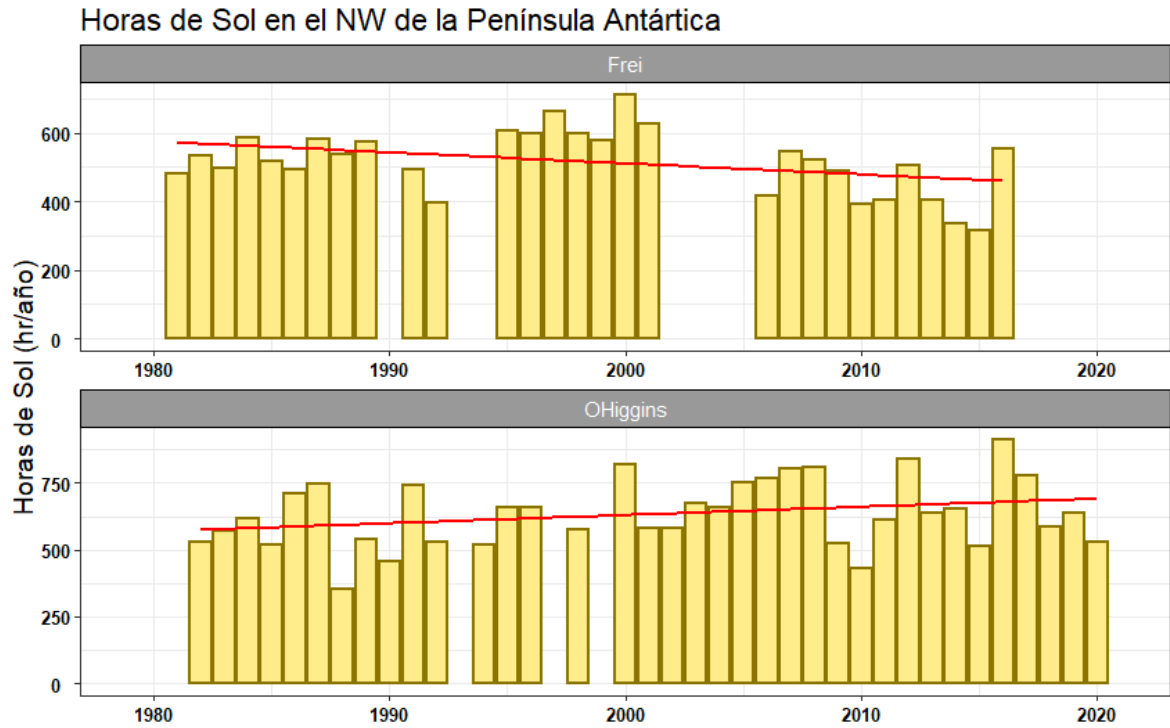


Figura 40.- Suma anual de la cantidad de horas de sol en Frei y O'Higgins para el período 1981-2010.

Tabla 14: Climatología mensual de las horas de sol en las estaciones chilenas de la Península Antártica para el período climatológico 1981-2010. Se muestran los promedios mensuales y anuales además de los percentiles 10%, 33%, 66% y 90%. El rango entre P33% y P66% se considera como el valor normal (en verde), el P10% y el P90% se definen como los valores umbrales extremos.

Climatología Mensual de las Horas de Sol Período 1981-2010													
Eduardo Frei	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	522.6	76.9	62.1	48.2	24.3	10.3	3.6	7.8	20.1	38.3	74.1	84.7	91.0
P10	379.0	52.5	34.4	25.3	12.4	3.3	0.9	1.5	6.6	15.2	41.1	49.9	48.4
P33	493.1	57.6	54.5	30.6	19.4	6.3	2.4	5.4	11.9	30.7	54.2	68.9	71.0
P66	579.4	80.8	70.4	52.7	28.9	12.2	3.9	9.0	24.4	46.7	85.7	93.2	102.9
P90	640.7	114.7	86.8	81.0	36.6	16.9	6.0	13.7	36.6	58.3	108.2	127.4	137.5
Bdo O'Higgins	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	601.1	84.0	72.5	58.3	36.1	16.0	5.7	10.2	35.9	46.8	82.6	103.1	105.4
P10	447.3	38.4	48.6	29.6	18.2	6.4	1.7	1.3	18.2	29.2	49.1	75.9	47.4
P33	535.8	62.0	58.5	44.9	28.8	10.7	4.4	4.1	27.8	36.9	67.7	97.5	80.3
P66	661.9	101.2	80.7	61.3	42.4	18.4	6.6	13.2	40.0	48.3	91.7	108.6	115.8
P90	783.5	128.3	101.6	88.9	50.1	27.6	8.5	22.2	55.6	72.8	118.2	126.2	142.0

ÍNDICE DE RADIACIÓN

El Índice de Radiación UV expresa, de alguna forma, la intensidad de la Radiación Ultravioleta, la cual está definida bajo el concepto del enrojecimiento de la piel luego de algunas horas de exposición, convirtiendo al índice UV en una forma simple de relacionar los riesgos para la salud de la sobreexposición solar. Este índice, tiene su origen en la Organización Meteorológica Mundial y va desde un valor de 1 hasta 11, aunque puede alcanzar valores de 13, 14 o incluso más en zonas ecuatoriales (blog.meteochile.gob.cl).

Para evitar enfermedades relacionadas con la radiación, la Organización Mundial de Salud recomienda protegerse de los niveles altos de radiación, teniendo en cuenta que la mayor radiación se presenta en los horarios en que se reciben los rayos solares con mayor perpendicularidad, sin embargo, en Eduardo Frei a pesar de que en verano recibe mucha radiación, debido a la ubicación cercana al Polo los índices de UV en promedio no superan las categorías de moderados a altos (índice 5 a 6) (Fig. 41).

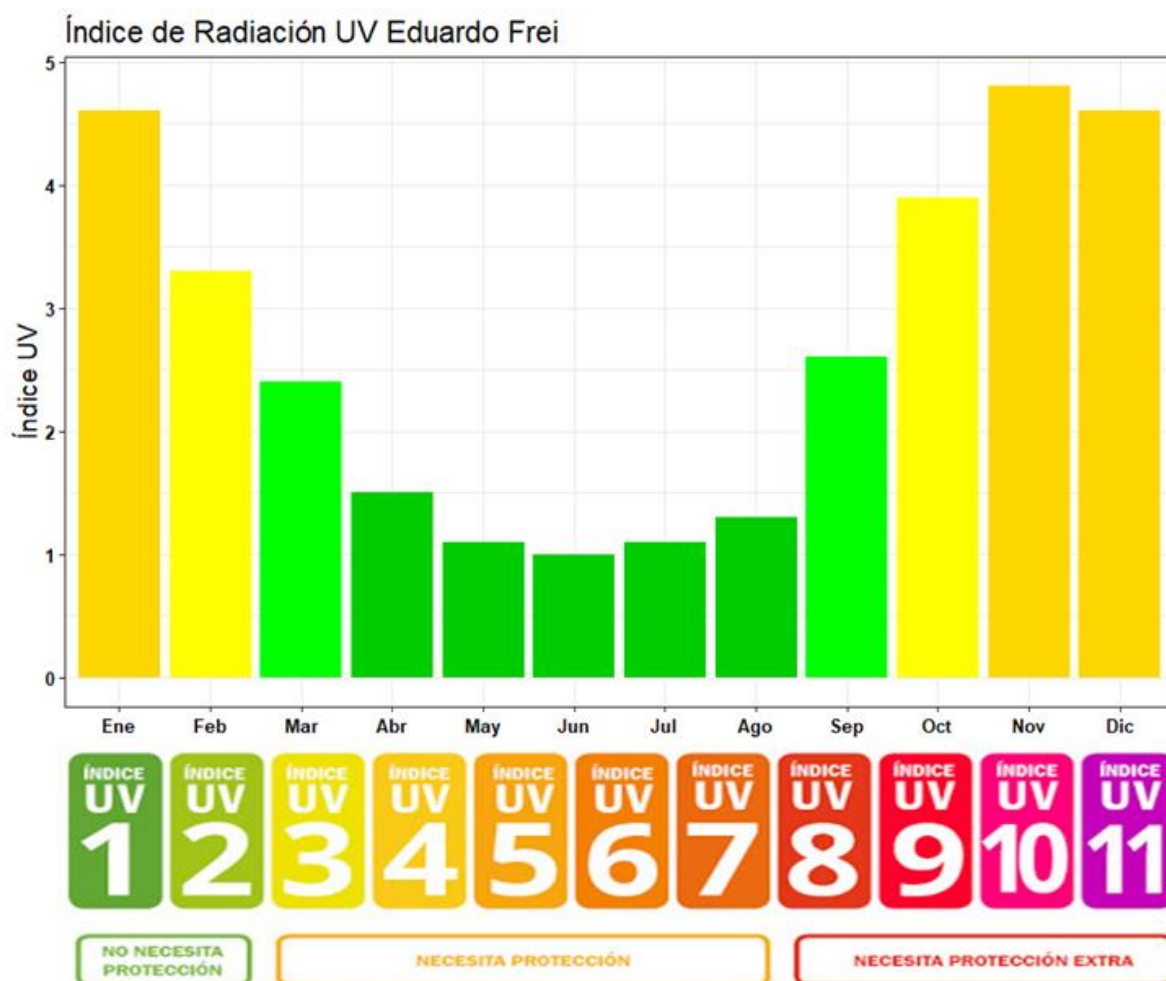


Figura 41.- Promedio mensual del índice de radiación UV máximo diario en Frei para el período 2009-2018.

ANEXOS

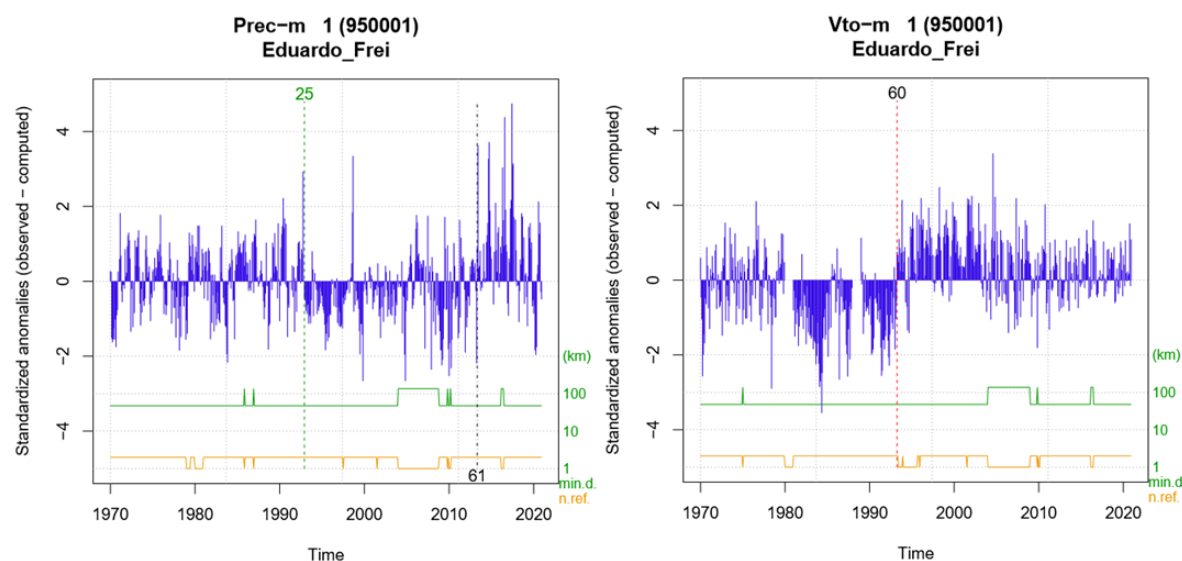


Figura 1A: Salto de las variables homogeneizadas en este documento.

Tabla 1A: Nombre, definición y unidades de los índices de cambio climático.

Índice	Definición		Unidad
FD	Días con heladas	TN < 0°C	días
TX _x	Valor máximo temperatura máxima	max(TX)	°C
TX _n	Valor mínimo temperatura máxima	min(TX)	°C
TN _n	Valor mínimo temperatura mínima	min(TN)	°C
TN _x	Valor máximo temperatura mínima	max(TN)	°C
DTR	Rango diario de temperatura	TX-TN	°C
TN10p	Noches frías	TN < P10	%
TX10p	Días fríos	TX < P10	%
TN90p	Noches cálidas	TN > P90	%
TX90p	Días cálidos	TX > P90	%
R1mm	Días con precipitación	RR > 1 mm	días
R10mm	Días con precipitación sobre 10 mm	RR > 10 mm	días
R20mm	Días con precipitación sobre 20 mm	RR > 20 mm	días
R30mm	Días con precipitación sobre 30 mm	RR > 30 mm	días
CDD	Longitud máxima de días secos	Σ n° días, si RR < 1 mm	días
CWD	Longitud máxima de días húmedos	Σ n° días, si RR > 1 mm	días
SDII	Intensidad de precipitación	Σ RR/n° días, si RR > 1 mm	mm/día
R95pTOT	Precipitación anual cuando RR > P95	Σ RR, si RR > P95	mm
R99pTOT	Precipitación anual cuando RR > P99	Σ RR, si RR > P99	mm
Rx1day	Precipitación máxima en 1 día	Rx1day= max (RR)	mm
Rx5day	Precipitación máxima en 5 días	Rx5day= max (RR)	mm
PRCPTOT	Precipitación Total	Σ RR	mm

BIBLIOGRAFÍA

Capps, S.B., Zender, C.S. (2010) Estimated global ocean wind power potential from QuikSCAT observations, accounting for turbine characteristics and siting. *J. Geophys.* 115, D09101.

Carrasco, J. y González, M. (2007) *Climatología de la Península Antártica y de la base presidente Eduardo Frei Montalva*, Dirección Meteorológica De Chile.

Carrasco, J. F., D. H. Bromwich, and A. J. Monaghan (2003) Distribution and characteristics of mesoscale cyclones in the Antarctic: Ross Sea eastward to the Weddell Sea, *Mon. Weather Rev.*, 131, 289– 301.

Fogt, R. L., A. J. Wovrosh, R. A. Langen, and I. Simmonds (2012a) The characteristic variability and connection to the underlying synoptic activity of the Amundsen-Bellingshausen Seas Low, *J. Geophys. Res.*, 117.

Gillett, N. P., and D. W. J. Thompson (2003) Simulation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 302, 273–275.

Hosking, Scott & Orr, Andrew & Marshall, Gareth & Turner, John & Phillips, Tony (2013) The Influence of the Amundsen-Bellingshausen Seas Low on the Climate of West Antarctica and Its Representation in Coupled Climate Model Simulations. *Journal of Climate*.

King, J. C., and J. Turner (1997) *Antarctic Meteorology and Climatology*, 409 pp., Cambridge Univ. Press, New York.

King, J. & Turner, John & Marshall, Gareth & Connolley, W. & Lachlan-Cope, Tom. (2003). Antarctic Peninsula climate variability and its causes as revealed by instrumental records. *Antarctic research series volume 79*, pages 17-30.

Kirchgäßner, A. (2010) An analysis of cloud observations from Vernadsky, Antarctica, *Int. J. Climatol.*, 30(10), 1431– 1439.

Lachlan-Cope TA, Connolley WM, Turner J. (2001) The role of the non-axisymmetric antarctic orography in forcing the observed pattern of variability of the Antarctic climate. *Geophys Res Lett* 28:4111–4114.

Lipzig, Nicole & Marshall, Gareth & Orr, Andrew & King, John (2008) The Relationship between the Southern Hemisphere Annular Mode and Antarctic Peninsula Summer Temperatures: Analysis of a High-Resolution Model Climatology. *Journal of Climate*. 21. 1649.

Listowski, C., Delanoë, J., Kirchgassner, A., Lachlan-Cope, T., and King, J. (2019) Antarctic clouds, supercooled liquid water and mixed phase, investigated with DARDAR: geographical and seasonal variations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 6771–6808.

Marshall, G. J. (2003) Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Climate*, 16, 4134-4143.

Rasmussen, E. (1985) "A case study of a polar low development over the Barents Sea", *Tellus*, 37A, 407–418.

Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica

Simmonds, I., K. Keay, and E. Lim (2003) Synoptic activity in the seas around Antarctica, Mon. Weather Rev., 131, 272– 288

Turner J., Marshall G.J., Lachlan-Cope T.A. (1998) Analysis of synoptic-scale low pressure systems within the Antarctic Peninsula sector of the circumpolar trough. International Journal of Climatology 18: 253-280.

Turner, J., Chenoli, S.N., Samah, A.A., Marshall, G., Philips, T., Orr, A. (2009) Strong wind events in the Antarctic. J. Geophys. 114, D18103.

Thompson, D. W. J., and S. Solomon (2002) Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. Science, 296, 895–899.

van den Broeke, M. R. (2000) The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 3: The role of near-surface wind speed and cloudiness, Int. J. Climatol., 20, 117– 130.

Yu, Lejiang, Zhong, Shiyuan, Sun, Bo (2020) The Climatology and Trend of Surface Wind Speed over Antarctica and the Southern Ocean and the Implication to Wind Energy Application. Atmosphere 11, no. 1: 108.