



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



PEDECIBA
Geociencias

Facultad de Ciencias, Universidad de la República
Instituto de Física, Departamento Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos
PEDECIBA Geociencias
Tesis de Maestría

**CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN CLIMÁTICO DE LA ISLA REY
JORGE (ISLAS SHETLAND DEL SUR, ANTÁRTIDA)**

FLORENCIA BALAY D'AGOSTO
Orientadora: Dra. Madeleine Renom

Montevideo, Uruguay

2023

AGRADECIMIENTOS

A mi orientadora, Madeleine Renom, por haberse embarcado en la paciente tarea de acompañar y orientar a una bióloga hacia el área de las ciencias de la atmósfera. Gracias por todo lo enseñado, por no haber desistido y por impulsarme siempre hacia adelante.

A las instituciones Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y Comisión Académica de Posgrado (CAP) por el apoyo económico brindado para poder realizar este trabajo. Al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) por los datos brindados para la realización de esta tesis. Al Instituto Antártico Uruguayo (IAU), y en particular a mis compañerxs de la DICGA, por haberme permitido conocer de primera mano el funcionamiento del Sistema del Tratado Antártico y la necesidad de sostener una cooperación científica internacional.

Al programa de posgrado PEDECIBA Geociencias, y en particular a Analía Fein por su apoyo incondicional y por poder resolver cualquier problema en cualquier momento, siempre con la mejor amabilidad y disposición.

A los integrantes del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos, quienes desde el primer momento me transmitieron equipo y compañerismo, siempre con buena onda. En particular a Santiago de Mello, quien colaboró sustancialmente dándome tremenda mano con RStudio.

A mi familia, por el apoyo incondicional de siempre. Sin ese motor no sería lo que soy ni estaría donde estoy. A mis amigxs, quienes acompañan siempre, quienes son sostén, compañía y felicidad compartida. Y a Santi, mi compañero de ruta, mi dos en todas las locuras. Gracias por ser apoyo y contención, y por sobre todo compañero. Gracias por la infinita paciencia y por haberme ayudado a culminar esta etapa.

A todxs, gracias!

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
ÍNDICE DE CONTENIDO	2
RESUMEN	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Tratado Antártico: hacia una co-gobernanza	5
1.2 Uruguay en la Antártida	6
1.3 Meteorología en el Área del Tratado Antártico	7
1.4 Antecedentes de estudios climatológicos de la Isla Rey Jorge	10
1.5 Antecedentes de eventos cálidos extremos en la Antártida	11
1.6 Objetivo general	14
1.7 Objetivos específicos	14
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA ISLA REY JORGE	15
2.1 Características geográficas	15
2.2 Estaciones antárticas	18
2.3 Características climáticas generales	19
2.4 Descripción de la circulación atmosférica en la región antártica	21
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS	25
3.1 Datos observados	25
3.2 Control de calidad	26
3.2.1 Homogeneización de los horarios	28
3.2.2 Revisión de secuenciación	28
3.2.3 Revisión de datos faltantes (NAs)	30
3.2.4 Detección de valores fuera de rango (outliers)	35
3.2.5 Comprobación de consistencia temporal	37
3.3 Control de consistencia espacial	41
3.3.1 Modelo de regresión lineal	44
3.3.2 Correlación	45
3.4 Análisis de datos faltantes	48
3.5 Datos de modelos de circulación global y productos satelitales	48
CAPÍTULO 4. CLIMATOLOGÍA DE LA ISLA REY JORGE	50
4.1 Presión atmosférica	51
4.2 Temperatura	61

CAPÍTULO 5. EVENTOS CÁLIDOS	72
5.1 Metodología y Definición	72
5.2 Percentiles	73
5.3 Eventos Cálidos (EC) y Cálidos Extremos (ECE)	76
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE EVENTOS CÁLIDOS EXTREMOS	91
6.1 Eventos Cálidos Extremos	91
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	111
Anexo I. Productos del control de calidad de los datos	111
Anexo II. Eventos Cálidos (EC)	120
Anexo III. Eventos Cálidos Extremos (ECE)	122
Anexo IV. Distribución anual de todos los Eventos Cálidos y Cálidos Extremos	124

RESUMEN

La Antártida es un continente muy particular, no sólo por sus características geográficas, físicas y biológicas, sino porque además es un continente co-gobernado en conjunto entre varias naciones, mediante consulta y consenso, y regulada por un acuerdo internacional que establece que el continente sea dedicado exclusivamente a la paz y la ciencia. La cooperación científica adquiere un rol importante y la actividad científica antártica un carácter esencial para poder ser miembro del Tratado Antártico. En este contexto, este trabajo constituye la primera tesis de Uruguay que aborda la climatología en la región antártica con datos provenientes de la Base uruguaya, y pretende generar un aporte a la ciencia antártica en general así como a la actividad científica que el país desarrolla en el Área del Tratado Antártico. Se procesaron y analizaron series temporales de datos meteorológicos provistos por INUMET, y se construyó una base de datos horaria de calidad para el período 01/01/1998 al 11/12/2016 de las variables temperatura y presión en superficie, tras la creación y aplicación de una exhaustiva metodología que incluyó una revisión de secuenciación y de datos faltantes, una comprobación de rango de valores y una comprobación de consistencia espacial, interpolando los datos con otras 2 estaciones antárticas cercanas (FREI y KOREA). Ambas variables presentaron un ciclo anual con una marcada variabilidad interanual y estacional, siendo la época fría la de mayor variabilidad y mayores anomalías, tanto positivas como negativas. No se encontró una tendencia significativa para la temperatura media mensual. Se realizó un estudio de eventos cálidos de temperatura en 3 puntos de la Isla Rey Jorge, definiendo eventos cálidos (EC) y eventos cálidos extremos (ECE) como aquellos en los que la temperatura media diaria estuviera por encima del percentil 90 y 99 respectivamente, durante al menos 3 días consecutivos. Se encontró una alta frecuencia de ocurrencia (todos los años excepto el 2015) mayoritariamente en la época fría del año, y con una gran variabilidad interanual. A su vez, se encontró que ciertas dinámicas atmosféricas favorecen la generación de estos eventos cálidos extremos, y que su ocurrencia es mayor durante años Niña. Si bien la mayoría de los ECE ocurrieron durante fases positivas del SAM, las correlaciones estadísticas no fueron significativas.

Palabras clave: Antártida, Isla Rey Jorge, variabilidad climática, presión, temperatura, eventos cálidos.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 Tratado Antártico: hacia una co-gobernanza

La Antártida presenta ciertas particularidades que hacen al continente un lugar inusual. Es el quinto continente más grande del mundo, y el único que es co-gobernado en conjunto entre diferentes naciones. Esta gobernanza es regida por un acuerdo internacional y gestionada por un conjunto de principios rectores que conforman el Sistema del Tratado Antártico (ATS, del inglés *Antarctic Treaty System*), el cual está constituido por el Tratado Antártico (TA) y diversos convenios y protocolos subsidiarios (Dastidar & Persson 2005; Dudeney & Walton 2012).

El TA tuvo su origen en medio de un contexto bélico, tras la finalización de la Segunda Guerra Mundial y el comienzo de la Guerra Fría, momento en el que se intensificaron los reclamos de soberanía territorial del continente antártico que habían comenzado a principios del siglo XX. A su vez, desde la comunidad científica se impulsó un aumento en la investigación polar, considerando que el último año polar internacional había sido celebrado en 1930. Fue así como se gestó el Año Geofísico Internacional (IGY, del inglés *International Geophysical Year*) que tuvo lugar entre 1957 y 1958, y en el cual participaron científicos de 12 naciones (Rebollo Márquez 2019) (Argentina, Australia, Bélgica, Chile, Estados Unidos, Francia, Japón, Noruega, Nueva Zelanda, Reino Unido, Sudáfrica y la Unión Soviética). El éxito de este IGY llevó a las naciones a acordar, mediante negociaciones, la importancia de mantener una cooperación científica de forma indefinida en dicho continente (British Antarctic Survey [BAS], 1999). Este acuerdo, el Tratado Antártico, fue firmado por estas 12 naciones en Washington D.C. el 1ero de diciembre de 1959, y entró en vigor el 23 de junio de 1961. Desde entonces ha sido aceptado por muchas otras naciones, siendo actualmente 55 las Partes que lo conforman, divididas en 29 Partes Consultivas (con voz y voto en la toma de decisiones) y 26 Partes No Consultivas (países adheridos pero sin participación en la toma de decisiones) (Dudeney & Walton 2012).

El Tratado aplica a toda el área ubicada al sur de los 60°S, denominada Área del Tratado Antártico (Fig. 1), y establece, entre otras cosas, que el continente sea dedicado exclusivamente a la paz y la ciencia (Dastidar & Persson 2005), prohibiendo la militarización en el territorio. A su vez promueve la protección ambiental, y congela las reclamaciones territoriales (Dudeney & Walton 2012). Esto convierte al TA en uno de los acuerdos internacionales más exitosos, puesto que establece una gobernanza en conjunto que exige una consulta y consenso entre las Partes sobre los usos de todo un continente y el océano circundante (BAS, s.f.). Además, el TA le ha otorgado a la actividad científica una doble función: la de avanzar en la generación de nuevos conocimientos y la de constituir un mecanismo de inclusión/exclusión, puesto que para

ser miembro del TA y participar activamente en la gestión del continente, es requisito realizar y sostener la actividad científica (Elzinga 2011).

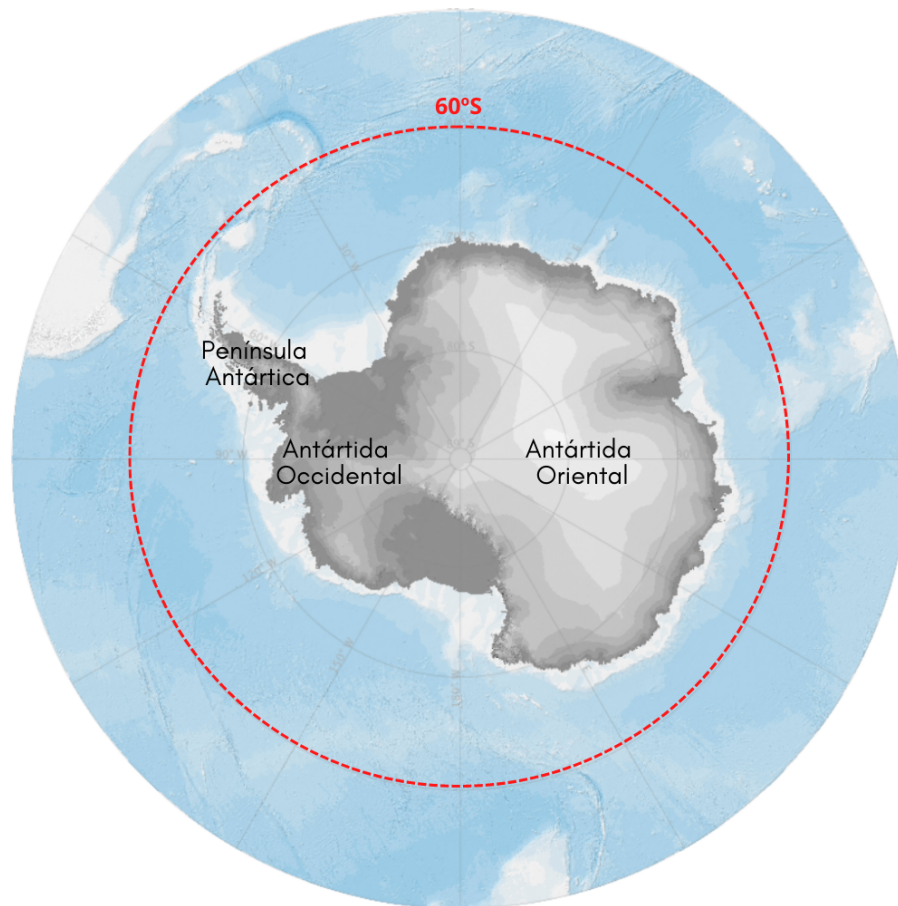


Figura 1. Mapa del continente antártico, con sus grandes regiones: Antártida Oriental, Antártida Occidental y Península Antártica. La línea punteada roja marca la ubicación del paralelo 60°S, delimitando el Área del Tratado Antártico. Imagen obtenida del Antarctic Digital Database (ADD) del Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) (<https://www.add.scar.org/>).

1.2 Uruguay en la Antártida

Uruguay forma parte del TA desde el 11 de enero de 1980, momento en el que fue aceptado como miembro No Consultivo dejando constancia del interés del país por la actividad antártica. En diciembre de 1984 fue instalada la Base Científica Antártica Artigas (BCAA) en la Península Fildes de la Isla Rey Jorge, otorgando una presencia permanente de Uruguay en la Antártida. El 7 de octubre de 1985 Uruguay fue aceptado como miembro Consultivo del TA, pudiendo desde ese entonces participar activamente en la toma de decisiones en las Reuniones Consultivas del Tratado Antártico que son realizadas de forma anual. Finalmente, el 8 de diciembre de 1997 Uruguay adquirió una nueva estación antártica, ubicada al sureste de la Bahía Esperanza en la Península Antártica (PA). Dicha estación fue donada por el Reino Unido y renombrada como “Estación Científica Antártica Teniente de Navío Ruperto Elichiribehety” (ECARE) y tuvo

su primera campaña antártica ese mismo verano (Council of Managers of National Antarctic Programs [COMNAP] 2017). Dadas las limitaciones logísticas que implica su acceso, es una estación que no está activa durante el invierno y que tampoco presenta actividad científica todos los veranos, si bien se utiliza esporádicamente para el desarrollo de ciencia en el continente antártico.

Desde entonces, el verano austral se ha transformado en un momento de gran actividad científica antártica para Uruguay, con la creación de las denominadas Campañas Antárticas de Verano en las que varios científicos, nacionales y extranjeros, viajan al Área del Tratado Antártico a desarrollar actividad científica. Actualmente son aproximadamente 15 los proyectos que participan por verano, y que abarcan las áreas de Geociencias, Ciencias de la vida, Ciencias sociales y humanas, Ciencias Físicas y Monitoreo ambiental, por lo que se prevé que este trabajo sea de utilidad para diversas áreas científicas.

1.3 Meteorología en el Área del Tratado Antártico

Tal como fue mencionado, el Año Geofísico Internacional marcó un punto de referencia definitivo en la actividad científica antártica. La mayoría de los registros meteorológicos que existen sobre la Antártida comenzaron en dicho año junto con el establecimiento de las diferentes bases en la PA, limitándose el registro aproximadamente a la segunda mitad del siglo XX, lo cual es apenas suficiente para cuantificar la variabilidad y el cambio climático. Sin embargo, dichos registros proporcionan información importante sobre los controles climáticos de la región (principalmente aquella que está experimentando un rápido cambio ambiental) (King et al. 2003), y sirven para mejorar la comprensión de los procesos climáticos regionales, resultando de gran utilidad para la clasificación del régimen climático de la zona. Conociendo en detalle la variabilidad climática y su asociación con los diferentes factores que la determinan, es posible determinar con mayor exactitud cuál es o será la tendencia del cambio climático en dicha región.

La Antártida constituye un sitio privilegiado para estudiar fenómenos de escala global, reconstruir el pasado, estudiar sistemas biológicos relativamente poco modificados por la actividad humana, y comprender los potenciales impactos de los cambios introducidos por estas actividades en el sistema terrestre. La exploración científica de la Antártida es un esfuerzo internacional, abordado y desarrollado de forma conjunta por los países miembros del TA (Instituto Antártico Uruguayo [IAU], s.f.). Es por ello que fue establecido en el Art. III del TA que sean puestas a libre disposición las observaciones y resultados científicos generados sobre la Antártida, con el fin de promover la cooperación científica internacional y contribuir a los programas antárticos nacionales.

A finales de la década de 1990, el Comité Científico de Investigación Antártica (SCAR, del inglés *Scientific Committee on Antarctic Research*) creó el proyecto READER

(*Reference Antarctic Data for Environmental Research*) cuyo objetivo fue crear una base de datos meteorológicos de alta calidad y de largo plazo a partir de estaciones meteorológicas automáticas y de las estaciones con personal permanente durante todo el año en la Antártida (Turner et al. 2019). Este conjunto de datos consiste en parámetros meteorológicos medios mensuales (temperatura en superficie y niveles altos de la atmósfera, presión media del nivel del mar y velocidad del viento en la superficie, altura geopotencial y velocidad del viento a niveles estándar) (Scientific Committee on Antarctic Research [SCAR], s.f.) obtenidos de datos sinópticos de 6 horas que fueron pasados por un control de calidad para evitar errores y datos faltantes (Turner et al. 2004).

Las observaciones meteorológicas de la Antártida han sido escasas, relativamente cortas y limitadas principalmente a las regiones costeras hasta mediados de la década de 1950. El Año Geofísico Internacional generó un avance significativo en la colección de observaciones *in situ*, con el establecimiento de 60 estaciones antárticas de 12 países, donde comenzaron a registrarse de forma continua y rutinaria diversos parámetros meteorológicos. Dicho avance tuvo un impulso mayor una década después, cuando en 1967 se volvieron operacionales los satélites de órbita polar (King & Turner 1997). Desde entonces, el aumento en los registros meteorológicos de la Antártida ha sugerido que tanto la PA como la Antártida Occidental han experimentado cambios climáticos drásticos (Monaghan et al. 2008; Fogt et al. 2011), siendo la PA la región donde se ha observado el mayor grado de variabilidad climática (King 1994; King et al. 2003), evidenciando las mayores tendencias al calentamiento de todo el continente (Ferron et al. 2004, Clem et al. 2016; Tetzner et al. 2019).

El avance en el registro de parámetros meteorológicos, sumado a la creciente preocupación por el rápido cambio climático evidenciado durante el siglo XX (Swanson et al. 2009), han impulsado diferentes análisis de la temperatura en la región. Uno de los primeros trabajos fue el de Raper et al. (1984), en el que realizaron un análisis de datos de temperatura superficial del aire de 16 estaciones meteorológicas de toda la Antártida entre el período 1957-1982. En él reportaron una tendencia de calentamiento lineal positiva y global de 0.029°C por año, proviniendo la mayor contribución a dicha tendencia de las estaciones de la PA (Raper et al. 1984; Ferron et al. 2004; Turner et al. 2004; Turner et al. 2005). Posteriormente, Jones (1995) actualizó la serie creada por Raper et al. (1984) y trabajó con series casi completas de temperaturas medias mensuales para el período 1957-1994, examinando las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas de 16 estaciones del continente antártico (además de 11 estaciones en islas antárticas y subantárticas). A pesar de que pocas estaciones mostraron tener tendencias significativas debido a la gran variabilidad interanual, el mayor calentamiento se evidenció sobre la PA (principalmente en invierno), la cual registró un aumento de temperaturas de 0.57°C durante el período 1957-1994 para toda la Antártida, que fue estadísticamente significativo al nivel del 5% (Jones 1995; Turner et al. 2004). En 2002, Doran et al. realizaron una recopilación de temperaturas antárticas continentales de 35 años (1966-2000) y analizaron los registros de 14 años

(1986-2000) de estaciones meteorológicas automáticas situadas al sur de la Antártida Occidental (próximo al Mar de Ross). Allí detectaron un enfriamiento a escala anual de 0.78°C por década en el período 1986-2000. Sin embargo, en el análisis estacional observaron que el enfriamiento es más marcado durante verano (DEF) y otoño (MAM), mientras que el invierno (JJA) y primavera (SON) muestran un leve calentamiento (Doran et al. 2002; Turner et al. 2005).

Sin embargo, Turner et al. (2002) sostienen que todos los estudios anteriores han afirmado tendencias para todo el continente a partir de extrapolaciones inapropiadas de grandes áreas (la totalidad del continente) con un número limitado de conjuntos de datos climáticos antárticos. Sostienen además que intentar obtener una tendencia de la temperatura para todo el continente antártico carece de sentido ya que, además de que grandes zonas carecen de mediciones climáticas *in situ* a largo plazo, no tiene en cuenta la naturaleza altamente localizada de los factores que influyen en el clima en muchas de las estaciones (Turner et al. 2002). Esto pone de manifiesto uno de los principales problemas a la hora de examinar los cambios climáticos en la Antártida, y es la falta de un conjunto de datos coherente de observaciones meteorológicas (Turner et al. 2004). La disponibilidad de datos meteorológicos antárticos *in situ* ha sido, incluso en los mejores momentos, escasa (Jones 1995), y esto es debido a varios factores, entre ellos el relativamente reciente establecimiento de estaciones, la poca cantidad de observaciones en relación a la inmensidad del continente, el cierre temporal o definitivo de estaciones o incluso problemas de disponibilidad de datos (Turner et al. 2004). Esto sugiere entonces que el análisis de datos para la búsqueda de tendencias de variabilidad climática debería ser por regiones y no a nivel de todo el continente.

Turner et al. (2005) analizaron la variabilidad temporal y el cambio de algunos parámetros meteorológicos clave (temperatura media mensual, presión media al nivel del mar y velocidad del viento) durante el período 1951-2000 en 19 estaciones antárticas. Encontraron que 11 de ellas mostraron una tendencia de calentamiento, 7 una tendencia de enfriamiento, y 1 tenía muy pocos datos para permitir calcular una tendencia anual. Sin embargo sostienen que, de estas tendencias, únicamente 3 fueron estadísticamente significativas (2 de calentamiento y 1 de enfriamiento). La mayor parte de la PA (norte y oeste) mostró la mayor tendencia de calentamiento estadísticamente significativa, con 0.56°C por década durante todo el período, superando en varias veces el aumento de la temperatura media mundial (Turner et al. 2005; Monaghan et al. 2008). Esto indica la complejidad espacial del cambio que ha experimentado la Antártida en las últimas décadas: el rápido calentamiento se ha producido en la PA, que destaca como una región clara y consistente de cambio rápido, mientras que las condiciones han sido mucho más variables en otros sectores. Según Simões et al. (2015), la PA occidental ha experimentado uno de los calentamientos atmosféricos más importantes del planeta, evidenciando hasta 3.0°C en los últimos sesenta años.

Todo esto ha llevado a la costa occidental de la PA a ser objeto de numerosos estudios vinculados al cambio climático (Clem et al. 2016), debido básicamente a dos factores:

por un lado, es una zona de transición de la influencia subpolar a la polar, siendo una de las principales puertas de entrada al Océano Austral y al continente Antártico, y por otro lado, es considerada un hotspot climático mundial y un laboratorio natural para identificar cambios en la dinámica océano-atmósfera-criosfera relacionada con los problemas del cambio climático (Kerr et al. 2018). Estos cambios podrían deberse a una serie de retroalimentaciones positivas producto de complejas interacciones entre la circulación atmosférica, los océanos y la criosfera (King & Turner 1997).

1.4 Antecedentes de estudios climatológicos de la Isla Rey Jorge

Varios estudios se han focalizado en analizar los cambios de temperatura del aire y presión atmosférica en la Isla Rey Jorge (*King George Island, KGI*). King (1994) analizó la temperatura del aire en 5 estaciones de la PA durante el período 1947-1990 con la finalidad de investigar los posibles mecanismos que provocan la mayor variabilidad interanual que ha sido registrada en la PA en comparación a otros lugares del continente antártico. Allí encontró que las Islas Shetland del Sur se correlacionan mejor con las Islas Orcadas del Sur que con las estaciones más meridionales de la PA, sugiriendo que el clima de dicho archipiélago está más fuertemente influenciado por los eventos en el área del Pasaje de Drake que las condiciones más al sur, y que la variabilidad en la advección de masas de aire cálido ejerce un importante control sobre el clima, impulsando variaciones en la temperatura superficial del aire (King 1994).

Ferron et al. (2004) analizaron una serie temporal de temperaturas medias anuales y estacionales para la Isla Rey Jorge en el período 1947-1995, combinando datos de diferentes estaciones, y en él observaron una tendencia de calentamiento de 0.022°C por año para dicho período, lo que representa un aumento de la temperatura media del aire de 1.1°C en un total de 49 años. Vieron también que el calentamiento se produjo principalmente (más del 90%) durante el período 1947 a 1979, y a su vez, que la tendencia estacional más pronunciada se produjo en el invierno (2 veces más fuerte que en las demás estaciones). Adjudicaron dicho calentamiento al aumento ocurrido desde la década de 1950 de las advecciones de masas de aire cálido desde el norte, tal como había demostrado King (1994) (Ferron et al. 2004).

Kejna et al. (2013) analizaron una serie temporal que abarcó el período 1948 a 2011 para estaciones de las Islas Shetland del Sur, incluyendo 3 estaciones de Isla Rey Jorge, donde constataron un aumento estadísticamente significativo de la temperatura del aire (0.19°C por década, 1.2°C para el período total) y una disminución de la presión atmosférica (0.36 hPa por década, 2.3 hPa para el período), así como una correlación de dichos cambios con cambios en las temperaturas superficiales del océano y la concentración de hielo marino. Determinaron también, al igual que Ferron et al. (2004), que en invierno el calentamiento es más del doble que en verano, lo que se traduce en una disminución de la amplitud del ciclo anual de la temperatura del aire (Kejna et al. 2013).

Stastna (2010) realizó un análisis espacio-temporal detallado de una serie temporal de temperatura del aire para el período 1950-2003 de 8 estaciones de la región norte de la PA y las Islas Shetland del Sur, incluyendo entre ellas 2 estaciones de la Isla Rey Jorge: Bellingshausen (estación rusa) y Presidente Eduardo Frei (estación chilena). Tras realizar análisis anuales, estacionales y mensuales, encontró que en la isla las tendencias son principalmente de calentamiento (tendencia anual de 0.3°C por década para el período 1971-2000), y que la serie se constituye de una alternancia entre períodos más fríos y más cálidos. Al igual que los estudios previos, encontró un calentamiento más pronunciado durante los meses de invierno u otoño, con un calentamiento relativamente menor durante los meses de primavera y verano (Stastna 2010).

Da Rosa et al. (2014) investigaron la relación entre la temperatura media anual del aire en superficie y el grado de retracción de los glaciares en la bahía del Almirantazgo, situada en la parte central de la Isla Rey Jorge, durante el período 1960-2010. Los resultados revelaron un marcado aumento de la temperatura media anual del aire en superficie durante el período, con una tendencia de calentamiento de 0.23°C por década (Da Rosa et al. 2014).

Finalmente, Turner et al. (2019) realizaron un análisis de las temperaturas medias mensuales del aire para un total de 17 estaciones antárticas a lo largo del Área del Tratado Antártico, considerando también la concentración de hielo marino y el forzamiento de los océanos tropicales, con la finalidad de comprender mejor la variabilidad y el cambio de la circulación atmosférica para el período 1979-2018. Para ello obtuvieron datos de la base SCAR READER y utilizaron los campos del reanálisis ECMWF Interim (ERA-Interim). Los resultados mostraron que Bellingshausen (estación rusa ubicada en Isla Rey Jorge) tuvo la temperatura media anual más elevada, así como también la temperatura más alta en cada una de las cuatro estaciones, lo que posiblemente se deba a la ubicación más al norte, a la falta de hielo marino alrededor de la isla y a su exposición a vientos climatológicos relativamente cálidos del noroeste.

1.5 Antecedentes de eventos cálidos extremos en la Antártida

El informe del IPCC (Collins et al. 2019) deja en claro que uno de los impactos del cambio climático y del aumento de la temperatura global, es detectado en cambios en los eventos extremos.

Un evento extremo es un acontecimiento poco frecuente para un lugar y una época del año determinados (Collins et al. 2019). Los eventos extremos basados en métricas de una variable meteorológica presentan diferentes definiciones que suelen basarse en la determinación de umbrales relativos (por ejemplo, percentiles) o absolutos (por ejemplo, un determinado umbral), por encima/debajo de los cuales las condiciones se consideran extremas. A su vez, sus cambios pueden centrarse tanto en la frecuencia de ocurrencia así como en la intensidad y/o duración (Seneviratne et al. 2021). Uno de los eventos extremos asociados a la variable temperatura son las denominadas olas de

calor, consideradas como eventos de altas temperaturas respecto a la climatología local que perduran durante cierta cantidad de días, y que suelen estar asociadas a sistemas de “bloqueos” atmosféricos o anomalías de circulación anticiclónica cuasi estacionaria (Seneviratne et al. 2021; Chan et al. 2022). Es sabido ya que los patrones de circulación atmosférica a gran escala y la propia dinámica atmosférica son importantes impulsores de los extremos locales y regionales, y modulan su magnitud, frecuencia y duración (Seneviratne et al. 2021). Un bloqueo atmosférico puede tener diferentes configuraciones, amplitudes, duraciones, y no siempre da lugar a olas de calor, pero desempeña un papel crucial en la generación de eventos cálidos, puesto que impulsan una anómala y sostenida advección cálida (Chan et al. 2022).

Los episodios de calor extremo en la Antártida son particularmente importantes dado que si las altas temperaturas alcanzan el punto de fusión del hielo, pueden fundirlo (BAS 2022), con impactos tanto a corto como largo plazo. En el corto plazo, estas altas temperaturas derriten la nieve y el hielo de los glaciares generando agua de deshielo (Dierssen et al. 2002) y un aumento de la escorrentía con el consecuente arrastre de material orgánico particulado (MOP) de origen terrestre. Esta liberación de partículas en el medio marino, genera un aumento de la turbidez de la columna de agua (Dierssen et al. 2002; Venturini et al. 2020), lo que aumenta también la tasa de sedimentación (Venturini et al. 2020; Bers et al. 2012). Esta turbidez tiende a disminuir la producción primaria neta de las aguas antárticas superficiales al restringir localmente el ingreso de radiación solar a la columna de agua (Dierssen et al. 2002; Meredith et al. 2018; Neder et al. 2022), generando a su vez importantes consecuencias en los subsidios de recursos, la estructura y la dinámica de los ecosistemas marinos costeros. A su vez, la descarga de agua de deshielo genera un aumento en la estratificación de la columna de agua, dado que el agua de deshielo es agua dulce y por lo tanto menos densa que la oceánica (Venturini et al. 2020).

Si la temperatura del aire en la Península Antártica continúa aumentando y si estos eventos se sostienen en el tiempo, aumentaría el potencial de deshielo a gran escala de los glaciares (Dierssen et al. 2002), y su consecuente retroceso (Neder et al. 2022). Nuevas zonas libres de hielo quedarían al descubierto, pudiendo erosionarse grandes cantidades de material terrígeno desde la tierra hacia el mar. A su vez, la descarga de agua de deshielo sostenida a largo plazo, generaría un aumento del nivel del mar por el incremento de los presupuestos de agua dulce. Además, la materia orgánica marina presenta un mayor valor nutritivo que la terrestre, por lo que un sostenido aumento en los aportes de agua de deshielo al mar (y por consiguiente aporte de materia orgánica terrestre), es previsible que afecte a los consumidores tróficos superiores y por consiguiente a las redes tróficas de las regiones costeras de la Antártida (Venturini et al. 2020).

Estudios como el de Meredith et al. (2018) y Neder et al. (2022) mostraron que la descarga de agua de deshielo presenta una compleja variabilidad temporal, variando en escalas cortas de tiempo con fluctuaciones diarias e incluso horarias, como respuesta a escenarios climáticos rápidamente cambiantes (por ejemplo, días cálidos

con sol intenso frente a días fríos). Esta variabilidad depende en gran medida de la temperatura atmosférica y de la direccionalidad de los vientos (Meredith et al. 2018), y es máxima durante el “período efectivo del glaciar” (cuando los canales de agua de deshielo están bien formados y la descarga de agua de deshielo es proporcional a la temperatura atmosférica (Venturini et al. 2020)). Resulta entonces de gran importancia conocer las temperaturas extremas y la ocurrencia de los eventos cálidos en esta región, puesto que éstos pueden intensificar los eventos de descarga de agua de deshielo, especialmente si los mismos ocurren durante la estación de derretimiento.

Si bien puede considerarse un tanto ilógico mencionar o hablar de olas de calor en las regiones polares como la Antártida, estos eventos ocurren con variada duración e intensidad. En el Ártico, por ejemplo, los episodios de calor extremo han aumentado desde 1979, con un aumento en la cantidad de días y noches cálidas durante el invierno del período 1979-2015 (Seneviratne et al. 2021). En la Antártida también se han registrado varios eventos extremos en los últimos años. El 24 de marzo de 2015 se produjo un extremo de alta temperatura de 17.5°C en el extremo norte de la PA, en la base argentina Esperanza, habiendo ocurrido al día siguiente de registrar 17.4°C en la base argentina Marambio, a unos 100 kilómetros al sureste de Esperanza. Dicho evento ocurrió durante un período de advección de aire cálido con una anomalía de circulación del noroeste, y fue hasta ese momento la temperatura más alta registrada para el continente antártico (Skansi et al. 2017). Posteriormente, a lo largo del verano 2019/2020 se registraron altas temperaturas anómalas en toda la Antártida, lo que provocó el derretimiento del hielo y la exposición de nuevas zonas libres de hielo. A principios de febrero del 2020 se observó un nuevo récord histórico de temperatura sobre la PA y las islas circundantes, que experimentaron una de las mayores olas de calor y con una amplia extensión espacial. La misma se extendió por toda la región durante 6 días (6 al 11 de febrero), registrándose la temperatura de 18.3°C el 6 de febrero en la estación Esperanza, lo que significó una anomalía de 8°C, casi 1°C más caliente que el anterior récord de 17.5°C. El evento estuvo asociado a patrones de circulación anómalos, siendo desencadenado por un sistema de alta presión casi estacionario en el Pasaje de Drake que generó una advección de aire cálido y húmedo desde el Océano Pacífico hasta la región de la PA (González-Herrero et al. 2022). De este modo, la Organización Meteorológica Mundial lo declaró como el nuevo récord de temperatura máxima para la Antártida. Tres días después, el récord fue superado por la temperatura extrema de 20.75°C alcanzada en la base Marambio, en la isla Seymour, frente al lado oriental de la PA. El último y más reciente fue el evento extremo ocurrido el 18 de marzo del 2022, donde la temperatura en el Domo C de la meseta antártica (Antártida Oriental) alcanzó una temperatura récord de aproximadamente -10°C, lo que supone una temperatura de casi 40°C por encima de lo normal para la época. Esta ola de calor sin precedentes que ocurrió en tan sólo tres días, se convirtió en uno de los mayores saltos de temperatura a corto plazo registrados (BAS 2022).

1.6 Objetivo general

Construir una climatología de la Península Fildes, Isla Rey Jorge, para el período comprendido entre 1998 y 2016. Analizar los eventos extremos cálidos diarios de temperatura y los patrones de circulación atmosférica asociados a los mismos.

1.7 Objetivos específicos

1. Generar una base de datos horaria confiable, que permita el análisis de eventos extremos, y que pueda ser posteriormente utilizada en futuras investigaciones.
2. Generar la climatología de las principales variables meteorológicas, para comprender y caracterizar el régimen climático de la isla.
3. Caracterizar los eventos extremos cálidos diarios ocurridos en Isla Rey Jorge, mediante el análisis de sus principales características estadísticas y de la circulación atmosférica asociada a los mismos.

CAPÍTULO 2.

CARACTERÍSTICAS DE LA ISLA REY JORGE

2.1 Características geográficas

La Isla Rey Jorge (IRJ), también conocida por Argentina como “Isla 25 de Mayo” y por Rusia como “Ostrov Waterloo”, es la mayor de las islas del archipiélago Shetland del Sur. Presenta una superficie aproximada de 1.310 km² y se ubica entre los 61°54' - 62°16'S y 57°35' - 59°02'W, a 120 km al nor-noroeste de la PA y separada de ésta por el Estrecho Bransfield (Kejna et al. 2013). Sus dimensiones son 95 km de largo y 25 km de ancho (Osmanoglu et al. 2013) y se encuentra separada de la Isla Nelson, al suroeste por el Estrecho de Fildes, de tan solo 370 m en su sector más angosto. Dicha isla tiene una superficie aproximada de 170 km², la cual se encuentra en su gran mayoría cubierta por una capa de hielo permanente, cuya elevación máxima alcanza los 320 m sobre el nivel del mar (Braun et al. 2017).

La isla IRJ cuenta con tres grandes bahías: bahía Maxwell (conocida también como bahía Fildes según Chile), de 19 km de largo ubicada al suroeste de la isla de forma abierta hacia el Estrecho de Bransfield frente a la Península Fildes; bahía Almirantazgo, de forma más irregular, se encuentra en la costa sur de la isla y tiene una boca de entrada de 8 km de ancho, extendiéndose luego hacia adentro a lo largo de 16 km; y la bahía Rey Jorge de 11 km de largo, en la costa sur-sureste de la isla (Fig. 2).



Figura 2. (A) Localización de la región de la PA dentro del continente antártico, (B) localización de la Isla Rey Jorge dentro del archipiélago Shetland del Sur frente a la PA, y (C) Isla Rey Jorge. Imágenes obtenidas de Google Earth Pro 7.3.3.7786 (64-bit).

Aproximadamente el 90% de la isla se encuentra permanentemente cubierta por un casquete de hielo que conforma cinco grandes domos (Rückamp et al. 2011). Los 3

predominantes se encuentran conectados a lo largo de la cresta principal de la isla (Simões et al. 1999; Petlicki et al. 2017). La mayor parte del perímetro del casquete de hielo termina en el Océano Austral en forma de grandes glaciares de salida de agua al mar tanto hacia el sur como hacia el norte de la isla (Macheret & Moskalevsky 1999; Moll & Braun 2006; Osmanoglu et al. 2013), siendo por lo menos 70 las cuencas de drenaje identificadas por Simões et al. (1999). La costa norte presenta varias cúpulas y desagües con pendientes suaves hacia el mar, mientras que la costa sur está formada por pendientes más pronunciadas y ensenadas o caletas en forma de fiordo con glaciares de marea con un frente marino (Rückamp et al. 2011; Osmanoglu et al. 2013), generando abruptas caídas de hielo que drenan la capa de hielo en bahías (Simões et al. 1999).

Las masas de hielo pueden presentarse en una gran variedad de formas (que dependen de la topografía y el clima circundante), y diversas características físicas internas (temperatura del hielo, grosor y flujo de agua subglacial). En base a eso, existen dos principales esquemas de clasificación, uno de ellos basado en la morfología (forma y geometría) de la masa de hielo, y el otro basado en sus características térmicas internas (Copland 2013). Esta segunda clasificación de los glaciares se basa en el punto de fusión por presión, es decir, la temperatura a la que el hielo se derrite a una presión determinada. El punto de fusión cambia con la presión, y a medida que la presión aumenta con la profundidad en un glaciar por el peso del hielo de arriba, el punto de fusión del hielo disminuye dentro de los límites. El conocimiento del régimen térmico de las masas de hielo es importante, ya que la temperatura determina en gran medida su comportamiento dinámico. En base a este tipo de clasificación, existen tres clases térmicas diferentes: templada, fría o politérmica, y las masas de hielo pueden presentar uno (o varios) de estos regímenes de temperatura (Da Rosa et al. 2014).

Estudios realizados en la isla han constatado que el casquete de hielo de la isla presenta un espesor medio de 250 m (Blindow et al. 2010; Braun et al. 2017), con un espesor máximo de 420 m y elevaciones que alcanzan los 720 m sobre el nivel del mar (Moll & Braun 2006; Rückamp et al. 2011; Rückamp & Blindow 2012; Petlicki et al. 2017). Dado su pequeño espesor y a su ubicación geográfica, este casquete de hielo ha sido clasificado como templado (Blindow et al. 2010; Rückamp et al. 2010; Rückamp & Blindow 2012; Simões et al. 2015), lo que significa que casi toda la extensión de hielo se encuentra cerca o en el punto de fusión bajo presión, siendo muy sensible a variables meteorológicas como temperatura superficial y precipitación (Da Rosa et al. 2014). Los principales valles de drenaje del casquete se ubican en el sureste, donde el casquete es más grueso (Blindow et al. 2010). Esta ubicación, a su vez, se corresponde con una de las regiones mundiales más sensibles a las variaciones climáticas (Da Rosa et al. 2014), y los glaciares de la Isla Rey Jorge han mostrado una rápida respuesta dinámica a los cambios ambientales registrados desde 1950 (Simões et al. 1999; Braun & Gossmann 2002; Rückamp et al. 2011). El trabajo de Simões et al.

(2015) señala que entre 1956 y 1995, la isla perdió el 7% (89 km²) del casquete de hielo, lo que se vio reflejado en los frentes de drenaje de 45 del total de 70 cuencas.

Sólo unos pocos glaciares, principalmente los más pequeños, terminan en tierra (Moll & Braun 2006). Uno de ellos es el Glaciar Collins, también conocido como Domo de Bellingshausen (Braun et al. 2017), un pequeño domo de hielo con 15 km² de área, un espesor medio de 65 m y 270 m de elevación máxima (ubicada en la región noreste del Domo) (Rückamp & Blindow 2012; Simões et al. 2015; Petsch et al. 2020). Si bien el mayor frente del glaciar es terrestre, presenta también una pequeña porción que se comporta como glaciar de marea. Su ubicación al norte de la Península Fildes (de 29 km²), la mayor zona libre de hielo de toda la isla (Petsch et al. 2020), hace que sea uno de los más estudiados de la isla, siendo a su vez de particular relevancia para Uruguay puesto que es a los pies de dicho glaciar donde se encuentra la Base Científica Antártica Artigas, sitio donde han sido recopilados los datos de INUMET. Petsch et al. (2020) han señalado un retroceso de dicho glaciar en los últimos 30 años como respuesta al aumento de las temperaturas medias anuales del aire y de las precipitaciones líquidas resultantes. Existen a su vez dos pequeños domos o campos de hielo (Simões et al. 1999), llamados Warszawa y Kraków con elevaciones de hasta 400 m que bordean la capa de hielo principal (Rückamp et al. 2011; Osmanoglu et al. 2013) (Fig. 3).

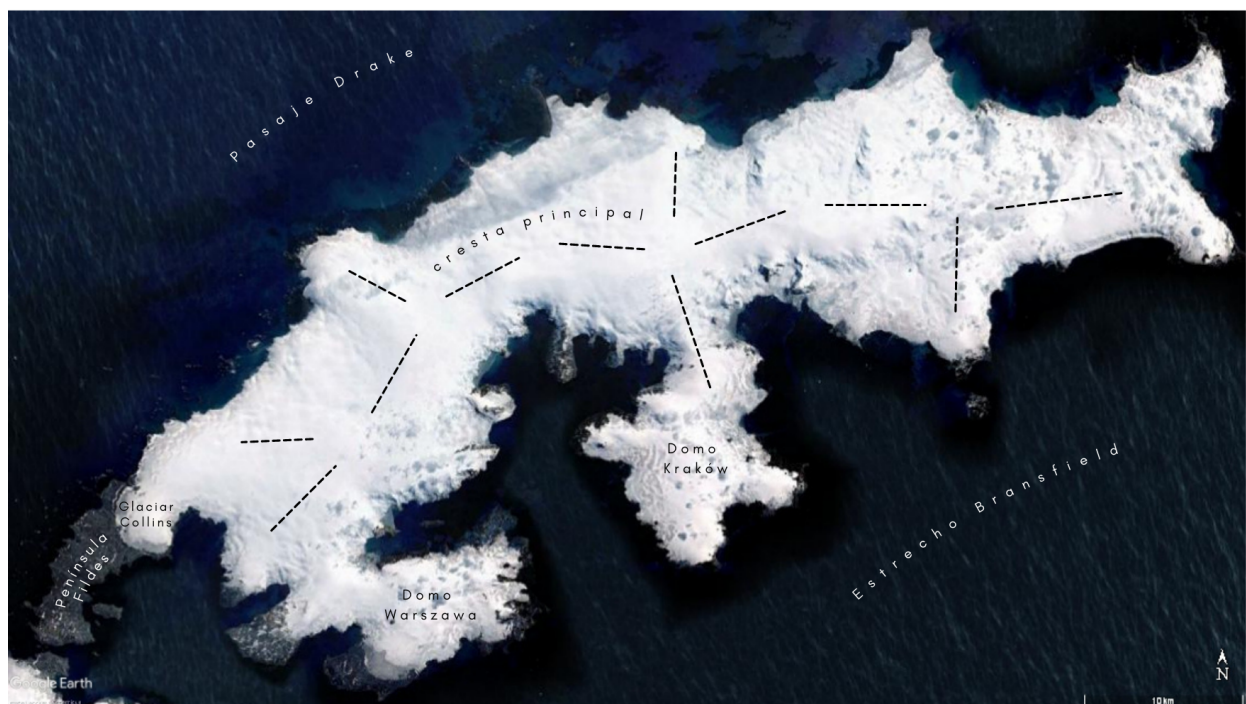


Figura 3. Casquete de hielo de Isla Rey Jorge. Se visualiza la cresta principal (línea punteada) que atraviesa la isla longitudinalmente, así como los pequeños y aislados domos Warszawa y Kraków. En el extremo suroeste de la isla se ubica el Glaciar Collins (Domo Bellingshausen) que se extiende hasta la Península Fildes. Imagen obtenida de Google Earth Pro 7.3.3.7786 (64-bit).

2.2 Estaciones antárticas

En la Isla Rey Jorge se han establecido varias estaciones de investigación, siendo al día de hoy un total de 9 países que tienen estaciones permanentes. Las mismas se detallan en la Tabla 1 (Ferron et al. 2004; Kejna et al. 2013) y su ubicación geográfica se visualiza en la Fig. 4.

Tabla 1. Estaciones antárticas permanentes establecidas al día de hoy en Isla Rey Jorge. Se detalla nombre completo, país, año de fundación, ubicación geográfica y código de identificación (generados para este trabajo como abreviación del nombre). Con asterisco se señalan las tres estaciones utilizadas para el presente estudio.

Código	Nombre de la estación	País	Fundación	Latitud (°S)	Longitud (°W)
BEL	Bellingshausen	Rusia	1968	62°11'47"	58°57'39"
* FREI	C.M.A. Eduardo Frei Montalva	Chile	1969	62°12'0"	58°57'51"
HA	Henryk Arctowski	Polonia	1977	62° 9'37"	58°28'24"
CF	Comandante Ferraz	Brasil	1983	62° 5'7"	58°23'29"
* BCAA	Base Científica Antártica Artigas	Uruguay	1985	62°11'4"	58°54'14"
CA	Carlini (Jubany hasta 2012)	Argentina	1985	62°14'18"	58°39'60"
GM	Gran Muralla	China	1985	62°12'59"	58°57'52"
* KS	King Sejong	Corea del Sur	1988	62°13'22"	58°47'14"
MP	Machu Picchu	Perú	1989	62° 5'29"	58°28'16"



Figura 4. Isla Rey Jorge y las estaciones antárticas de investigación allí presentes: GM (verde seco), FREI (fucsia), BEL (violeta), BCAA (naranja), KS (amarillo), CA (rojo), HA (celeste), MP (azul) y CF (verde oliva). Imagen obtenida de Google Earth Pro 7.3.3.7786 (64-bit).

2.3 Características climáticas generales

La literatura señala que la isla se encuentra bajo un régimen climático marítimo relativamente suave (Smith et al. 1996; Simões et al. 2015; Petsch et al. 2019), en el que el océano juega un importante control climático en la región, estando los cambios climáticos correlacionados con los cambios en las temperaturas superficiales del océano, así como con la variación de la concentración de hielo marino. La isla se encuentra dentro de los límites del rango de distribución de hielo marino que rodea la Antártida, estando libre de hielo en los meses de verano pero bajo su influencia en los meses de invierno (Kejna et al. 2013). En invierno, las masas de agua resultan estar más cálidas que las capas más bajas de la atmósfera, por lo que calientan la capa límite. Sin embargo, la ocurrencia de hielo marino en los meses fríos, reduce la influencia que el océano tiene sobre la atmósfera (Ferron et al. 2004).

Estudios previos como el de Ferron et al. (2004), con datos meteorológicos históricos de las estaciones Henryk Arctowski y Bellingshausen para el periodo 1947-1995, han determinado una temperatura media anual del aire en la Isla Rey Jorge de aproximadamente -2.8°C , variando entre -15.5°C y -1.0°C durante el invierno, y entre -1.3°C y 2.7°C durante el verano (Petsch et al. 2020).

La ubicación en latitudes subpolares de la Isla Rey Jorge limita la afluencia potencial de radiación solar. La duración media del día varía anualmente entre un poco más de 5 horas en el mes de junio hasta un máximo de 19 horas y media en el mes de diciembre (Kejna et al. 2013). A modo comparativo, se visualiza en la Fig. 5 la variación de horas

solares de Uruguay (ubicado en una menor latitud). Se observa que desde mediados de setiembre a mediados de marzo, el día solar es más largo en Rey Jorge que en Uruguay. Sin embargo, en el resto del año (mediados de marzo a mediados de setiembre), el día solar se vuelve significativamente más corto en la isla, con menos de 12 horas de luz por día. Incluso desde abril hasta mediados de agosto, el día solar en Rey Jorge sobrepasa el mínimo anual de Uruguay, de 10 horas luz. A su vez, la alta nubosidad dispersa gran parte de la radiación solar reduciendo la cantidad de radiación que llega a la superficie. Aún así, el balance anual de radiación solar es positivo (Kejna et al. 2013).

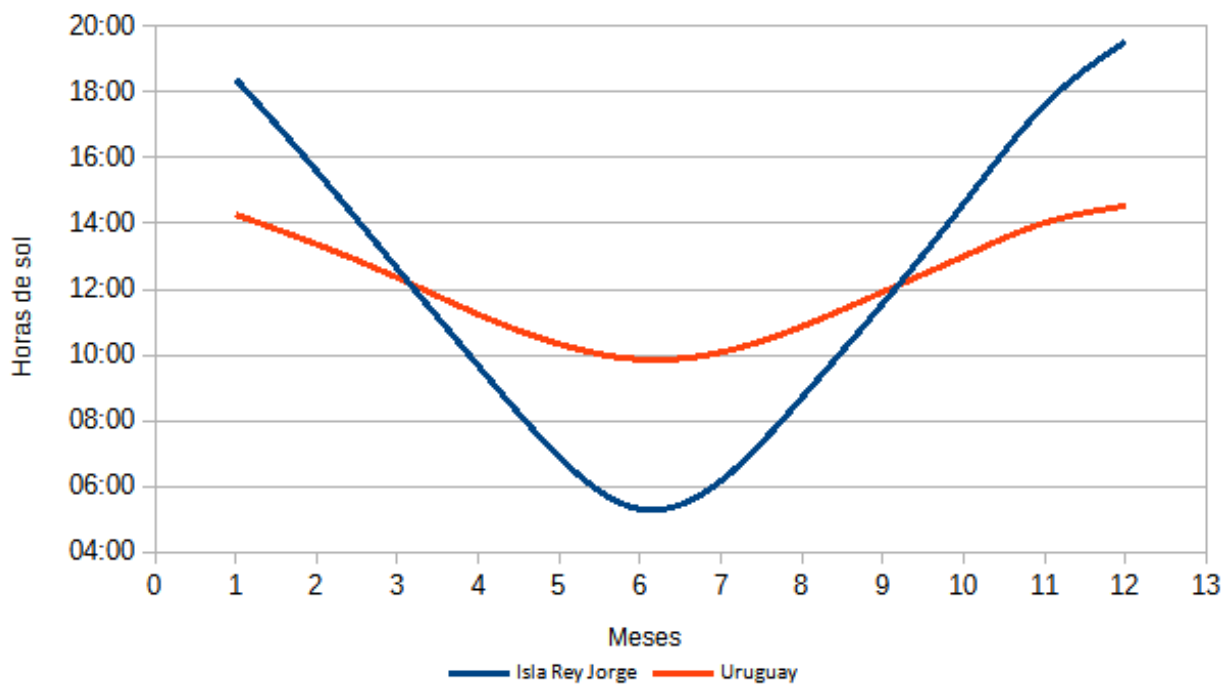


Figura 5. Variación anual en la duración media del día (horas de sol) para la Isla Rey Jorge (azul) y Uruguay (rojo). Datos obtenidos de: <https://www.datosmundial.com> (Uruguay) y <https://sunrise.maplogs.com> (Isla Rey Jorge).

En cuanto a la circulación a escala sinóptica, la isla se caracteriza por el frecuente pasaje de centros de baja presión (sistemas ciclónicos) que se desplazan de oeste a este a lo largo del Pasaje de Drake (Kejna et al. 2013; Petsch et al. 2020). Según la posición relativa de estos centros con respecto a la isla, podrán transportar aire relativamente cálido y húmedo, y traer fuertes vientos y precipitaciones (Ferron et al. 2004). Los vientos del noroeste y oeste a nivel medio suelen ser más frecuentes (principalmente en febrero), alcanzando mayores velocidades y trayendo precipitaciones, humedad relativa y nubosidad (Petsch et al. 2019). Además, la isla suele estar influenciada por el centro de baja presión que se forma en el lado occidental de la PA, llamado Baja del Mar de Amundsen. Esto convierte a la Isla Rey Jorge en una región de condiciones meteorológicas y climáticas muy cambiantes, con

importantes gradientes de presión atmosférica y una gran dinámica de la atmósfera. Finalmente, en lo que respecta a la precipitación, la isla se caracteriza por una significativa variabilidad interanual (Kejna et al. 2013).

2.4 Descripción de la circulación atmosférica en la región antártica

Circulación Media:

Cinturón de Bajas Presiones (SPL) y Baja del Mar de Amundsen (ASL)

En lo que respecta al campo de presión media sobre el nivel del mar, el mismo está dominado principalmente por el Cinturón de Bajas Presiones (SPL, del inglés *SubPolar Low*), también conocido como Depresión Circumpolar (van Lipzig et al. 2008; Hunt et al. 2016). Éste consiste en una franja circumpolar de bajas presiones superficiales ubicada a una latitud media de 66°S (King & Turner 1997) entre medio de dos áreas de mayor presión (King et al. 2003). Tal como se observa en la Fig. 6, la ubicación media del cinturón de bajas presiones (líneas de contorno color violeta) es alrededor del continente antártico y atravesando la PA (Romanova & Romanov 2020), lo que deja en evidencia que la presión media de la Isla Rey Jorge sea en torno a los 990 hPa.

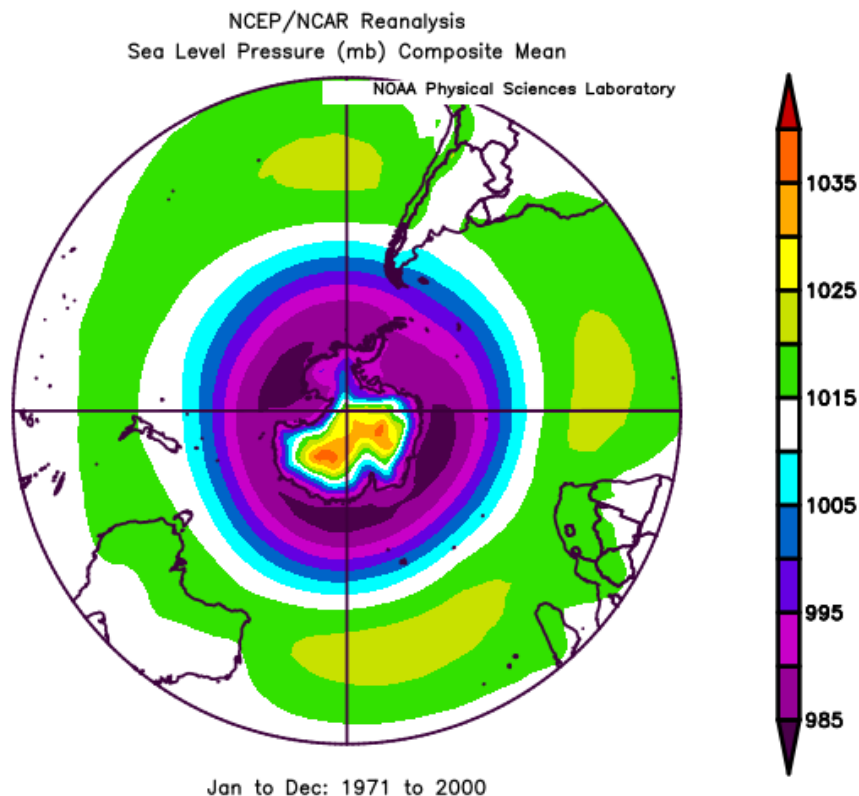


Figura 6. Presión media del nivel del mar (en hectoPascuales, hPa) promediada para el período Enero 1971 - Enero 2000 para el Hemisferio Sur. Contornos coloreados a intervalos de 5 hPa. Salida del reanálisis NCEP-NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996). Fuente: Physical Sciences Laboratory, NOAA (<https://psl.noaa.gov/>).

Sin embargo, el cinturón no se sitúa permanentemente en el mismo lugar, sino que se desplaza en función de la migración del sol, que genera un calentamiento diferencial en la superficie terrestre. De este modo, presenta una fluctuación estacional (Romanova & Romanov 2020), moviéndose aproximadamente 5° hacia el norte en junio/julio, y 5° hacia el sur en diciembre/enero, generando que en los meses fríos predominen presiones más altas en la isla, y en los meses cálidos presiones más bajas. También se observa que el cinturón no es totalmente continuo y simétrico zonalmente, sino que presenta tres centros semipermanentes de baja presión climatológica situados aproximadamente a los 20°E, 110°E y 130°W (Hunt et al. 2016) (visualizados en la Fig. 6 como las tres líneas de contorno de color violeta oscuro, delimitando centros de 980 a 985 hPa). El centro ubicado al oeste de la PA, en los mares de Bellingshausen y Amundsen, se llama Baja del Mar de Amundsen (ASL, del inglés *Amundsen Sea Low*) (Turner et al. 2013) y presenta un rol fundamental en la circulación atmosférica regional y en la variabilidad del clima en las proximidades de la PA (Clem et al. 2016). Su posición e intensidad modifica el campo de vientos meridionales locales (del Norte-Noroeste) (Raphael et al. 2016): cuando el ASL se intensifica, se fortalece el flujo del norte hacia la PA, lo que conduce al calentamiento y a la reducción del hielo marino a lo largo de la costa occidental de la PA (Clem et al. 2016).

Modos de variabilidad:

- **Modo Anular del Sur (SAM, del inglés *Southern Annular Mode*)**

A su vez, se ha visto que la intensidad (profundidad) y ubicación meridional del ASL es modulado significativamente por el Modo Anular del Sur (SAM, del inglés *Southern Annular Mode*). También conocido como la Oscilación Antártica (AAO, del inglés *Antarctic Oscillation*), es el principal modo de variabilidad en la circulación atmosférica del Hemisferio Sur en escalas de tiempo mensuales e interanuales (Marshall 2003; Lefebvre et al. 2004; Van Lipzig et al. 2008; Simões et al. 2009; Fogt et al. 2012; Turner et al. 2013; Nicolas & Bromwich 2014; Fogt & Marshall 2020), y sus cambios tienen un gran impacto en el clima de la PA (Marshall et al. 2006). Se caracteriza por presentar una estructura espacial de dipolo meridional (Gerber & Martineau 2018), cuyo estado medio se presenta de forma aproximadamente simétrica (o anular). Sin embargo, existen marcadas asimetrías en escalas temporales estacionales (Fogt et al. 2012), que tienen un profundo impacto en muchos aspectos de las condiciones atmosféricas y oceánicas de la Antártida y el Océano Austral (Turner et al. 2013), como la presión atmosférica sobre el nivel del mar y la intensidad de los vientos.

La fase positiva del SAM se asocia con anomalías negativas de presión del nivel del mar en la Antártida (Marshall 2007; Simões et al. 2009; Fogt et al. 2011; Fogt & Marshall 2020), una intensificación del ASL (Lefebvre et al. 2004; Fogt et al. 2011) y por ende una amplificación de los vientos meridionales locales intensificando los vientos de los oestes sobre la PA (Lefebvre et al. 2004; Van Lipzig et al. 2008; Fogt et al. 2012). Todo esto contribuye a un calentamiento sobre el noreste de la PA (Thompson &

Solomon 2002; Turner et al. 2005; Stammerjohn et al., 2008; Hunt et al. 2016). Por el contrario, la fase negativa del SAM se asocia con anomalías positivas de presión en la Antártida (Simões et al. 2009; Fogt et al. 2011; Clem et al. 2016), un debilitamiento del ASL y por consiguiente un debilitamiento de los vientos zonales del oeste (Lefebvre et al. 2004; Stammerjohn et al. 2008; Van Lipzig et al. 2008; Fogt et al. 2012), predominando los vientos del sureste (Turner et al. 2013; Clem et al. 2016), generando una mayor asimetría zonal (más centros de alta y baja presión zonalmente) (Lee et al. 2010) (Fig. 7).

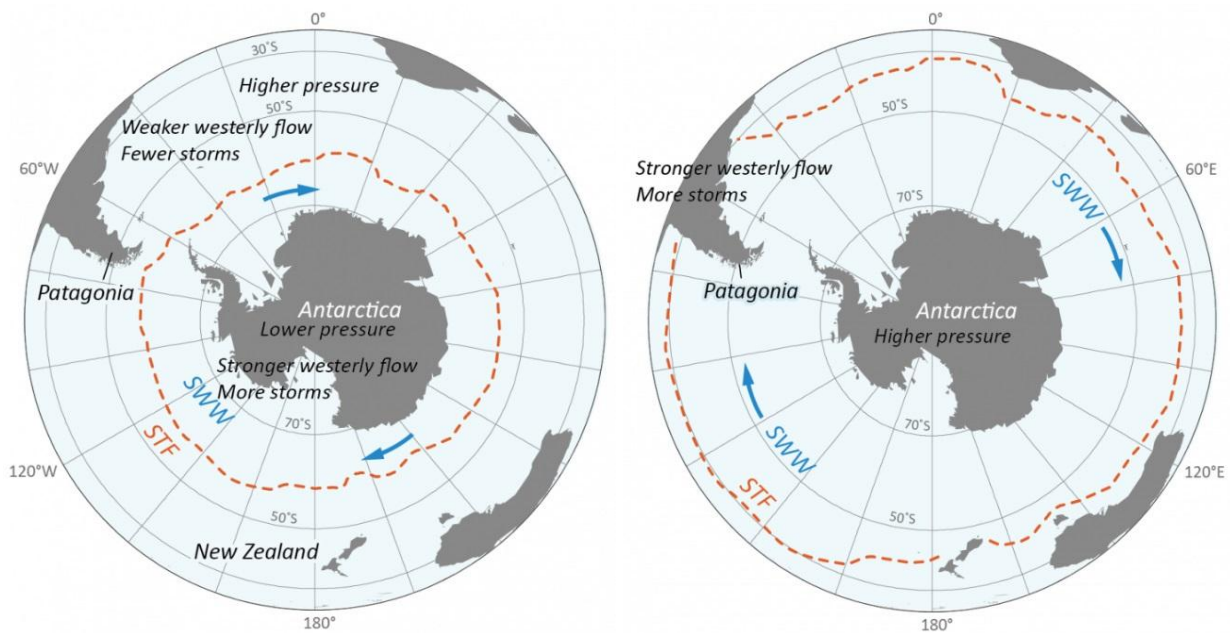


Figura 7. Fases del Modo Anular del Sur: positiva (izquierda) y negativa (derecha). En azul se visualiza el cinturón de vientos del oeste (SWW, del inglés Southern Westerly Winds). Imagen obtenida de: <https://www.antarcticglaciers.org/> (Davies 2023).

La bibliografía señala una tendencia positiva significativa del SAM desde 1979 durante el verano y otoño austral (Fogt & Marshall 2020), con una intensificación de las condiciones ciclónicas, lo que ha contribuido al aumento de la temperatura en la PA durante las últimas décadas (Gonzalez et al. 2018). Si bien las razones aún no están totalmente determinadas, se cree que el aumento de los gases de efecto invernadero y la disminución del ozono estratosférico antártico podrían estar jugando un importante rol en la naturaleza cambiante del SAM (Turner 2004; Fogt & Marshall 2020).

Existen diversos índices desarrollados en la bibliografía para la estimación de las fases del SAM. El desarrollado por Marshall (2003) es el más ampliamente utilizado, y se basa en la diferencia de presión zonal mensual normalizada a nivel del mar (SLP) entre 6 estaciones ubicadas en la latitud 40°S y 6 estaciones en la latitud 65°S, a escalas temporales mensuales, estacionales y anuales.

- **El fenómeno de El Niño (ENSO, del inglés *El Niño - Southern Oscillation*)**

Junto con el SAM, existe otro modo de variabilidad climática que desempeña un papel fundamental en conducir el clima regional del hemisferio sur (Dätwyler et al. 2020), y que se ha visto que está asociado a la variabilidad de las temperaturas de la PA al modular la profundidad y la extensión de la ASL (Gonzalez et al. 2018). Es el llamado El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Éste surge a partir de la interacción entre el océano y la atmósfera en la región ecuatorial del Océano Pacífico, y es considerado ampliamente como el principal modo de variabilidad climática global en escalas de tiempo interanuales a decadales (Lee et al. 2010; Schneider et al. 2012), ya que su efecto se ve reflejado en regiones alejadas de la cuenca del Pacífico (Turner 2004). Suele utilizarse el Índice Oceánico del Niño (ONI, del inglés *Oceanic Niño Index*) de la NOAA

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) para clasificar los fenómenos de El Niño (cálido) y La Niña (frío) en el Pacífico tropical oriental, en base a la anomalía media de la temperatura superficial del mar (TSM) de la región del Niño 3.4 durante 3 meses consecutivos. Se sabe hace relativamente poco que la teleconexión del ENSO con el Pacífico Sur es a través de su acoplamiento con el SAM (Schneider et al. 2012), pero no se sabe mucho acerca de la interacción entre ellos (Dätwyler et al. 2020); estos modos suelen estar “en fase” (teleconexión más fuerte de la media) cuando coinciden las fases Niña (Niño) y SAM positivo (negativo) (Clem & Fogt 2013; Welhouse et al. 2016). Sin embargo, sumando la poca claridad del efecto del ENSO en el Pacífico Sur (Turner 2004) al fuerte acoplamiento con el SAM, resulta realmente difícil discriminar y generalizar patrones en la Antártida. La configuración espacial y la modulación estacional de los distintos patrones de teleconexión son al día de hoy objeto de investigación (Stuecker et al. 2017).

CAPÍTULO 3.

CONSTRUCCIÓN DE BASE DE DATOS

3.1 Datos observados

Los datos meteorológicos utilizados en el presente estudio corresponden a tres estaciones antárticas: BCAA (Uruguay), FREI (Chile) y KS (Corea del Sur) de la Isla Rey Jorge.

Los datos de la estación uruguaya fueron proporcionados por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Los mismos fueron obtenidos de la estación meteorológica N°89054 acorde al listado de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), ubicada en $62^{\circ}11'04''$ S, $58^{\circ}51'07''$ W, a una altitud de 17 metros sobre el nivel del mar (Fig. 8). La estación meteorológica es catalogada como convencional, con personal para realizar la observación, si bien en la actualidad se cuenta con una estación automática que funciona sin personal. El instrumental de medición de las variables que se utilizarán en este estudio son los siguientes:

- termómetro de mercurio (temperatura del aire [$^{\circ}$ C]; medida a 1.5m del suelo)
- barómetro de mercurio (presión atmosférica [hPa])



Figura 8. Región suroeste de la isla donde se localizan las tres estaciones utilizadas para el presente estudio: BCAA (naranja) y FREI (fucsia) localizadas en la Península Fildes, y KS (amarillo) al otro lado de la Bahía Maxwell. La línea punteada amarilla señala el aeródromo de la isla. Imagen obtenida de Google Earth Pro 7.3.3.7786 (64-bit).

La información meteorológica de la estación coreana fue proporcionada por el Instituto de Investigación Polar de Corea (KOPRI). La base KS se ubica en 62°13'22" S, 58°47'14" W (código OMM N°89251), a 10 metros sobre el nivel del mar y es visible desde BCAA, pero ambas estaciones se encuentran separadas por la bahía Maxwell y el glaciar Collins, y una distancia lineal de aproximadamente 8 km.

Finalmente, la estación meteorológica chilena se ubica en 62°19' S, 58°98' W (código OMM N°89056), a 45 metros sobre el nivel del mar, y a una distancia lineal a BCAA de aproximadamente 4 km. Al tratarse de un aeródromo, la estación meteorológica allí ubicada cuenta con un programa de observación sinóptica cada 3 horas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC) lo que se traduce en una mayor cantidad de datos. Éstos fueron obtenidos a través del Portal de Servicios Climáticos - Dirección Meteorológica de Chile (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosDescarga/950001>).

Cabe aclarar que la información de la estación chilena no presenta control de calidad .

Las tres series se caracterizan por abarcar el período comprendido entre el 01/01/1998 y el 11/12/2016 y estar provistas por 4 mediciones diarias de las variables Temperatura y Presión atmosférica para los horarios 00, 06, 12 y 18 UTC (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de las variables utilizadas para cada estación, el período de medición y el tipo de estación meteorológica.

	BCAA	FREI	KS
Temp. del aire	Sí	Sí	Sí
Temp. Máx.	Sí	Sí	Sí
Temp. Mín.	Sí	Sí	Sí
Presión Atm.	Sí	Sí	Sí
Período	1998 - 2016	1998 - 2016	1998 - 2016
Horarios (UTC)	0, 6, 12, 18	0, 6, 12, 18	0, 6, 12, 18
Tipo de estación	Convencional	Automática	Automática

3.2 Control de calidad

A pesar de los esfuerzos realizados en la prevención de errores durante la recopilación de datos y su digitalización, siempre existen errores en los grandes conjuntos de datos (OMM 2010), por lo que es fundamental realizar un procedimiento coherente de control de calidad (cumpliendo las normas internacionales de la OMM (Cerlini et al. 2020)) para evaluar la calidad de la información previo a la realización de cualquier tipo de análisis (Foken et al. 2004; Rusticucci & Renom 2007), y mejorar así la precisión de las

observaciones meteorológicas (Ye et al. 2017). Los controles de calidad de las series temporales generadas a partir de observaciones provenientes de instrumental involucran el análisis de datos erróneos o “improbables” de la variable en cuestión (por ejemplo, un dato de precipitación negativa) y la búsqueda de datos sospechosos (OMM 2000) (cuando la variable muestra valores fuera de un rango específico o no presenta consistencia con los datos temporales anteriores o posteriores, por ejemplo), pero además involucran la realización de un análisis de datos faltantes, ya que el porcentaje de los mismos condicionarán los análisis estadísticos que se quieran realizar (Veiga et al. 2015).

Los errores provenientes de las observaciones de estaciones de superficie pueden ser producto de errores cometidos durante el funcionamiento de los instrumentos o de las imprecisiones de los mismos, y en el caso de las estaciones convencionales, también son debido a la interferencia de la actividad humana (Cheng et al. 2016) y el error aleatorio durante el proceso de adquisición de datos. De este modo, el principal propósito del control de calidad de los datos es identificar el error debido a datos improbables y aleatorios (Ye et al. 2017), determinar si los datos son inexactos y/o incompletos (Cerlini et al. 2020), garantizar la coherencia de los mismos y su fiabilidad, de modo que puedan ser útiles para el presente trabajo y para la comunidad científica en general (UNESCO/IOC 2020). El procedimiento de control de calidad fue dividido en las siguientes etapas:

1. Homogeneización de los horarios
2. Revisión de secuenciación
3. Revisión de datos faltantes (NAs)
4. Comprobación del rango de valores
5. Comprobación de consistencia temporal

El procesamiento de los datos en sus primeras 2 etapas fue realizado en una planilla de cálculo (LibreOffice 7.1). A partir de la tercera etapa se trabajó con lenguaje de programación R, en el software RStudio (versión 1.4.1103), el cual es de libre uso y accesible desde el sitio web <https://www.r-project.org/> (RStudio Team 2021).

Dicho control de calidad permitirá, además, contribuir con información climatológica de la Base Científica Antártica Artigas a bases de datos internacionales con fines científicos, como son las creadas por el *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR) (<https://www.scar.org/>). SCAR cuenta con bases de datos de libre acceso de las principales variables que son investigadas en la región Antártica, como ser: biodiversidad, biodiversidad terrestre, plancton, hielos, etc. A su vez, contiene un programa llamado *REference Antarctic Data for Environmental Research* (READER) (<https://www.scar.org/resources/ref-data-environmental-research/>) e integrado por tres componentes. Uno de ellos es el MET-READER, de particular interés para nosotros por tratarse de mediciones meteorológicas medias de alta calidad y largo plazo, y donde se

encuentran los datos climáticos de la mayoría de las estaciones antárticas (<https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/>). En dicha base de datos la climatología de las variables en superficie está realizada a partir de cuatro observaciones diarias en los horarios internacionales: 00, 06, 12 y 18 UTC.

3.2.1 Homogeneización de los horarios

Como se mencionó anteriormente, una de las finalidades del análisis de las series es lograr compartirlas en bases de datos internacionales, es por ello que la información recibida se generó en los horarios 00, 06, 12 y 18 UTC (del inglés *Universal Time Coordinate*), por ser considerados el estándar utilizado a nivel internacional en el ámbito de la meteorología.

La información recibida de BCAA fue provista en horario local o UTC-3 (03, 09, 15, 21 hs.), por lo que fue necesario convertirlos a UTC en la primera instancia (ej.: medición realizada a las 15 UTC-3 se convierte en 18 UTC). Asimismo, en el caso de las 21 hs., que pasan a ser 00 UTC, fue necesario también modificar el día de registro, ya que pasa a ser el día siguiente. Por otro lado, fue separada la información de los horarios que no fueran los 4 de interés, quedando guardada en otro archivo. De este modo, para la base de datos de BCAA se apartaron un total de 359 mediciones según se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos eliminados de la serie temporal de BCAA por haber sido registrados en horarios que no son de interés para el presente estudio.

Horario (UTC)	3	5	7	8	9	11	14	15	17	19	21	22	23
N° datos	16	2	1	1	326	1	1	1	4	1	3	1	1

Por su parte, las series temporales de FREI y KS fueron proporcionadas en horario UTC, por lo que no fue necesario realizar la conversión. Sin embargo, FREI también contó con mediciones en horarios que no son de interés, procediendo de la misma forma que para la información de BCAA, separando en este caso un total de 75.405 datos.

3.2.2 Revisión de secuenciación

El archivo recibido con la información meteorológica de BCAA no se encontraba en forma secuencial, ya que en muchos casos se contaba únicamente con el día y hora en que fue tomado el registro, no pudiendo identificar si la omisión del registro del horario faltante era debido a rotura de instrumental o a la imposibilidad de realizar la observación por algún otro motivo (ej.: fenómeno meteorológico adverso). Para solucionar este problema en el archivo, se realizó una revisión manual de modo de

constatar que para cada día de la serie existieran 4 mediciones en los horarios 00, 06, 12 y 18 UTC, y se procedió a rellenar con cada día y hora faltante, contabilizando la información de dicha variable como dato faltante (NA, del inglés *Not Available*). En la Fig. 9 se detalla el proceso de secuenciación realizado: al identificar omisión de uno o más horarios (A), se adicionó una fila en blanco en su lugar (B) y se completó con el día, mes, año y hora correspondiente, colocando NA en las variables de medición (C).

	Día	Mes	Año	Hora (UTC)	TempAire [°C]	PresAtmMar [hPa]
(A)	18	2	1998	00:00	3,3	1008,3
→	18	2	1998	06:00	1,1	1011,3
	18	2	1998	18:00	2,8	1012,4
	19	2	1998	00:00	3,9	1008,1

	Día	Mes	Año	Hora (UTC)	TempAire [°C]	PresAtmMar [hPa]
(B)	18	2	1998	00:00	3,3	1008,3
→	18	2	1998	06:00	1,1	1011,3
	18	2	1998	18:00	2,8	1012,4
	19	2	1998	00:00	3,9	1008,1

(C)	18	2	1998	12:00	NA	NA
-----	----	---	------	-------	----	----

	Día	Mes	Año	Hora (UTC)	TempAire [°C]	PresAtmMar [hPa]
(D)	18	2	1998	00:00	3,3	1008,3
→	18	2	1998	06:00	1,1	1011,3
	18	2	1998	12:00	NA	NA
	18	2	1998	18:00	2,8	1012,4
	19	2	1998	00:00	3,9	1008,1

Figura 9. Proceso de secuenciación de las series de datos: identificación de horario faltante; adición de fila en blanco; completado con datos correspondientes y NA para las mediciones.

Como resultado del proceso de secuenciación, se observó la omisión de un total de 1.350 registros (día y hora) en la serie temporal de BCAA, los cuales fueron considerados como NAs.

Se realizó el mismo procedimiento manual de secuenciación para las series de FREI y KS. En el caso de FREI se identificaron únicamente 89 fechas faltantes, y KS se presentó de forma completa. Luego de realizado el proceso de secuenciación, se obtuvieron 3 bases de datos depuradas (D) con un total de 27.680 fechas para el registro de las variables temperatura del aire y presión atmosférica. A su vez, fueron eliminados los días 29 de febrero de los años bisiestos para el tratamiento de la base de datos, por lo que finalmente las series se compusieron de un total de 27.660 fechas cada una.

3.2.3 Revisión de datos faltantes (NAs)

- **BCAA**

Luego de corroborar que para cada día existiesen cuatro mediciones y tras haber eliminado los 29 de febrero de los años bisiestos, se contabilizó el total de datos faltantes. Se registró para la serie de BCAA un total de 3.696 datos faltantes para la variable temperatura del aire (13.4% del total) y 4.849 para la presión atmosférica (17.5% del total), distribuidos de forma heterogénea en la serie. La distribución temporal de los mismos puede visualizarse de forma general en las figuras 10 y 11, donde se destaca en color bordó la presencia de datos faltantes. El gráfico central resume la distribución a lo largo de toda la serie (con los meses en el eje X y los años en el eje Y), al tiempo que el gráfico de barras superior representa los datos faltantes por mes, y el gráfico de barras de la derecha resume la cantidad de datos faltantes por año. Cabe aclarar que, a los efectos de realizar el gráfico, fue necesario completar la serie para que todos los años tuvieran la misma cantidad de días (365). Contemplando que la serie culmina el día 11/12/2016 a las 18 UTC, fue necesario adicionar un total de 80 registros de NAs (4 registros por día, en un total de 20 días), los cuales no fueron contemplados en la sumatoria total, así como tampoco en la mensual y anual.

En lo que refiere a las mediciones de temperatura del aire, se observa un cambio importante en la cantidad de datos faltantes en el año 2010, único año que se presentó totalmente completo, seguido por los años 2011 y 2012, con una muy baja cantidad de datos faltantes. Por el contrario, el año 2009 fue el que presentó mayor cantidad de datos faltantes (661 NAs), constituyendo el 45% de la serie anual (alcanzando casi el 18% del total de NAs para dicha variable). El segundo año más incompleto es el 2016 (con un total de 489 NAs), el cual se visualiza (en el gráfico central) con la presencia de intervalos regulares sin datos así como dos grandes *gaps* (intervalos de sucesivos datos faltantes). El primero de ellos se corresponde al período 13/05/2016 0 UTC - 23/06/2016 18 UTC para el cual no se registra ningún valor (un total de 167 NAs). El segundo de ellos no es contemplado dentro del análisis, puesto que la serie provista por INUMET culmina el día 11/12/2016 a las 18 UTC. A su vez, se registran otros cuatro *gaps*: el mayor de ellos registrado en el 2013 (16/04/2013 12 UTC al 11/05/2013 12 UTC, un total de 100 NAs); luego uno menor entre junio y julio del 2009 (si bien no es un *gap* continuo, se registraron únicamente 49 datos durante los dos meses, lo que implica 195 NAs para dicho período); lo mismo ocurrió en febrero del 2006, donde se registraron 30 observaciones en todo el mes, implicando 82 datos faltantes; y finalmente agosto de 1999 (07/08/1999 0 UTC al 17/08/1999 18 UTC, un total de 43 NAs). Por último, puede también observarse que la distribución mensual de los datos faltantes es bastante homogénea para esta variable, sin embargo destaca marzo como el mes más completo (233 NAs, 10%) y diciembre como el más incompleto (395 NAs, 17%) (Fig. 10).

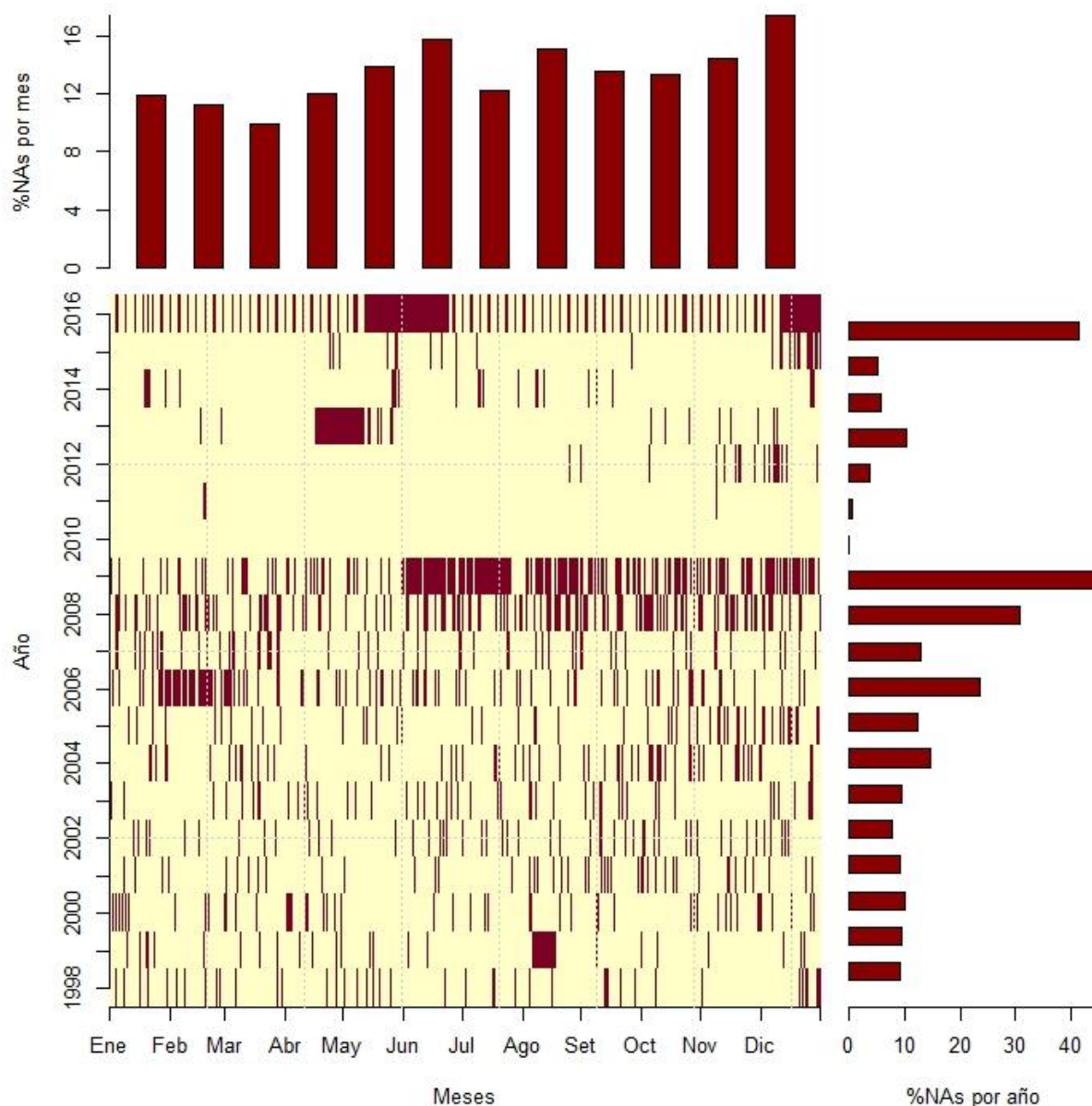


Figura 10. Distribución temporal de los datos faltantes (NAs) para la serie temperatura del aire. Las barras en color bordó representan los NAs en la serie. El gráfico superior (barras verticales) representa el porcentaje de NAs mensuales para la totalidad de la serie, y el gráfico de la derecha (barras horizontales) representa el porcentaje de NAs anuales.

Por su parte, la variable presión atmosférica no presentó ningún año completo, y la serie en general está más incompleta que la de temperatura. La principal diferencia entre ambas variables se visualiza en los años 2010, 2011 y 2012, los cuales en el caso de la presión presentan entre un 17 y 34% de NAs. El año 2009 fue, al igual que para la temperatura, el año más incompleto con un total de 45% de datos faltantes (663 NAs, casi 14% del total de NAs para dicha variable), seguido por los años 2016 (491 NAs, casi 36%) y 2011 (508 NAs, casi 35% del año). Por el contrario, el año 2015 fue el más completo, con tan solo un 5% de datos faltantes (78 NAs). En esta serie se visualizan, además de los seis grandes gaps descritos en la temperatura, otros tres

gaps: el mayor de ellos en el 2011, abarcando un total de 158 NAs (16/11/2011 18 UTC al 26/12/2011 6 UTC); el mismo año contiene otro período sin datos, entre el 22/03/2011 18 UTC y el 08/04/2011 0 UTC, comprendiendo un total de 65 NAs; y finalmente un gap de 83 NAs en el 2010 (14/09/2010 18 UTC al 05/10/2010 12 UTC). En lo que respecta a la distribución mensual de datos faltantes, también en esta variable destacan marzo como el mes más completo (363 NAs, 15%) y diciembre como el más incompleto (465 NAs, 20%) (Fig. 11).

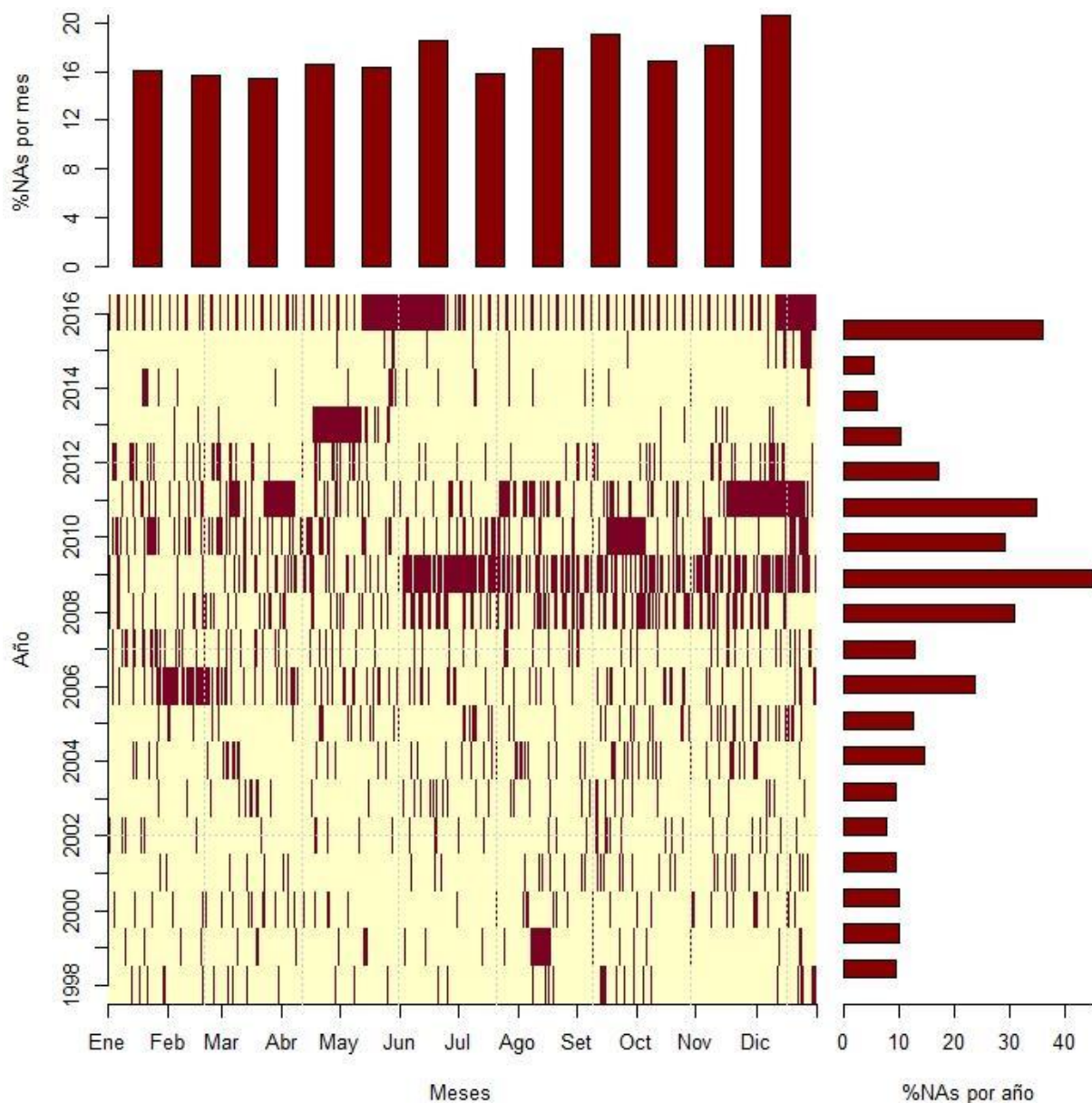


Figura 11. Distribución temporal de los datos faltantes (NAs) para la serie presión atmosférica. Ídem Fig.10.

Datos faltantes por horario de observación:

Finalmente, analizando la distribución horaria de datos faltantes, se constató que para ambas variables las 06 UTC constituyen el horario de mayor cantidad de datos faltantes (19.2% de NAs para Temperatura y 23.6% para Presión), y 18 UTC el horario de menor cantidad (9.6% de NAs para Temperatura y 13.3% para Presión) (Tabla 4, Fig. 12).

Tabla 4. Porcentaje de datos faltantes (NAs) por horario para las variables Temperatura del Aire y Presión atmosférica para las estaciones BCAA, FREI y KS, y porcentaje total de NAs en relación al total de datos.

Hora UTC	% NAs de Temp. Aire			% NAs de Presión		
	BCAA	FREI	KS	BCAA	FREI	KS
00	11.77	0.04	0.16	16.23	0.25	0.17
06	19.23	0.16	0.14	23.59	0.72	0.16
12	12.87	0.09	0.23	16.96	0.20	0.25
18	9.57	0.09	0.20	13.28	0.19	0.23
Total	13.4	0.1	0.2	17.5	0.3	0.2

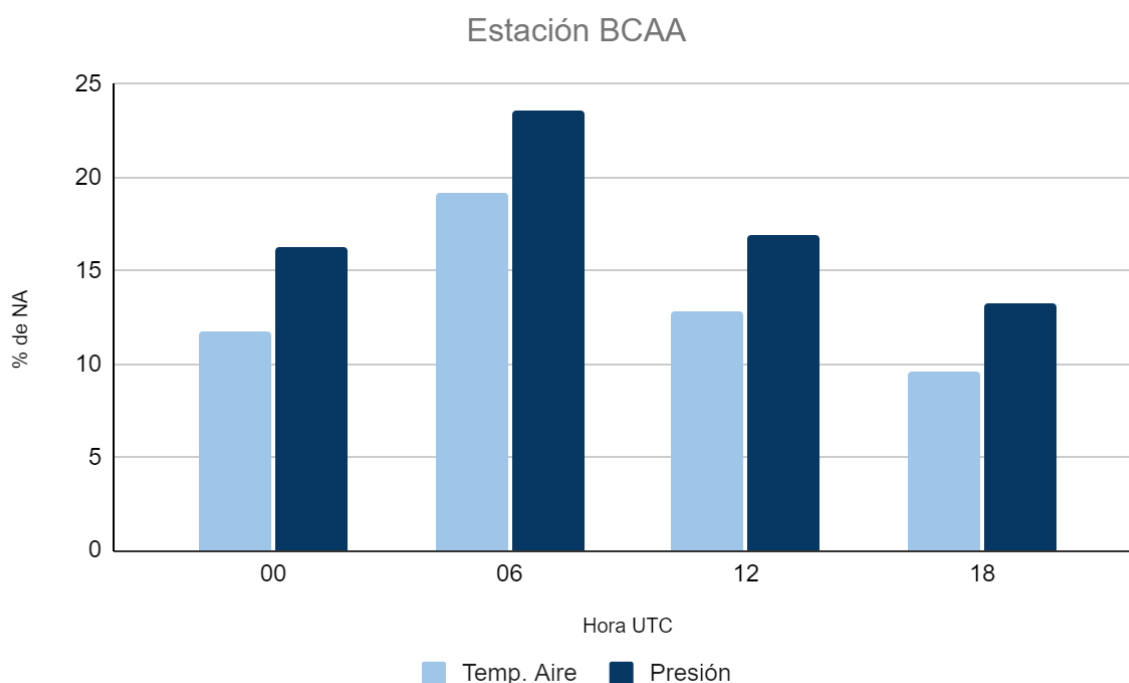


Figura 12. Porcentaje de datos faltantes (NAs) por horario para las variables Temperatura del Aire (celeste) y Presión atmosférica (azul) para la estación BCAA.

- **FREI y KS**

Las bases de datos de las otras dos estaciones se presentaron sustancialmente más completas que la de INUMET. FREI contó con tan solo 26 datos faltantes para la variable temperatura del aire (0.1% del total), siendo la mayoría (11) en el horario 06 UTC y la minoría (3) en el horario 00 UTC. En lo que refiere a la misma variable para la estación KS, la cantidad de datos faltantes fue de 51 NAs (0.2% de la serie total; el doble que FREI), que se distribuyeron en su mayor medida en las 12 UTC (16 NAs; 31% del total de datos faltantes y 0.23% para dicho horario) y en menor medida en las 06 UTC (10 NAs; 20% del total de datos faltantes y 0.14% de datos faltantes para el horario). En lo que respecta al análisis mensual, los meses que mayor porcentaje de NAs presentaron fueron enero para el caso de FREI (0.47%) y agosto para KS (0.38%). Finalmente, el análisis de distribución anual de datos faltantes, arrojó que el año 2013 fue el más incompleto para FREI (7 NAs), y 1999 el más incompleto para KS (23 NAs).

Por su parte, la variable presión atmosférica presentó un total de 94 datos faltantes (0.3% del total) para la estación FREI, ocurriendo el 53% (50 NAs) en el horario 6 UTC (0.72% de NAs) y el 14% (13 NAs) a las 18 UTC (0.19% de NAs). La estación KS presentó 56 datos faltantes (0.2% de la serie total), siendo la mayor parte de ellos en el horario 12 UTC (30% del total de NAs y 0.25% del total de mediciones para dicho horario), y la menor parte a las 6 UTC (11 NAs). Analizando las series de forma mensual, destacó julio como el mes de mayor cantidad de NAs para FREI (33 NAs, 1.4%) y agosto y diciembre fueron los meses más incompletos para KS (9 NAs y 0.38% cada mes). Finalmente, en lo que respecta al análisis anual, en el caso de FREI los años 2003 y 2010 se presentaron completos para esta variable, al tiempo que el año 2011 fue el que menor registro presentó (48 NAs, lo que se traduce en 3.29% de datos faltantes para dicho año). Para el caso de KS, 1999 fue el año que mayor cantidad de datos faltantes presentó (23 NAs, 1.57%) (Fig. 13).

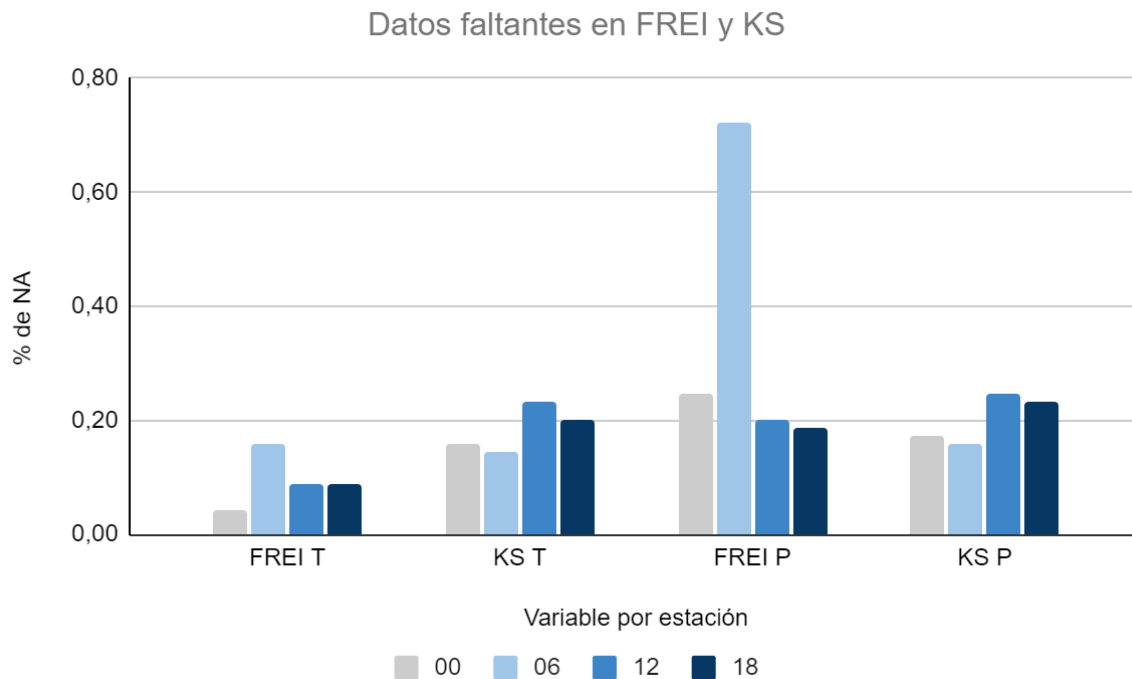


Figura 13. Porcentaje de datos faltantes (NAs) por horario (indicado con colores) para las variables Temperatura del Aire (T) y Presión atmosférica (P) para las estaciones FREI y KS.

Cabe mencionar que ninguna de las 3 estaciones antárticas presentó la serie de datos totalmente completa, observando a BCAA como la que mayor cantidad de datos faltantes presentó en el período de estudio. FREI presentó la serie de temperatura más completa y KS la de presión atmosférica. Es evidente, a su vez, que la alta cantidad de datos faltantes en BCAA en relación a FREI y KS evidencia que es necesario implementar otra forma (estación automática) de recopilación de datos meteorológicos para obtener así series más completas.

3.2.4 Detección de valores fuera de rango (outliers)

Para cada serie y variable, se realizó la detección o búsqueda de valores fuera de rango (*outliers*), considerando como “valor extremo” a cualquier valor que quede por fuera de un intervalo “válido” definido para cada variable. Esta es una de las principales pruebas de control de calidad y busca comprobar si las observaciones se encuentran dentro de los límites climatológicos de la estación, mediante la búsqueda de anomalías inesperadas en las series temporales (Ye et al. 2017), puesto que valores muy altos o muy bajos dentro de la serie pueden ser erróneos (OMM 2000).

La búsqueda de valores extremos se realizó en 2 etapas:

1. Control de rango fijo: Se determinaron rangos de valores de temperaturas máximas y mínimas “aceptables” para cada variable, en base a valores

extremos históricos del lugar (Rusticucci & Barrucand 2001). Para ello se consideró como rango válido de temperatura el comprendido entre los valores -40°C y 20°C , que contempla el mínimo absoluto de -32°C registrado en la Bahía Almirantazgo (Nowosielski 1980) así como el máximo absoluto de 15°C registrado en la Isla Livingston (perteneciente al mismo archipiélago Shetland del Sur) (Bañón et al. 2013). Para la variable presión atmosférica se consideró el rango comprendido entre 900 y 1.100 hPa. Esta etapa asegura que no existan valores físicamente imposibles o nunca antes observados en el registro histórico (Veiga et al. 2015), permitiendo verificar errores de observación (OMM 2000). Se trata de un control de rango fijo, puesto que los límites propuestos (valores extremos pre-establecidos) son fijos para cada variable durante todo el periodo de datos (Veiga et al. 2015).

2. Control de rango variable: Se calculó la media climática mensual de cada variable para toda la serie, y se determinó un rango estacional de cada variable [$\text{media} - n \cdot \text{std}$, $\text{media} + n \cdot \text{std}$] (OMM 2018), colocando como límites superior e inferior 4 (n) veces la desviación estándar (std) (Rusticucci & Renom 2007), de modo de buscar la existencia de valores inusuales que superen dicho rango. A su vez, se creó un mismo rango ([$\text{media} - n \cdot \text{std}$, $\text{media} + n \cdot \text{std}$]) considerando la media y la desviación estándar totales de la serie, para ver si era detectado algún valor que no fuera abarcado con el rango climático mensual. Se trata en este caso de un control de rango variable, puesto que los rangos o umbrales usados para identificar valores sospechosos varían dinámicamente, ajustándose en función del mes (Cerlini et al. 2020; Cheng et al. 2016; Veiga et al. 2015). Esto lo convierte en un control más fino o sensible que el de la etapa previa.

Una vez encontrados los valores que escapan a los límites planteados (casos extremos), los valores obtenidos son evaluados para determinar si se trata de un error o de un valor que, si bien es extremo, puede ser probable. Para ello se corroboraron los potenciales errores con INUMET de modo de minimizar los datos faltantes, y también se comparó el comportamiento con las bases de datos de FREI y KS, para constatar si existían comportamientos análogos entre ellas, lo que permite verificar si efectivamente es un error de BCAA o si el dato es correcto.

Los errores potenciales (EP) se clasificaron en los siguientes grupos:

- EP1: Valores que escapan el rango determinado, pero son similares a los registrados en FREI y/o KS ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ de diferencia con alguna de las 2 estaciones), por lo que son aceptados tal como estaban. No aumenta la cantidad de NAs.
- EP2: Valores que escapan el rango, y tras ser verificados con INUMET resultan ser errores de tipeo. Son corregidos, por lo que no aumenta la cantidad de NAs.
- EP3: Valores que escapan el rango, pero son verificados con INUMET sin encontrar ninguna irregularidad. Son aceptados tal como estaban. No aumenta la cantidad de NAs.

Para la temperatura del aire, no se encontró en la primera etapa (control de rango fijo) ningún valor que escapara del rango de valores establecido para ninguna de las tres series (BCAA, FREI, KS). Sin embargo, para la segunda etapa (control de rango variable) se encontró un total de 83 valores (0.34% del total de datos) en la serie de BCAA por fuera del rango establecido (Anexo I, Tabla A1). De dichos valores, 72 fueron clasificados como EP1, 8 como EP2 y 3 como EP3. De dicha totalidad, el mayor porcentaje de EP corresponde a los meses de julio (35%) y agosto (19%), y el menor porcentaje a los meses de abril (0%) y marzo y mayo (2.4% cada uno).

En lo que respecta a la presión atmosférica, tampoco se encontró ningún valor que escapara el control de rango fijo, en ninguna de las tres series. Por el contrario, se encontraron 11 valores (0.05% del total de datos) en la serie de BCAA por fuera del rango variable establecido, ubicándose un tercio de los valores en el mes de mayo y otro tercio en el mes de octubre. De dichos valores, se clasificó a 5 de ellos como EP1 y a los restantes 6 como EP2 (Anexo I, Tabla A2).

3.2.5 Comprobación de consistencia temporal

Luego de chequear que todos los valores estuvieran dentro del rango posible de cada variable, se realizó una comprobación de consistencia temporal tanto para la temperatura del aire como para la presión atmosférica, con la finalidad de asegurar que los cambios entre las observaciones consecutivas fueran realistas (Ye et al. 2017; OMM 2018). Este control de consistencia temporal estudia las secuencias de valores de la variable con el fin de determinar si la diferencia de dos observaciones sucesivas (el registro actual y el anterior) supera el umbral de variación de dicha variable (Cheng et al. 2016).

Para ello, se creó una serie temporal construida a partir de las diferencias absolutas (ΔX) entre un registro (X_i , ej. 06/08/2010 12 UTC) y el inmediatamente anterior (X_{i-1} , ej. 06/08/2010 6 UTC):

$$\Delta X = |X_i - X_{i-1}|$$

Posteriormente se definió un umbral (la media de la serie +/- cuatro veces su desviación estándar) (Renom 2009) para determinar, a partir de allí, si la diferencia de valores entre registros consecutivos puede considerarse extrema y, por tanto, potencialmente errónea (Veiga et al. 2015). En lo que respecta a la temperatura del aire, el análisis arrojó un total de 205 EP (ΔT que escapan al umbral establecido para la variable), los cuales fueron evaluados manualmente uno a uno (Anexo I, Tabla A3). De dicha totalidad, 178 de ellos fueron clasificados como EP1 (escapan al umbral pero son aceptados al ser también registrados en FREI y/o KS), y los restantes 27 valores fueron EP2 y por lo tanto corregidos por INUMET, por lo que no se perdió ningún valor (Anexo I, Tabla A4). A su vez, de los 27 EP2, 4 de ellos ya habían sido identificados también en la etapa de control de rango variable.

El control de consistencia temporal para la presión atmosférica encontró 127 EP que escapaban al ΔP , los cuales fueron también revisados de forma manual (Anexo I, Tabla A5). De dicha totalidad, 51 fueron clasificados como EP1 al registrarse también en FREI y/o KS, y los restantes 76 fueron enviados a INUMET para su chequeo, de los cuales 36 fueron clasificados como EP2 (errores de tipeo y por lo tanto corregidos) y 3 fueron clasificados como EP3 (verificados sin encontrar irregularidades). Sin embargo, 37 valores correspondientes al año 2016 no pudieron ser corroborados por no contar con el librito meteorológico en el archivo de INUMET, por lo que fueron clasificados como Sin Determinar (S.D.) (Anexo I, Tabla A6). En la Fig. 14 se visualiza la totalidad de EP encontrados en las etapas 3.2.4 y 3.2.5.

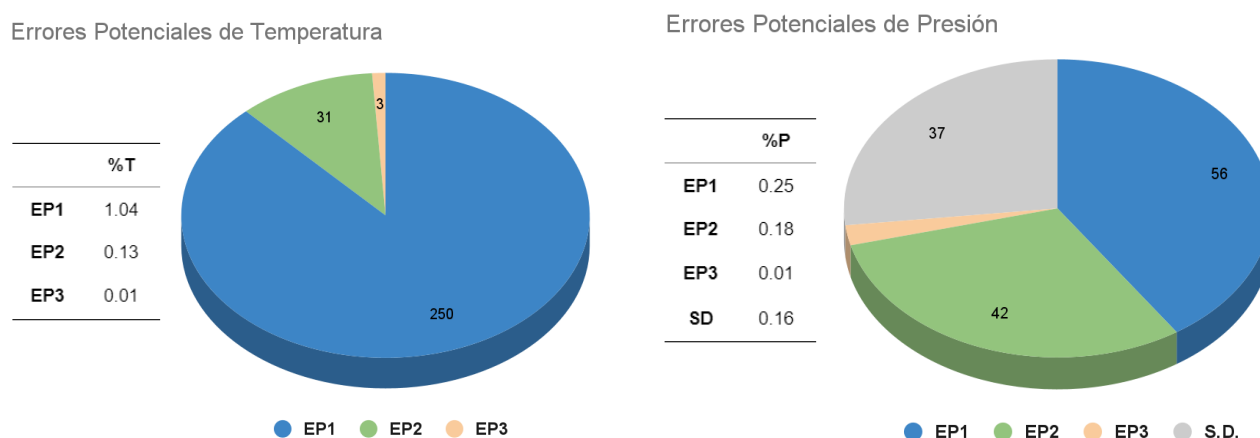


Figura 14. Se visualiza la totalidad de Errores Potenciales (EP) encontrados en el control de rango de valores (fijo y variable) así como en la comprobación de la consistencia temporal, tanto para la temperatura del aire (izquierda) como para la presión atmosférica (derecha). Las tablas de porcentajes hacen referencia al porcentaje que ocupa cada categoría de EP en relación a la totalidad de valores registrados para cada variable (se omiten en dicha totalidad los datos faltantes).

Una vez finalizado el control de calidad, se realizaron observaciones primarias entre las tres estaciones mediante resumen estadístico de datos y gráficos para observar cómo quedó la serie de BCAA y comparar su similitud con las series de FREI y KS. En lo que refiere a la descripción estadística básica de las series y su representación gráfica, BCAA mostró una mayor similitud con KS que con FREI para ambas variables (Tabla 5, Fig. 15 y 16).

Tabla 5. Resumen estadístico de las variables temperatura del aire y presión atmosférica para las tres estaciones: Base Científica Antártica Artigas (BCAA), C.M.A. Eduardo Frei Montalva (FREI) y King Sejong (KS).

	Temperatura del aire [°C]			Presión atmosférica [hPa]		
	BCAA	FREI	KS	BCAA	FREI	KS
Cant. obs.	27660	27660	27660	27660	27660	27660
Mínimo	-23.5	-25.0	-23.5	932.3	931.7	934.0
1er cuartil	-3.6	-3.7	-3.5	981.7	981.8	981.6
Mediana	-0.6	-1.1	-0.5	989.9	990.2	990.0
Media	-1.8	-2.2	-1.8	990.1	990.4	990.3
3er cuartil	1.0	0.4	1.1	998.5	999.0	998.6
Máximo	9.1	7.2	10.2	1036.4	1035.7	1035.8
NAs	3.696	26	51	4844	94	56

En la Fig. 15 puede observarse que los patrones de las 3 series son muy similares, con ciclos estacionales que alternan entre temperaturas más altas en los meses cálidos y más bajas en los meses fríos. Algunos de estos períodos destacan por presentar valores extremos, como ser por ejemplo el mínimo de -25°C registrado por FREI el 23/07/2011, y el máximo de temperatura de 10.2°C registrado por KS el 02/01/2016.

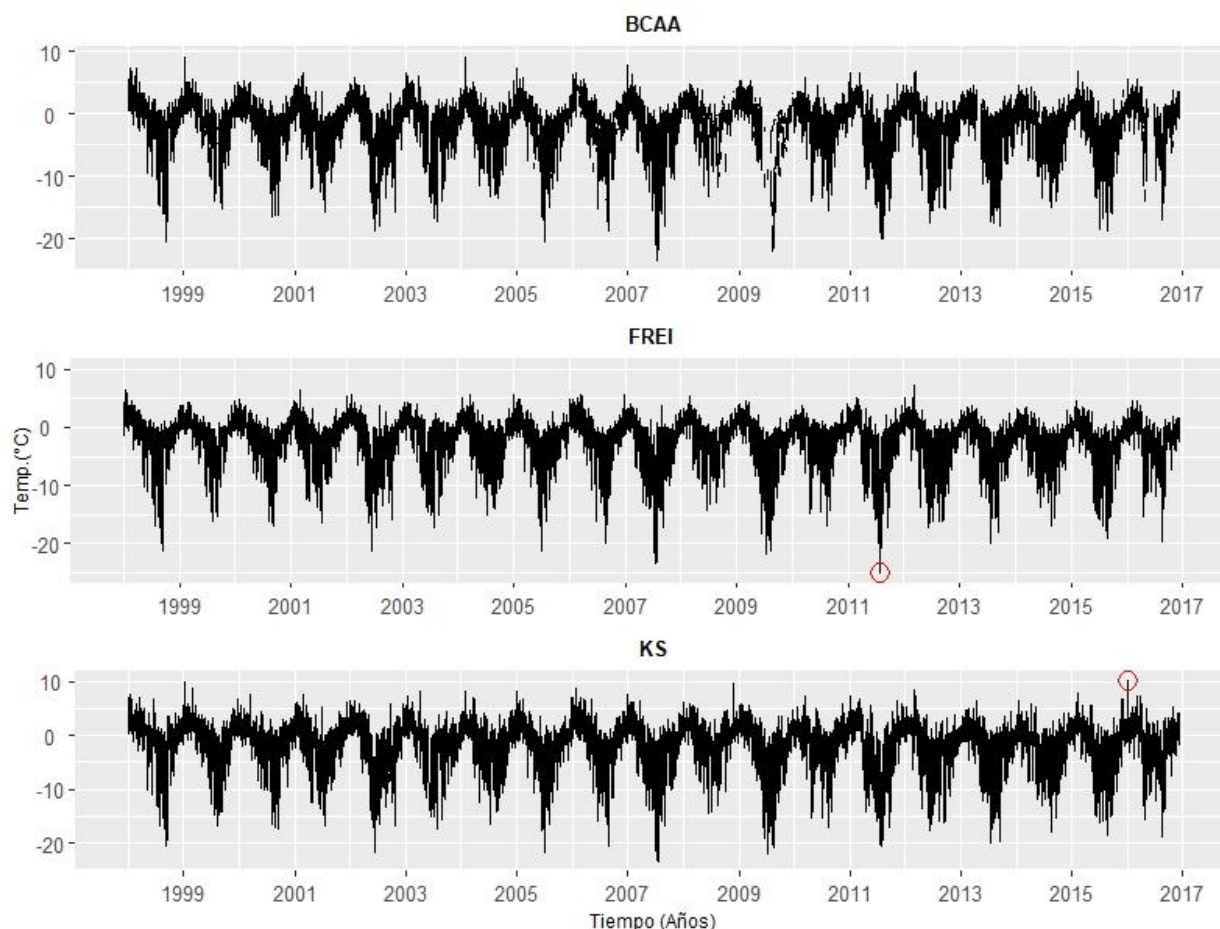


Figura 15. Variabilidad anual de la temperatura del aire en las tres estaciones: BCAA (arriba), FREI (centro) y KS (abajo). Los círculos rojos señalan el mínimo y máximo absoluto de temperatura.

En lo que refiere a la presión atmosférica, en la Fig. 16 puede observarse que los picos de valores altos de presión registrados en BCAA son registrados también por FREI y KS, destacando los 3 máximos registrados en mayo, julio y setiembre del 2000, donde la presión en todos los eventos y estaciones superó los 1030 hPa. Sin embargo, BCAA registra varios valores bajos de presión que no son compartidos por las otras bases, exceptuando el valor extremo registrado en agosto del 2015. El valor mínimo de presión fue de 931.7 hPa y fue registrado por FREI el día 17/08/2015 a las 0 UTC; y el máximo fue de 1036.4 hPa y fue registrado por BCAA el 08/09/2000 a las 12 UTC.

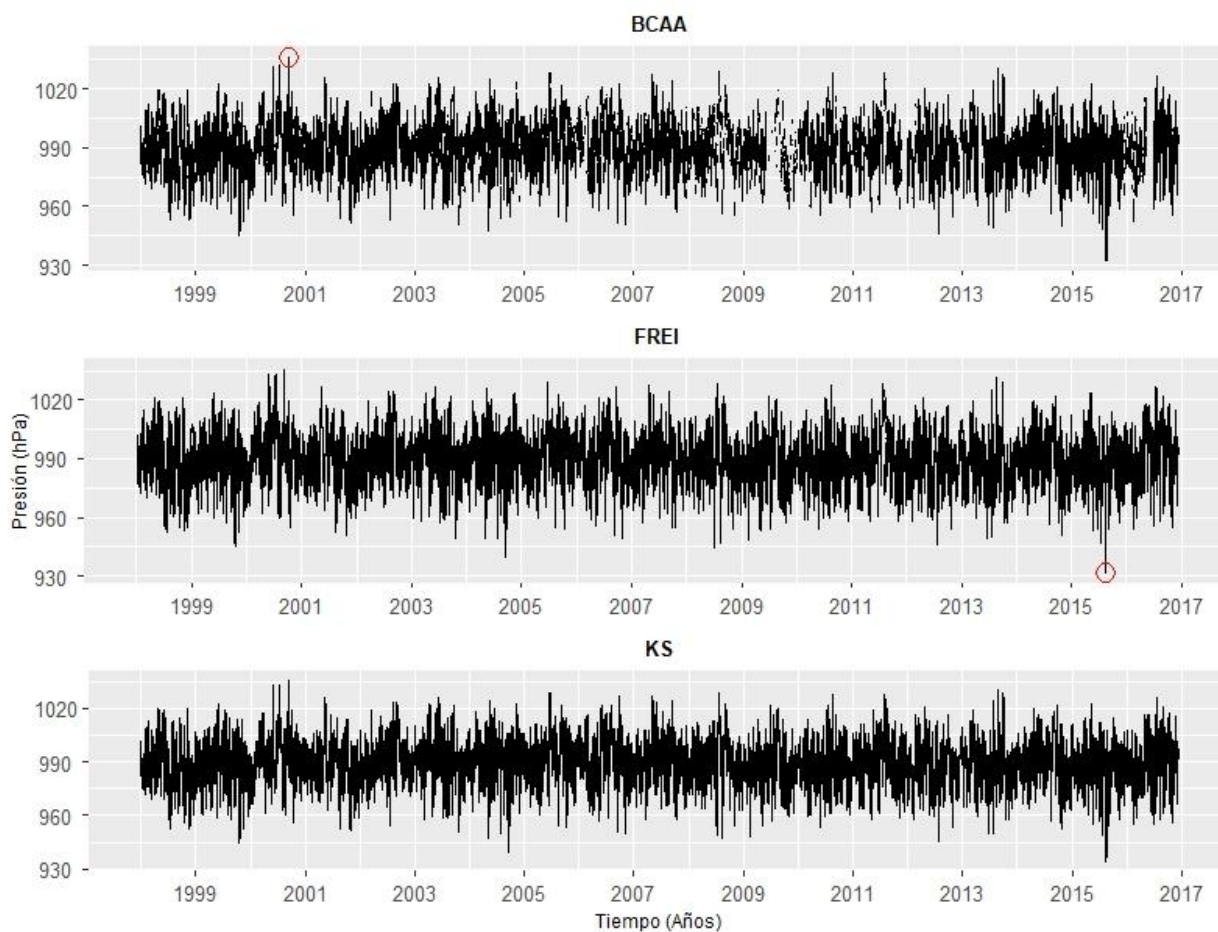


Figura 16. Variabilidad anual de la presión atmosférica en las tres estaciones: BCAA (arriba), FREI (centro) y KS (abajo). Los círculos rojos señalan el mínimo y máximo absoluto de presión.

3.3 Control de consistencia espacial

El control de calidad descrito hasta el momento ha sido realizado sobre los datos de una única estación (BCAA), aunque se utilizaron a modo de control y comparación los datos de las estaciones FREI y KS. Sin embargo, en esta etapa se pretende realizar un control de calidad de consistencia espacial, mediante diferentes análisis entre las estaciones con la potencialidad de conocer si las variables presentan una correlación espacial, para poder generar luego una serie completa y lista para un análisis más exhaustivo.

Como primer paso se realizó un chequeo visual de la distribución de los datos mediante la realización de histogramas de las medias diarias de ambas variables, para comprobar si las tres series se comportan de forma similar. En lo que respecta a la temperatura del aire, en la Fig. 17 se visualiza que las tres series presentan una distribución no normal (Test de Shapiro-Wilk, $p\text{-value} < 2.2e-16$) prácticamente igual y sesgada hacia la derecha (concentración de los datos hacia la derecha, con una mediana mayor que la media). A su vez, se observa con claridad que las mayores frecuencias de valores (superiores a 1.600) corresponden al rango de temperatura que

va de -2 a 2°C, siendo en el caso de BCAA y KOREA mayor en el rango 0 a 2°C, y en el caso de FREI mayor en el rango -2 a 0°C. Finalmente, se visualiza también que los valores negativos de temperatura presentan mayores frecuencias que los positivos, algo ya observado con claridad en las gráficas previas de temperatura del aire (Fig. 15), donde la mayor parte de la serie se encontró por debajo de los 0°C.

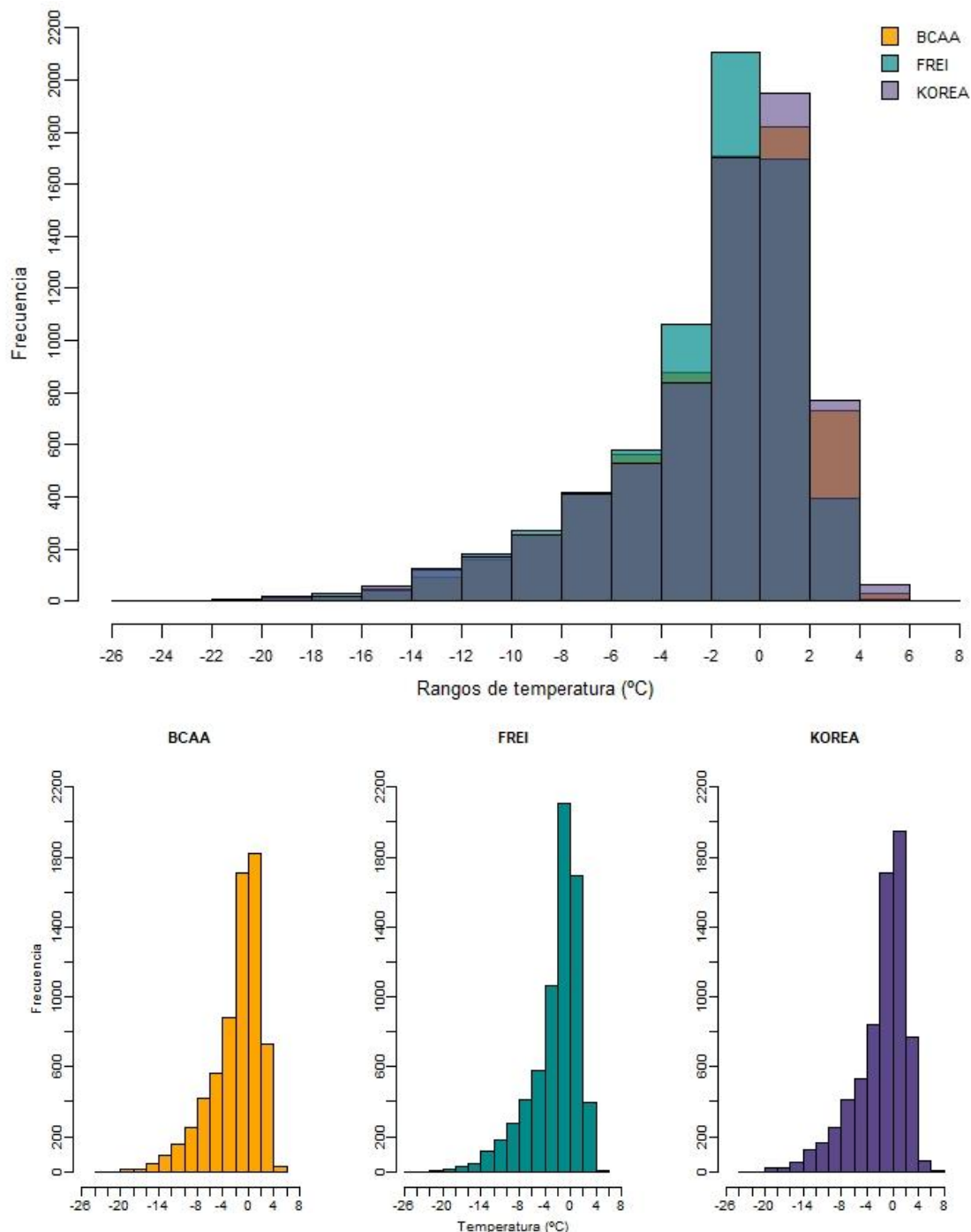


Figura 17. Histograma de la temperatura media diaria del aire para las tres estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta). En la imagen superior se visualiza la superposición de los tres histogramas, y en las imágenes inferiores se observan los tres por separado.

Por su parte, la presión atmosférica mostró una distribución más próxima a la normalidad, aunque con un valor $p < 0.05$ (Test de Shapiro-Wilk, $p\text{-value} = 0.01$). Las tres series mostraron un comportamiento muy similar, con la mayor frecuencia (superior a 1.100) de datos comprendida en el rango de presión entre 985 y 990 hPa, y las menores frecuencias (menores a 3) correspondientes al rango de presión 940 a 950 hPa (Fig. 18). Del gráfico se desprende, a su vez, una mayor frecuencia de valores extremos altos de presión que de valores bajos. Esta distribución más “Gaussiana” de los datos es coherente también con la visualizada anteriormente en la Fig. 16, donde los picos de presión son relativamente parejos a un lado y otro de la media.

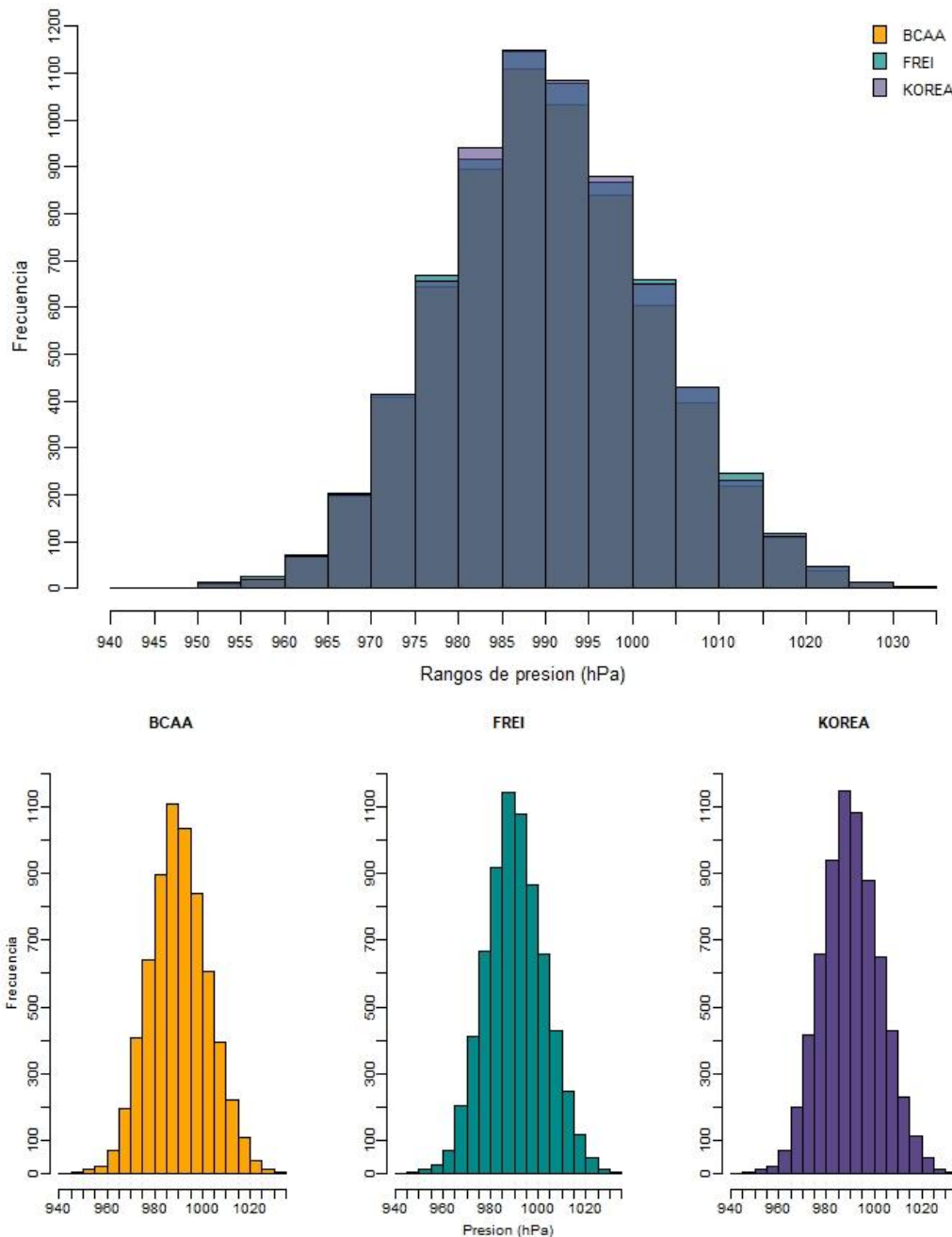


Figura 18. Histograma de la presión atmosférica media diaria para las tres estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta). En la imagen superior se visualiza la superposición de los tres histogramas, y en las imágenes inferiores se observan los tres por separado.

3.3.1 Modelo de regresión lineal

Posteriormente se evaluó el grado de dependencia entre las variables registradas en BCAA y las registradas en las estaciones extranjeras (BCAA-FREI y BCAA-KOREA). Para ello se ajustó un modelo lineal en RStudio, mediante las funciones **ggplot** y **geom_smooth**, aplicando el método **lm** (del inglés, *linear model*) y ubicando a BCAA como variable independiente (x), y a FREI y KOREA como variables dependientes (y). En ambas variables el modelo explicó una proporción estadísticamente significativa y sustancial de la varianza, con elevados coeficientes de determinación (R^2), siendo 0.97 para la temperatura del aire (tanto para FREI como para KOREA) y 0.99 para la presión atmosférica, también para ambas estaciones (Fig. 19, Tabla 6).

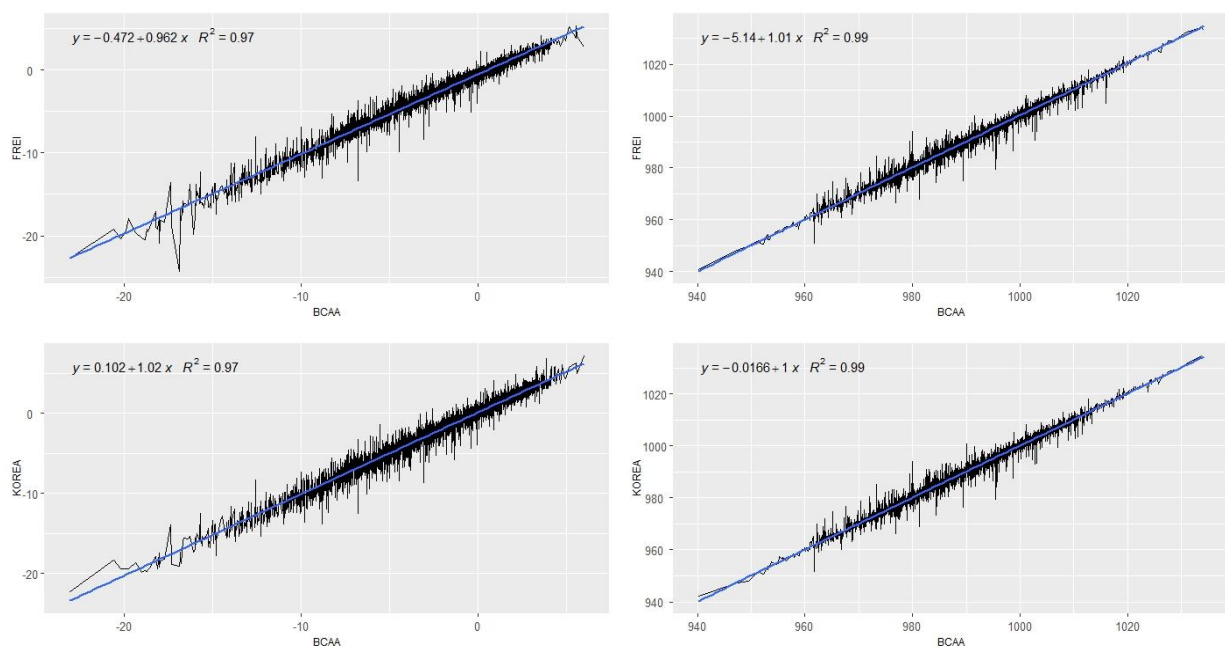


Figura 19. Modelos de regresión lineal ajustados (línea azul) para las medias diarias de temperatura (izquierda) y presión (derecha): relación FREI ~ BCAA (superior) y KOREA ~ BCAA (inferior).

Tabla 6. Coeficientes estadísticos de los modelos de regresión lineal ajustados para cada una de las variables entre las estaciones.

	Temperatura del aire		Presión atmosférica	
	FREI ~ BCAA	KOREA ~ BCAA	FREI ~ BCAA	KOREA ~ BCAA
R²	0.97	0.97	0.99	0.99
F	2.47e+05	2.02e+05	3.98e+05	4.32e+05
p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
R² adj.	0.97	0.97	0.98	0.98
intercepto (BCAA = 0)	-0.47	0.10	-4.26	0.87
IC	95%	95%	95%	95%

3.3.2 Correlación

Finalmente, se realizó una correlación lineal entre las estaciones (BCAA-FREI y BCAA-KOREA) para corroborar la relación registrada previamente en las regresiones lineales. Si bien la presión se mostró más próxima a una distribución normal, el p-valor (0.01) del Test de Shapiro-Wilk fue inferior a 0.05, por lo que se rechazó la hipótesis nula, y se consideró la no normalidad de la distribución. Por tal motivo, se optó por el uso del test estadístico no paramétrico Rho de Spearman (ρ) para ambas variables. Éste es un coeficiente de correlación de rangos, equivalente al coeficiente de correlación producto-momento (r) de Pearson (el cual exige una distribución normal), que mide la fuerza de la asociación entre dos variables, donde el valor $\rho = 1$ significa una correlación positiva perfecta y el valor $\rho = -1$ significa una correlación negativa perfecta. Para el tratamiento de los datos faltantes se utilizó el método **complete** que frente a la ocurrencia de datos faltantes, elimina dichas filas de la matriz. Si bien este método reduce la cantidad de datos disponibles para realizar la correlación, es el más adecuado puesto que los otros métodos posibles realizan una eliminación por pares de observación, lo que genera vectores que pueden variar en función de su emparejamiento, por lo que las correlaciones reportadas no son comparables porque se calculan contra diferentes vectores. De este modo, se resume en la Tabla 7 la cantidad de datos utilizada para cada correlación.

Tabla 7. Cantidad de datos utilizada para la correlación de la temperatura media diaria del aire y la presión atmosférica media diaria entre las tres estaciones (BCAA, FREI, KS). Ambas variables contienen un total de 6.915 datos.

	Temp. Aire	Presión atm.
BCAA / FREI	6.725	6.608
BCAA / KS	6.724	6.606
FREI / KS	6.914	6.910

En la Fig. 20 puede observarse los gráficos de correlación entre las tres estaciones para las variables temperatura del aire y presión atmosférica. El panel superior derecho muestra el coeficiente de correlación de rango de Spearman entre las variables de cada estación, el panel inferior izquierdo muestra los diagramas de dispersión y la diagonal los gráficos de densidad.

En todos los casos la correlación de rango de Spearman fue positiva, estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$) y muy grande, con un $p < 0.001$. En el caso de la temperatura del aire, la correlación fue levemente mayor con FREI ($\rho = 0.985$) que con KS, ocurriendo lo opuesto para la presión atmosférica, donde la correlación fue sutilmente mayor con KS ($\rho = 0.992$) que con FREI. En los gráficos de densidad se visualiza nuevamente la distribución asimétrica y sesgada hacia la derecha en la temperatura del aire, y la distribución más próxima a la normalidad de la presión atmosférica. En lo que respecta a los gráficos de dispersión, la tendencia se visualiza más claramente en la presión atmosférica y con los puntos más próximos a la diagonal (línea de regresión) que en la temperatura del aire, lo que podría deberse también a que la variable presión cuenta con menor cantidad de datos. En la presión atmosférica se observa, a su vez, cómo la correlación FREI-KOREA es sustancialmente mayor ($r = 0.997$) que la observada en las correlaciones con BCAA, tanto para FREI como para KOREA.

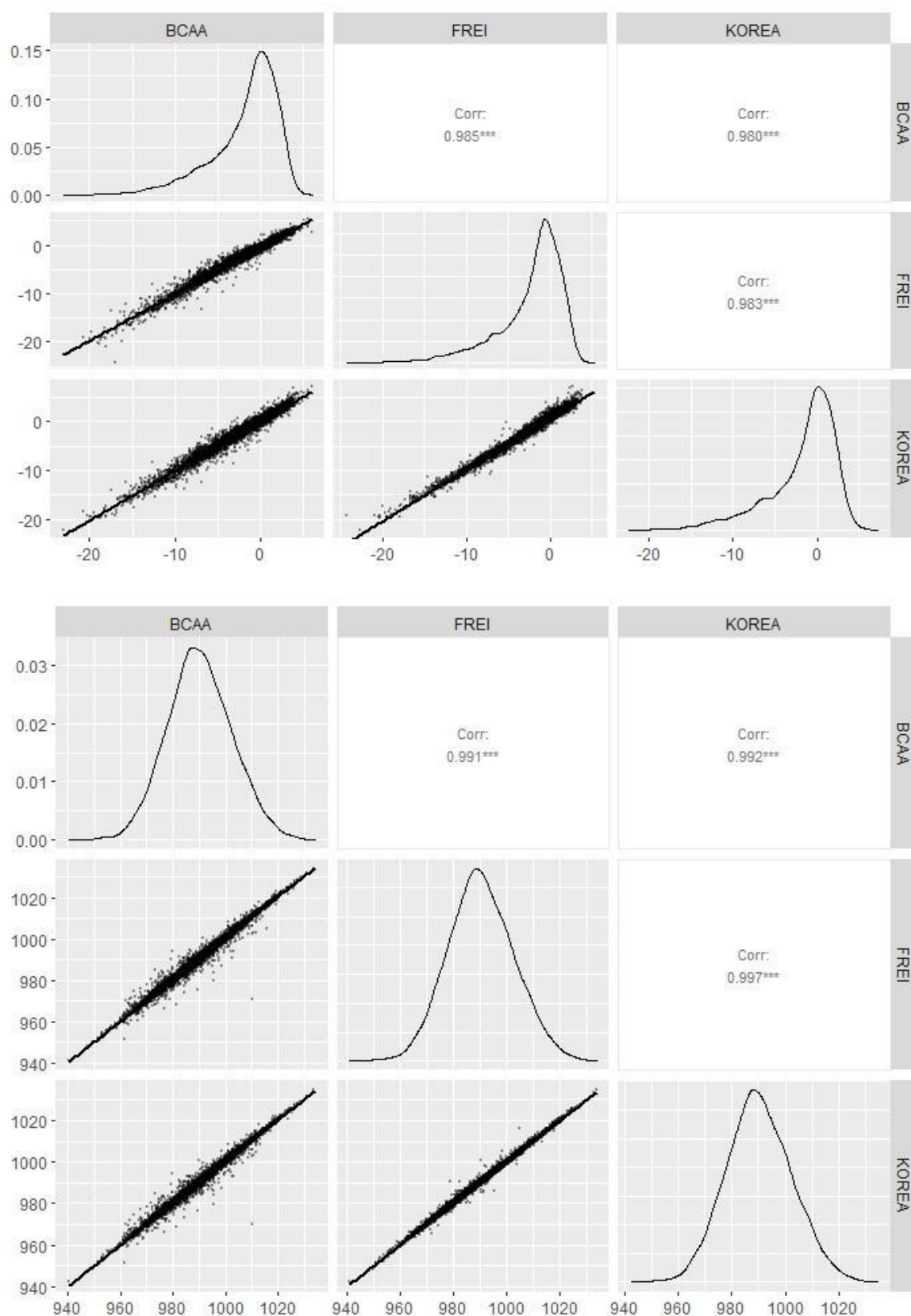


Figura 20. Gráficos de correlación entre las tres estaciones para la variable temperatura del aire (superior) y presión atmosférica (inferior): Base Científica Antártica Artigas (BCAA), C.M.A. Eduardo Frei Montalva (FREI) y King Sejong (KS).

3.4 Análisis de datos faltantes

Tras constatar una alta y significativa correlación entre BCAA y ambas estaciones (FREI y KOREA) en ambas variables, se procedió a completar los datos faltantes de BCAA con una media de los datos de FREI y KOREA para el mismo día y horario, utilizando la función **rowMeans** del paquete **base** en RStudio. Se eligió este método puesto que, al tratarse de registros cada 6 horas, en un entorno tan variable como el antártico, y considerando además que muchos de los gaps de datos faltantes se componen de varios registros consecutivos, utilizar medias móviles o interpolaciones podría dar lugar a un rellenado poco confiable. Por tal motivo, a la hora de elegir un criterio se ponderó la existencia de las dos series próximas espacialmente, cuya correlación es muy alta.

Luego de aplicar dicha función a la serie de BCAA, la misma quedó completa y con un total de 27.760 datos. Se detalla en la tabla a continuación el nuevo resumen estadístico de la serie.

Tabla 8. Resumen estadístico de las variables temperatura del aire y presión atmosférica para la estación Base Científica Antártica Artigas (BCAA) luego de pasar por el proceso de complementación de datos faltantes.

	Temperatura [°C]	Presión [hPa]
Cant. obs.	27660	27660
Mínimo	-23.5	932.3
1er cuartil	-3.6	981.7
Mediana	-0.7	990.0
Media	-1.9	990.2
3er cuartil	0.9	998.6
Máximo	9.1	1036.4
NAs	0	0

Al comparar las tablas 5 y 8, se observa que los parámetros principales no presentan cambios significativos luego de realizada la interpolación.

3.5 Datos de modelos de circulación global y productos satelitales

Para el análisis de la circulación atmosférica se utilizaron también datos de reanálisis, considerados como observaciones que pueden utilizarse con los mismos fines (Parker 2016; Tetzner et al. 2019). Los datos de reanálisis se construyen mediante la combinación de observaciones meteorológicas pasadas (*in situ* y satelitales) con

modelos numéricos globales atmosféricos, de modo de estimar las condiciones meteorológicas del pasado con la mayor precisión posible (Jones et al. 2016; COPERNICUS - ECMWF 2020). Lo que se obtiene de estos modelos es una representación cuadriculada con una cobertura espacial y temporal completa del estado atmosférico (Nygard et al. 2016). Este conjunto de datos se vuelve de gran importancia particularmente en la Antártida, ya que los datos *in situ* son relativamente pobres debido a la escasa red de estaciones de observación.

En los últimos años se han publicado una serie de nuevos conjuntos de datos de reanálisis globales: el Reanálisis del Sistema de Predicción Climática (CFSR) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), el Reanálisis Provisional del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF) (ERA), el Reanálisis Japonés de 25 años (JRA-25) y el Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones (MERRA) (Bracegirdle & Marshall 2012).

En el presente trabajo se utilizaron datos mensuales del proyecto NCEP/NCAR Reanalysis de las variables temperatura, presión y viento en superficie, y altura geopotencial para el nivel de 500 hPa (z500). Los mismos están distribuidos espacialmente en una grilla de 0.25° de latitud por 0.25° de longitud, y corresponden a la región comprendida entre las latitudes 30° y 90°S, y longitudes -180°W y 180°E. Los datos fueron descargados del sitio web del Physical Sciences Laboratory (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>), de la NOAA (del ingles, *National Oceanic and Atmospheric Administration*), servicio de Estados Unidos.

CAPÍTULO 4.

CLIMATOLOGÍA DE LA ISLA REY JORGE

En el capítulo anterior se realizó un exhaustivo control de calidad a las series temporales observadas de las variables temperatura y presión atmosférica, y se realizó también una interpolación con datos provenientes de estaciones meteorológicas cercanas (FREI y KS) para minimizar los datos faltantes en las series de BCAA. En el presente capítulo se presentará el análisis climatológico de las series obtenidas, analizando la variabilidad en diferentes escalas: interanual, anual, estacional, trimestral y diaria.

Para realizar el análisis estacional se dividió el año en función de la variabilidad anual de radiación solar que ocurre en esta región polar. Se trabajó con dos épocas de 6 meses de duración cada una, las cuales están asociadas a cambios en la temperatura media y en la luminosidad acorde a lo representado en la Fig. 21: la época “Cálida” abarca el período comprendido entre setiembre y febrero (con 12 o más horas de luz), y la época “Fría” los meses de marzo a agosto (con 12 o menos horas de luz).

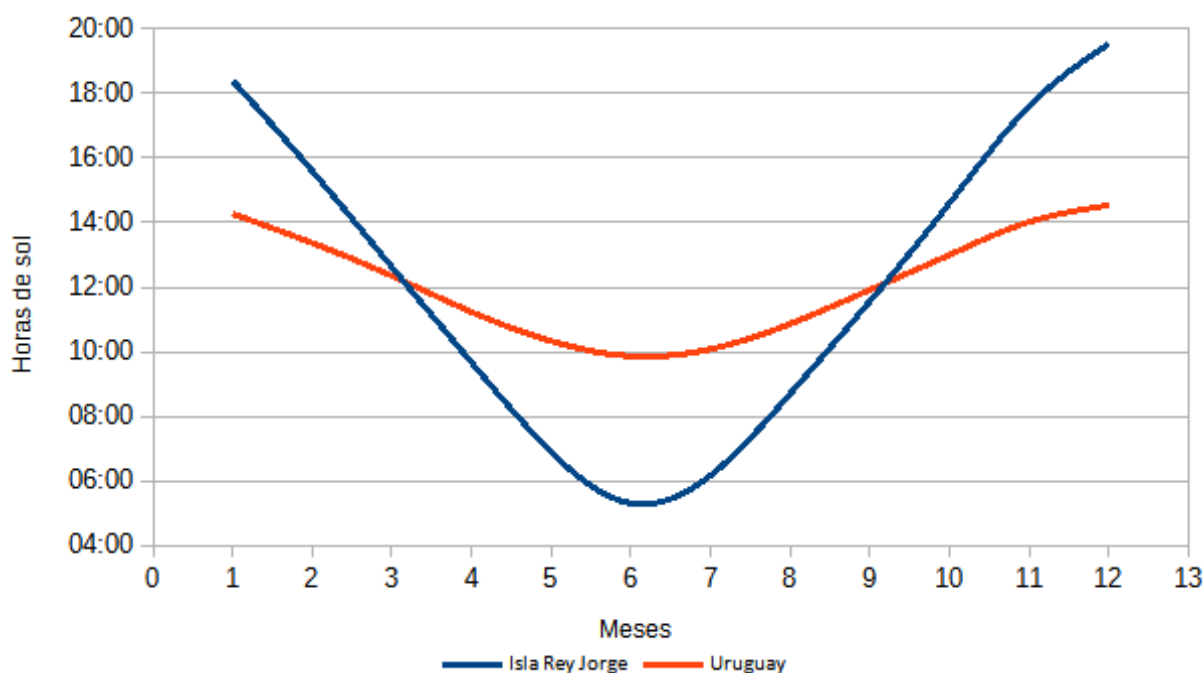


Figura 21. Variación anual en la duración media del día (horas de sol) para la Isla Rey Jorge (azul) y Uruguay (rojo). Datos obtenidos de: <https://www.datosmundial.com> (Uruguay) y <https://sunrise.maplogs.com> (Isla Rey Jorge).

4.1 Presión atmosférica

Como se vio en la sección 3 del capítulo 3, la presión atmosférica mostró una distribución muy próxima a la normal. Con el paquete *moments* (Lukasz Komsta and Frederick Novomestky, 2022) se calculó una curtosis de 2.99 (prácticamente 3), y una asimetría de 0.022, por lo que se considera aproximadamente simétrica, y coincidente a su vez con la distribución de FREI y KOREA. La mayor frecuencia de valores (2.658) se encuentra entre los 990 y 992 hPa, y las menores frecuencias (0-2) se registraron en el rango 932 a 944 hPa (Fig. 22). El máximo valor registrado fue de 1036.4 hPa y el mínimo fue de 932.3 hPa. Del gráfico se desprende, a su vez, una mayor frecuencia de valores extremos altos de presión que de valores bajos. Esta distribución más “Gaussiana” de los datos es coherente también con la visualizada anteriormente en la Fig. 16, donde los picos de presión son relativamente parejos a un lado y otro de la media.

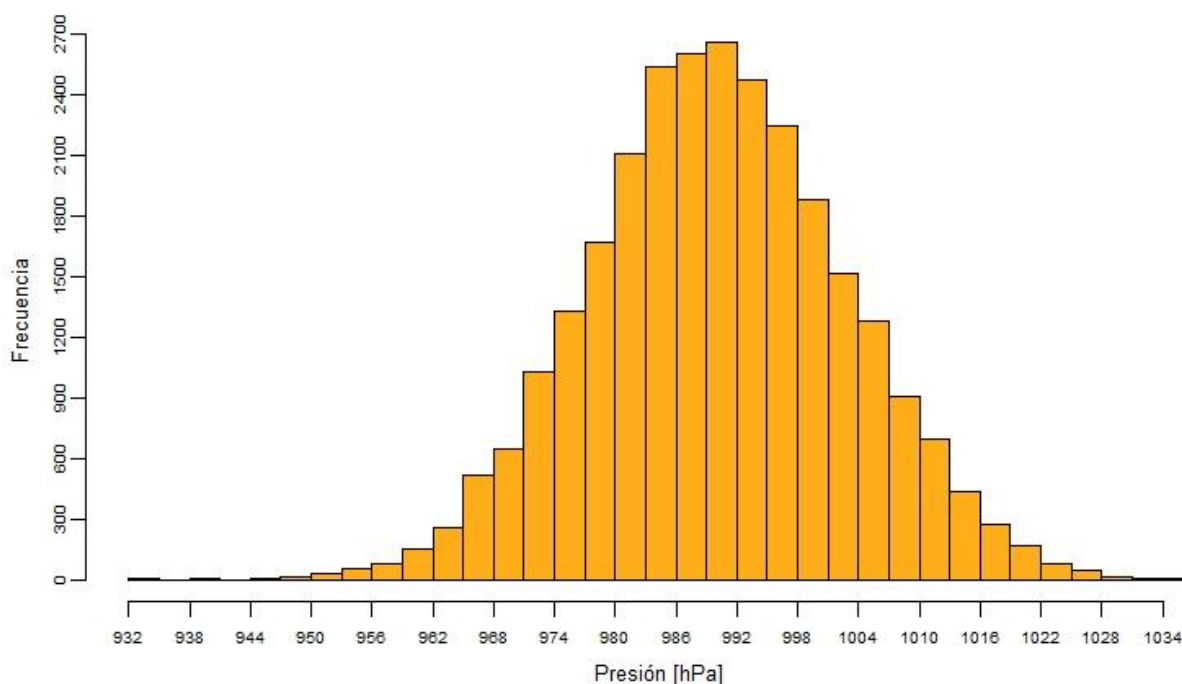


Figura 22. Distribución de frecuencias de presión atmosférica [hPa] horaria para la estación BCAA.

La mínima de presión (932.3 hPa) ocurrió a las 6 UTC el 17/08/2015 y fue también registrada por FREI y KOREA. Duró tan solo un día, pasando de casi 949 hPa el 16/08 a las 18 UTC a 932 hPa durante la mitad del 17/08 para culminar el día con una presión de 945 hPa. La máxima (1036.4 hPa) ocurrió el 08/09/2000 a las 12 UTC, y duró 4 días, comenzando a aumentar el 06/09 (1014.9 hPa) y culminando el 09/09 (1014.6 hPa). Dicho período estuvo marcado por oscilaciones en la temperatura del aire, con valores que variaron entre -2.1°C y una mínima diaria de -11.6°C el 08/09, coincidente con el pico máximo de presión.

● Análisis a escala anual

La presión atmosférica se caracteriza por presentar un ciclo anual comprendido entre valores medios mensuales de 986 y 994 hPa, donde los valores más altos ocurren en la época fría (durante los meses de mayo a setiembre), con valores superiores a la media de la serie (990 hPa), y los valores más bajos ocurren en la época cálida (de octubre a abril) (Fig. 23). Las mayores diferencias, que aún así son pequeñas, se observan entre los trimestres junio/julio/agosto y octubre/noviembre/diciembre, con presiones mayores y menores respectivamente. De octubre a diciembre se mantiene en valores medios más bajos, hasta que en enero comienza a aumentar. Entre los meses de abril y mayo se observa un marcado aumento de la presión, con valores medios que pasan de 990 a 994 hPa, y entre los meses de setiembre a octubre se visualiza una marcada caída en la presión atmosférica, con una disminución media de aproximadamente 7 hPa, pasando de 994 a casi 986 hPa. Se observa a su vez dos marcados picos de presión en los meses de mayo y setiembre, ambos entre 993 y 994 hPa.

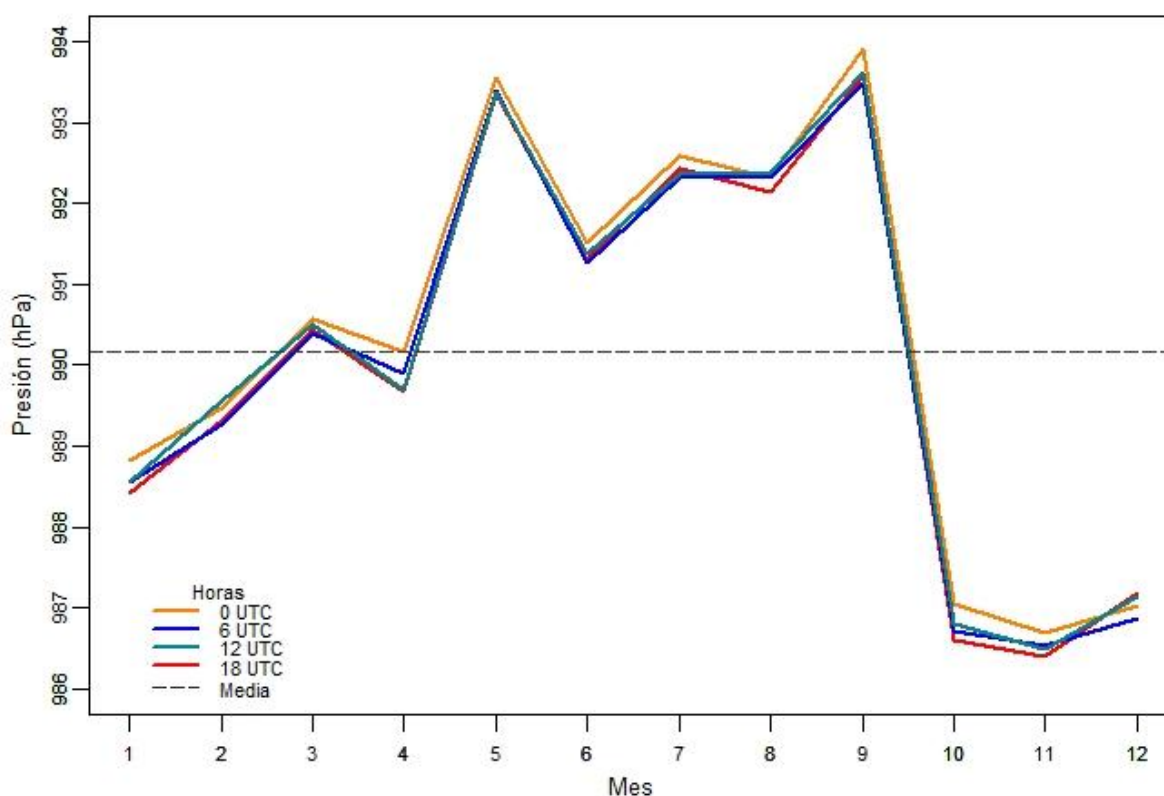


Figura 23. Ciclo anual de la presión media mensual para cada horario: 0 UTC (naranja), 6 UTC (azul), 12 UTC (verde) y 18 UTC (rojo). La línea de guiones representa la media de la serie.

Estos cambios de presión entre valores más altos en los meses fríos y valores más bajos en los meses cálidos se observan también en la salida del reanálisis NCEP-NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996) (<https://psl.noaa.gov/>) para la presión media mensual a nivel del mar (mslp, del inglés *mean sea level pressure*) para el área

comprendida entre los 55-90°S (Fig. 24). Para este caso se consideró la época cálida corrida un mes hacia adelante para tomar en cuenta la caída de presión que ocurre entre septiembre y octubre. En la salida del reanálisis se observa con claridad el cinturón de bajas presiones (líneas de contorno color violeta) que se localiza en la zona costera de la Antártida (Romanova & Romanov 2020), y cómo, en los meses más fríos (mayo a setiembre), se observa que la Isla Rey Jorge se localiza entre 990 y 995 hPa. Mientras que en los meses más cálidos (octubre a abril), el cinturón se mueve y la isla queda bajo presiones un poco menores, entre 985 y 990 hPa.

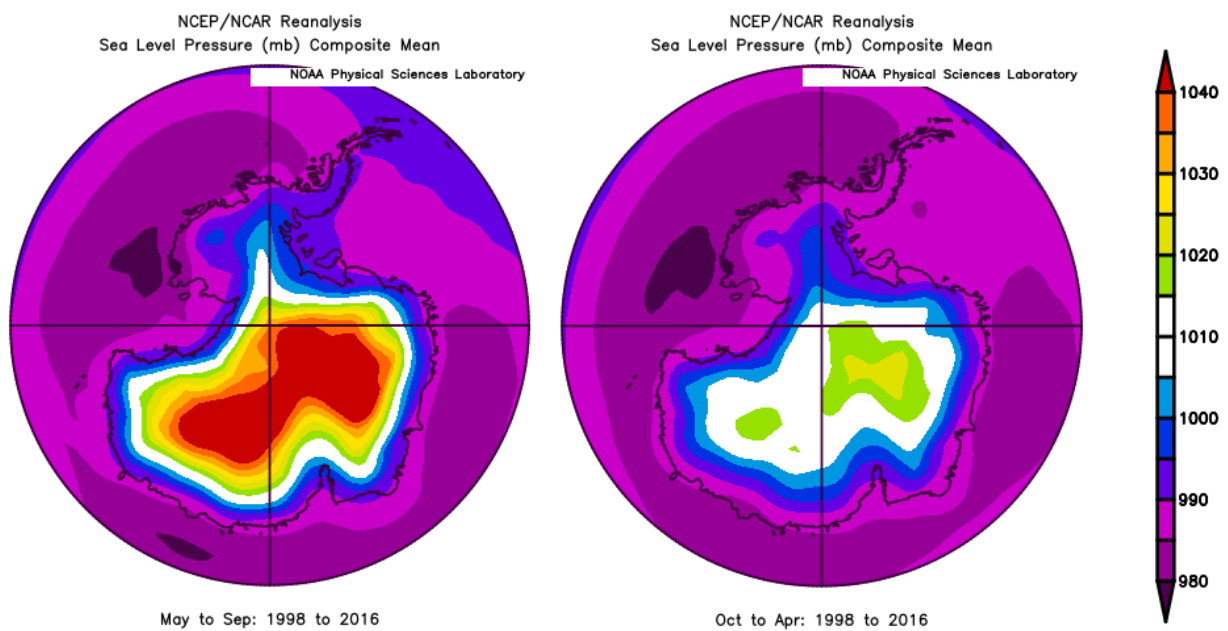


Figura 24. Presión media del nivel del mar para la región 60-90°S en el período frío (mayo - setiembre, imagen de la izquierda) y el período cálido (octubre - abril, imagen de la derecha). Contornos coloreados a intervalos de 5 hPa. Fuente: Physical Sciences Laboratory, NOAA. NCEP-NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996) Monthly Averages Data.

Se observa en la presión poca variabilidad media diaria, existiendo poca diferencia entre los 4 horarios. Asimismo, los meses de julio, agosto y setiembre son los que presentan mayor desviación estándar, siendo a su vez el horario 6 UTC el que presentó un mayor valor (STD media para el trimestre = 14.52), lo que denota una mayor variabilidad, en contraste con enero, mes que presentó menor desviación estándar en cualquiera de los cuatro horarios (STD media para enero = 8.22) (Fig. 25). A partir de la figura 25 se visualiza que para todos los horarios, la media y la mediana son muy similares durante todos los meses: en el primer cuatrimestre del año son prácticamente iguales, durante los meses fríos la mediana es levemente mayor que la media (la mayoría de los valores se ubica por encima de la media), y durante los últimos 3 meses la mediana es inferior a la media (la mayoría de los valores es inferior a la media).

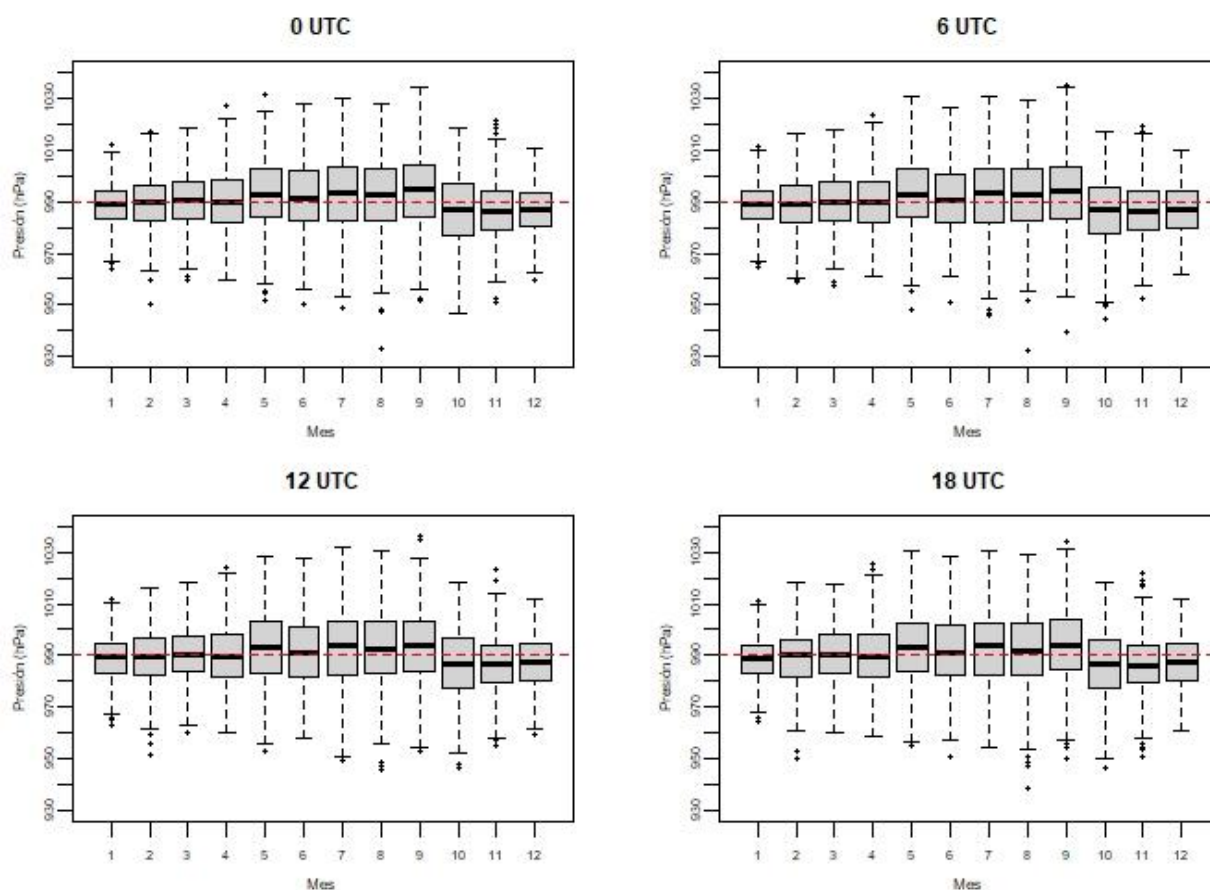


Figura 25. Distribución anual de la presión atmosférica por horario (0, 6, 12 y 18 UTC). La línea punteada roja representa la media de la serie.

En lo que respecta a las anomalías anuales de presión, se presenta bastante pareja la serie, con 11 años con anomalías positivas y 8 años con anomalías negativas, siendo los años 2003 y 2014 los más próximos a la condición media. El año 2000 presentó la mayor anomalía positiva, de 4.1 hPa, y el año 2015 el de mayor anomalía negativa, de 3 hPa (Fig. 26).

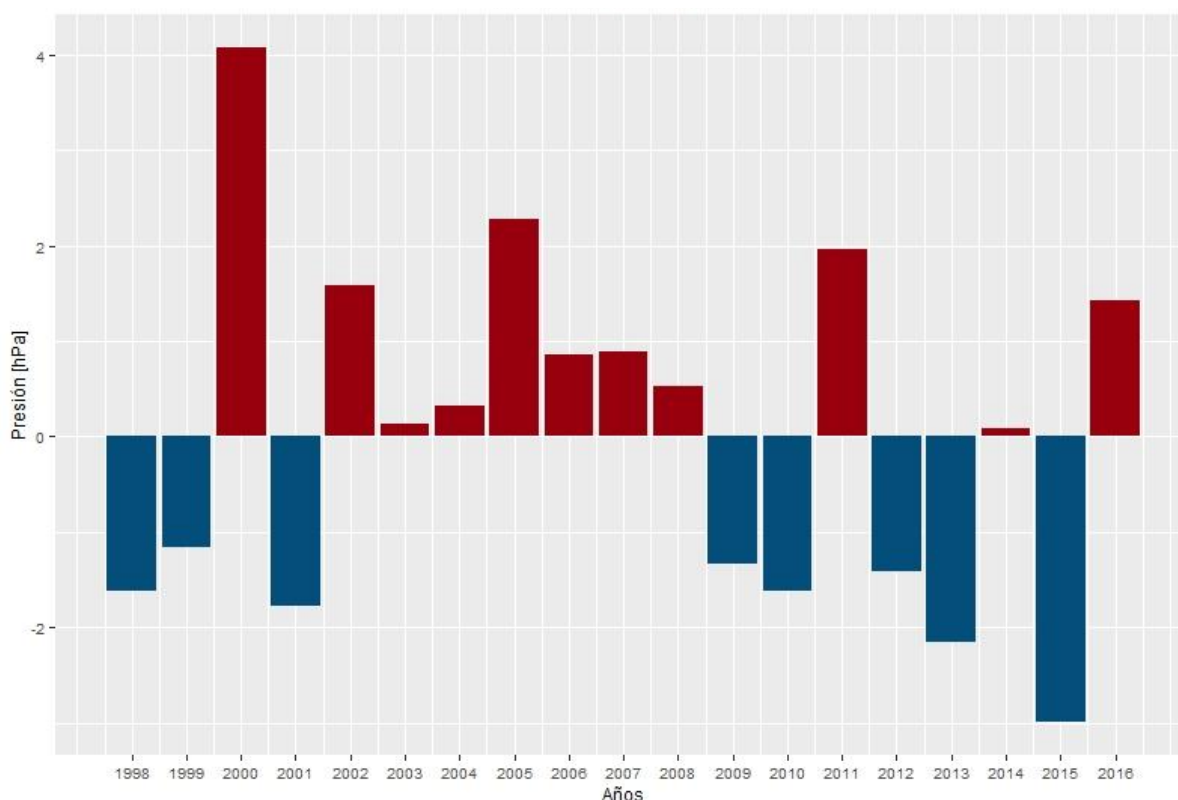


Figura 26. Anomalías anuales de presión. Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

• Análisis a escala estacional

En la Fig. 27 se observa la distribución de los valores de presión para ambas épocas. Si bien la misma es muy similar y prácticamente normal en ambas épocas, la época fría presenta una leve asimetría negativa (-0.044), lo que implica una distribución sesgada hacia la izquierda, con mayor frecuencia de valores extremos más bajos de presión (inferiores a 945 hPa). Por el contrario, la época cálida tiene una asimetría prácticamente nula (0.012), por lo que se presume simétrica.

El rango de presiones en ambas épocas es muy similar, si bien es levemente mayor en la época fría (932 a 1032 hPa) que en la cálida (940 a 1036 hPa). Las medias estacionales de la época fría y cálida son 991.6 y 988.6 hPa respectivamente. A su vez, ambas épocas presentan la mayor frecuencia de valores en el rango 985 a 990 hPa, siendo ésta mayor en la época cálida. Sin embargo, en la época fría las frecuencias están mayormente distribuidas, observándose una mayor frecuencia de presiones más altas.

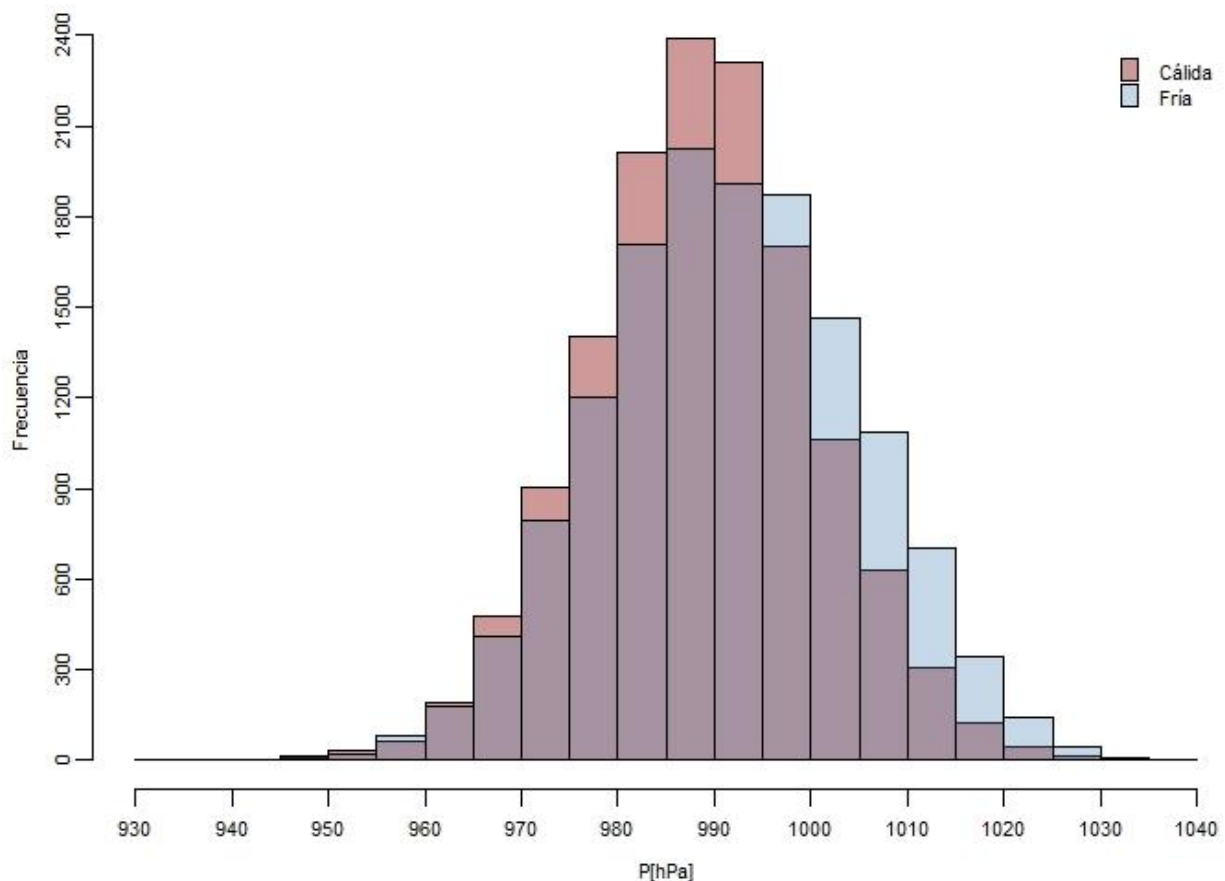


Figura 27. Distribución de frecuencias de presión atmosférica horaria para la época cálida (rosado) y la época fría (celeste).

Las Fig. 28 y 29 muestran la variabilidad interanual de la presión media estacional. En ellas puede observarse, tal como se adelantó anteriormente, que las medias de presión son menores durante la época cálida (casi 989 hPa) que durante la fría (casi 992 hPa). Si bien ambas series comparten ciertos patrones, como el marcado pico de presión en el 2000 (más marcado en la época cálida), la variabilidad en ambas épocas presenta ciertas diferencias. En la cálida se observa una marcada variación entre los primeros años de la serie (1999 a 2006 aproximadamente), donde los valores se alternan entre picos de mayores y menores valores de presión, presentando el resto de la serie una menor variación, con valores que rondan la media. Por su parte, en la época fría se observa una menor variabilidad a lo largo de la serie, con valores más próximos a la media, a excepción de los picos registrados en el 2000 (valores superiores a la media) y 2015 (valores inferiores a la media) (Fig. 28).

Las mayores anomalías positivas de la serie se registraron en los años 2000 (5.27 hPa; época fría) y 2005 (6.01 hPa; época cálida), y las mayores anomalías negativas ocurrieron en los años 2015 (-4.79 hPa; época fría) y 1998 (-3.62 hPa; época cálida) (Fig. 29). En la época fría (Fig. 29, superior) predominan los años con anomalías positivas de presión, mientras que la época cálida (Fig. 29, inferior) se presentó en la mayoría de los años con anomalías negativas de presión. Algunos años (2006, 2008,

2009, 2011, 2012 y 2014) presentan anomalías opuestas en sus épocas: cuando la época fría presenta una anomalía positiva de presión, la época cálida presenta una anomalía negativa, y viceversa.

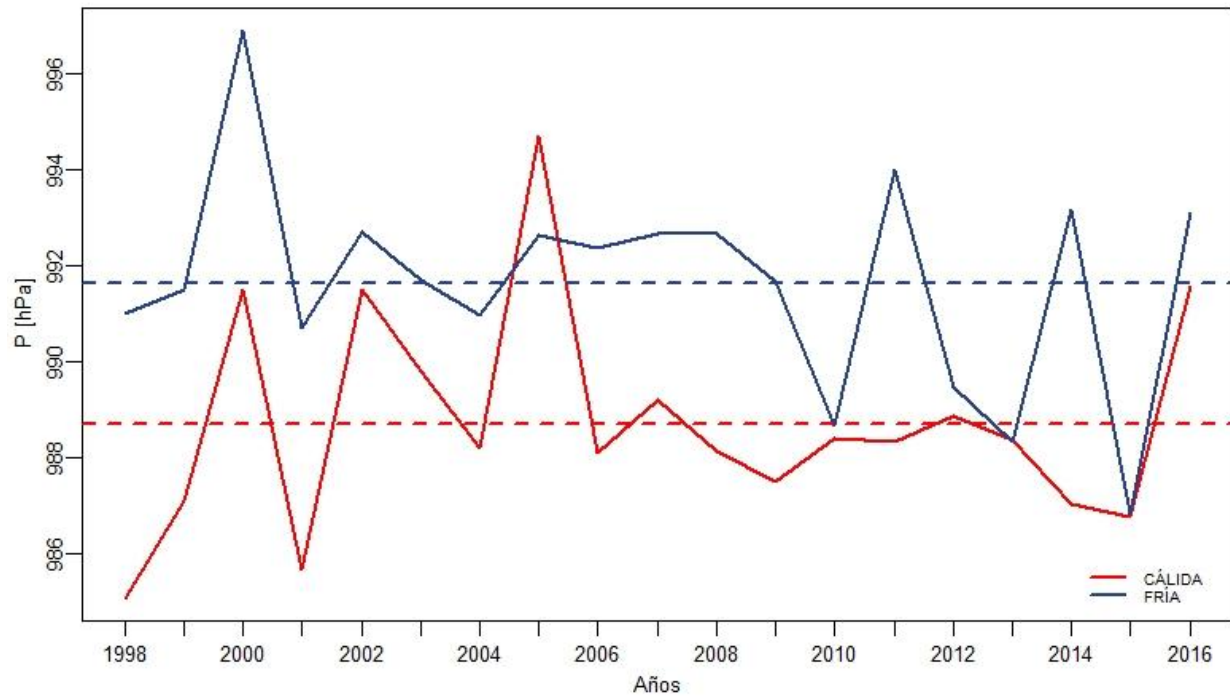


Figura 28. Variabilidad interanual de la presión atmosférica media para la época cálida (rojo) y fría (azul). Las líneas punteadas representan la media climatológica de cada época.

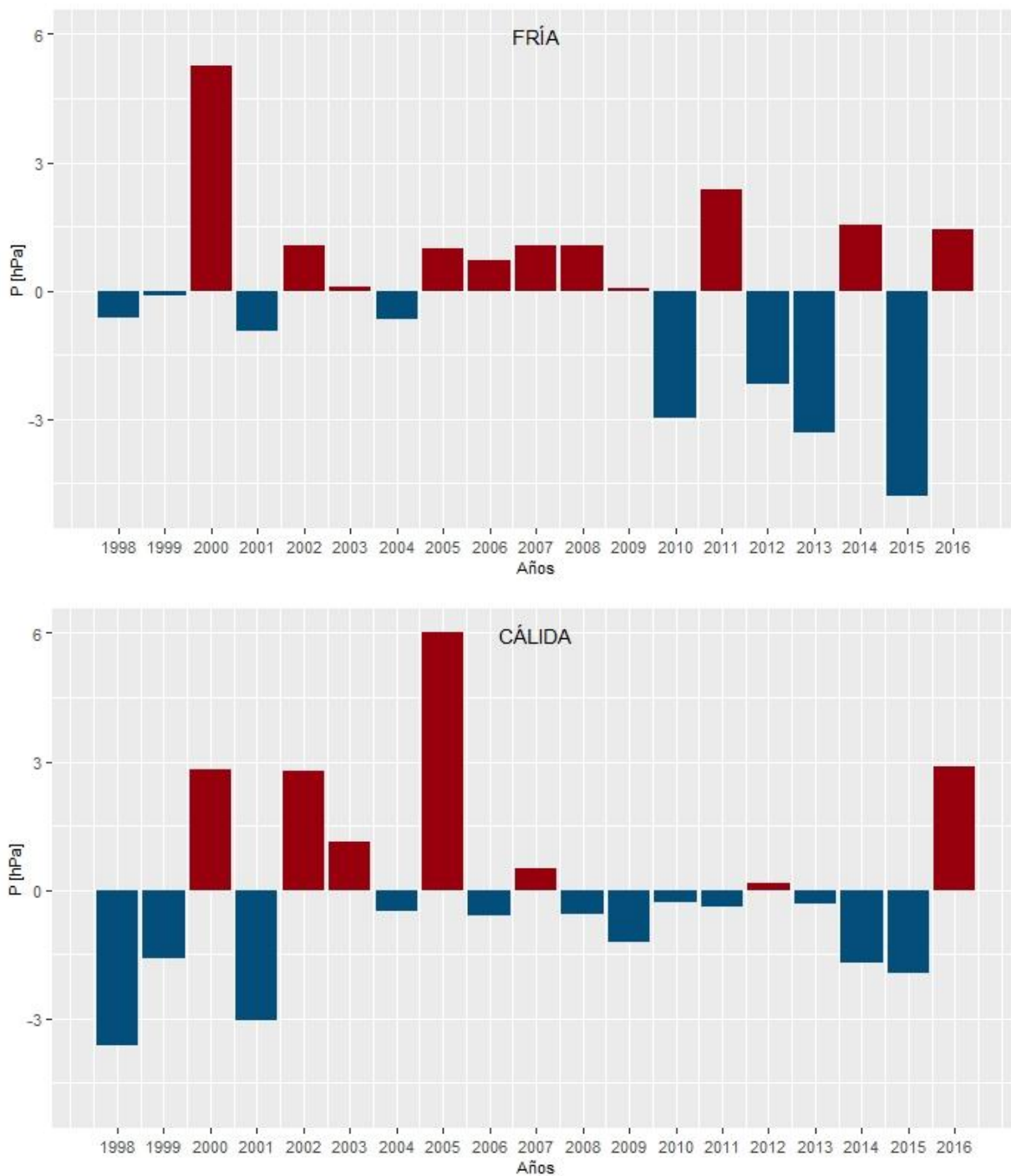


Figura 29. Anomalías de presión para la época fría (superior) y cálida (inferior). Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

Si bien la presión no varía mucho entre una época y otra, es notoria en la Fig. 30 la diferencia en los valores medios de presión entre un día promedio en la época cálida y uno en la época fría. En la primera, la presión media mínima es de 985.6 hPa y la máxima de 992.1 hPa. Por su parte, en la época fría la presión media mínima es de 986.7 hPa y la máxima de 997.1 hPa.

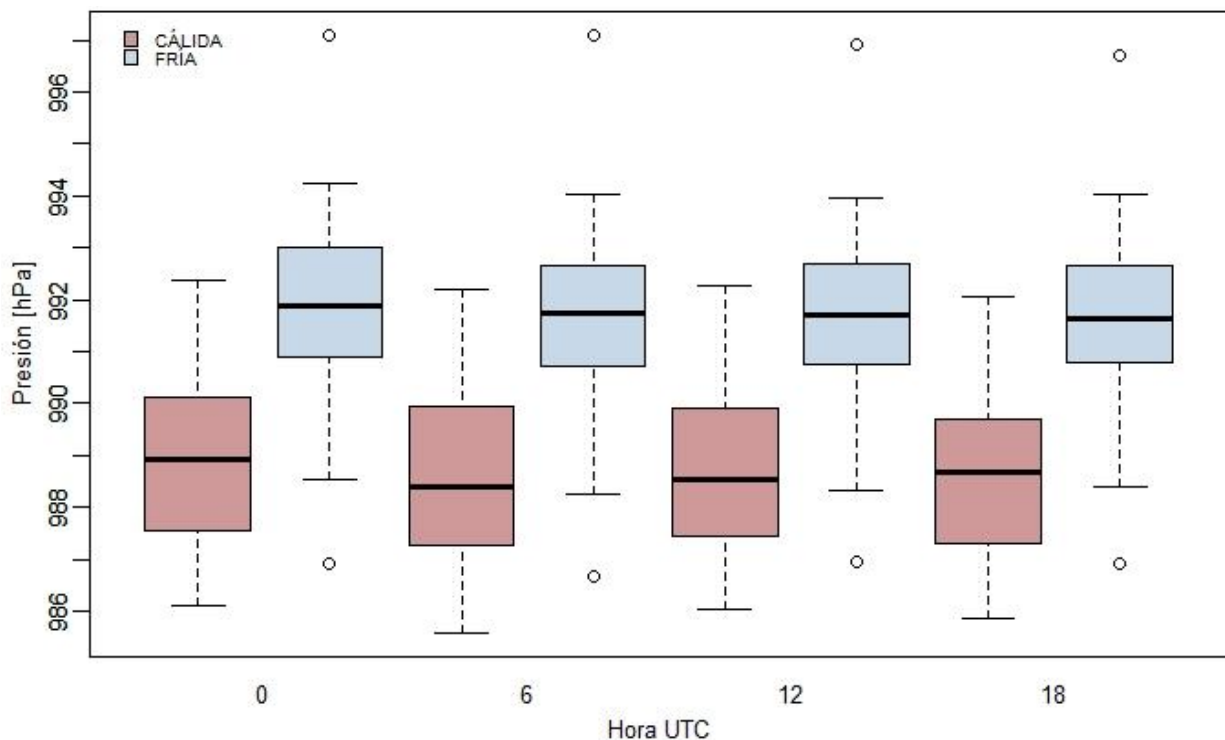


Figura 30. Distribución de los valores diarios de la presión en la época cálida (rosado) y fría (celeste).

• Análisis a escala trimestral

Por último, se realizó un análisis trimestral de ambas variables para observar su comportamiento anual y su variabilidad interanual. Para el análisis de la variabilidad trimestral de la presión se dividió al año en los siguientes trimestres: EFM (enero, febrero y marzo), AMJ (abril, mayo y junio), JAS (julio, agosto y setiembre) y OND (octubre, noviembre y diciembre). Se optó por esta división para poder visualizar de forma separada los meses de setiembre y octubre, puesto que en la Fig. 23 se observó una abrupta caída de presión en esos meses.

La presión media trimestral no presenta un claro patrón, sino que presenta gran variabilidad año a año. Las medias climatológicas trimestrales varían entre 986.9 hPa en OND y 992.8 hPa en JAS, y las medias trimestrales registradas en la serie van de 981.9 a 999.4 hPa. De los 4 trimestres, el que presenta menor variación en torno a la media climatológica es EFM (naranja, Fig. 31), reflejando las menores anomalías en la Fig. 32 (superior izquierda). Se observa que las mayores anomalías, tanto positivas como negativas, ocurren en el trimestre frío de julio, agosto y setiembre (JAS), ocurriendo las mayores anomalías negativas en los años 1998 y 2015 (8 hPa en ambas), y las mayores anomalías positivas en los años 2000 (6.6 hPa) y 2011 (6.2 hPa).

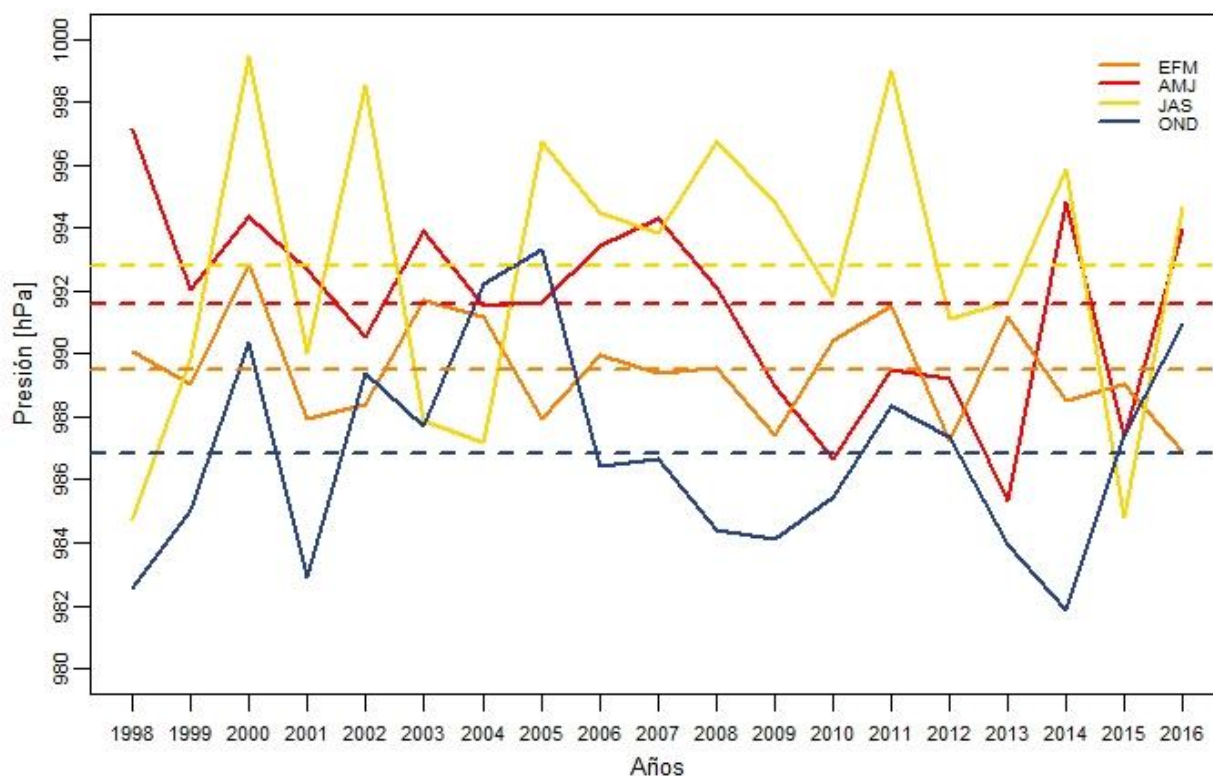


Figura 31. Presión media anual para cada uno de los trimestres: EFM, AMJ, JAS y OND. Las líneas punteadas corresponden a la media climatológica de cada estación.

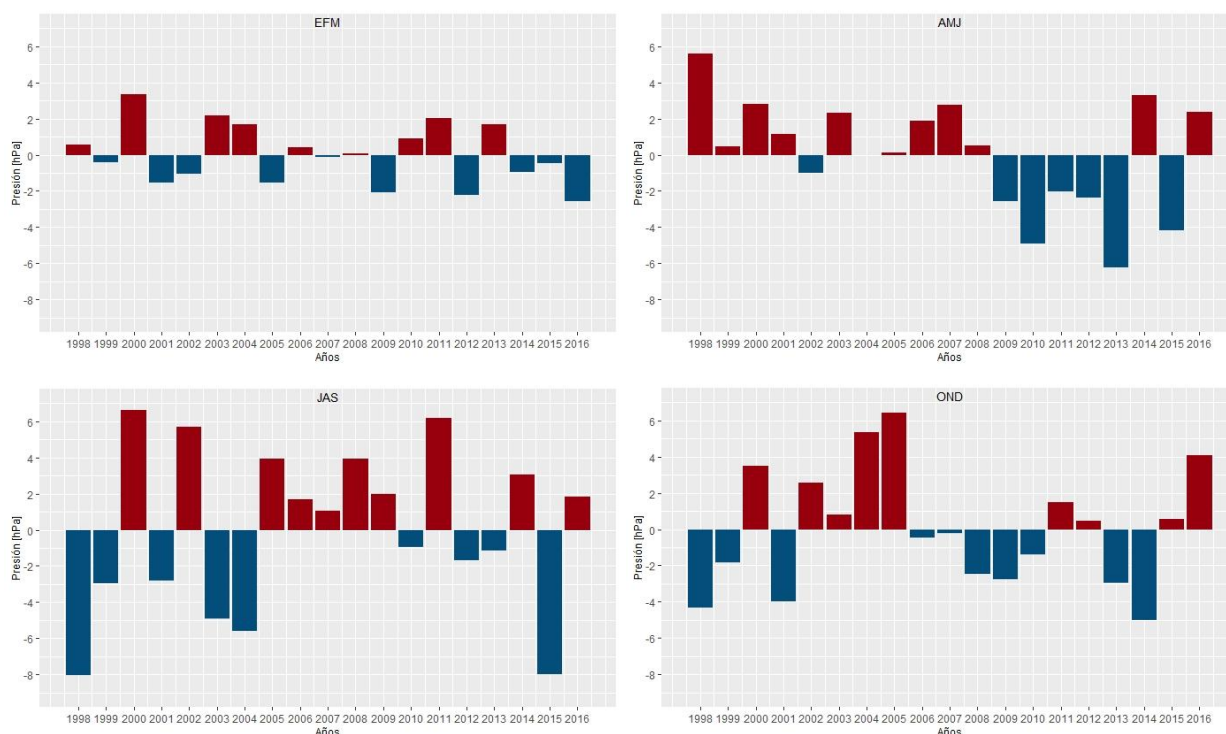


Figura 32. Anomalías de presión para los 4 trimestres: EFM (superior izquierda), AMJ (superior derecha), JAS (inferior izquierda) y OND (inferior derecha). Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

4.2 Temperatura

La temperatura superficial presentó una distribución leptocúrtica, que coincide con la distribución de datos de las series de FREI y KOREA observada en el capítulo anterior. Presenta una asimetría negativa de -1.34, lo que indica una distribución sesgada hacia la izquierda (es decir, la mayor parte de los valores concentrados en el lado derecho de la distribución), y una curtosis de 4.95 (mayor a 3), indicando una distribución con más valores en las colas (atípicos) en relación a una distribución normal (Fig. 33). Asimismo, se realizó una prueba de bondad de ajuste (test de normalidad Jarque-Bera) con la cual se constató que la asimetría y la curtosis no coinciden con una distribución normal ($p\text{-value} < 2.2e^{-16}$).

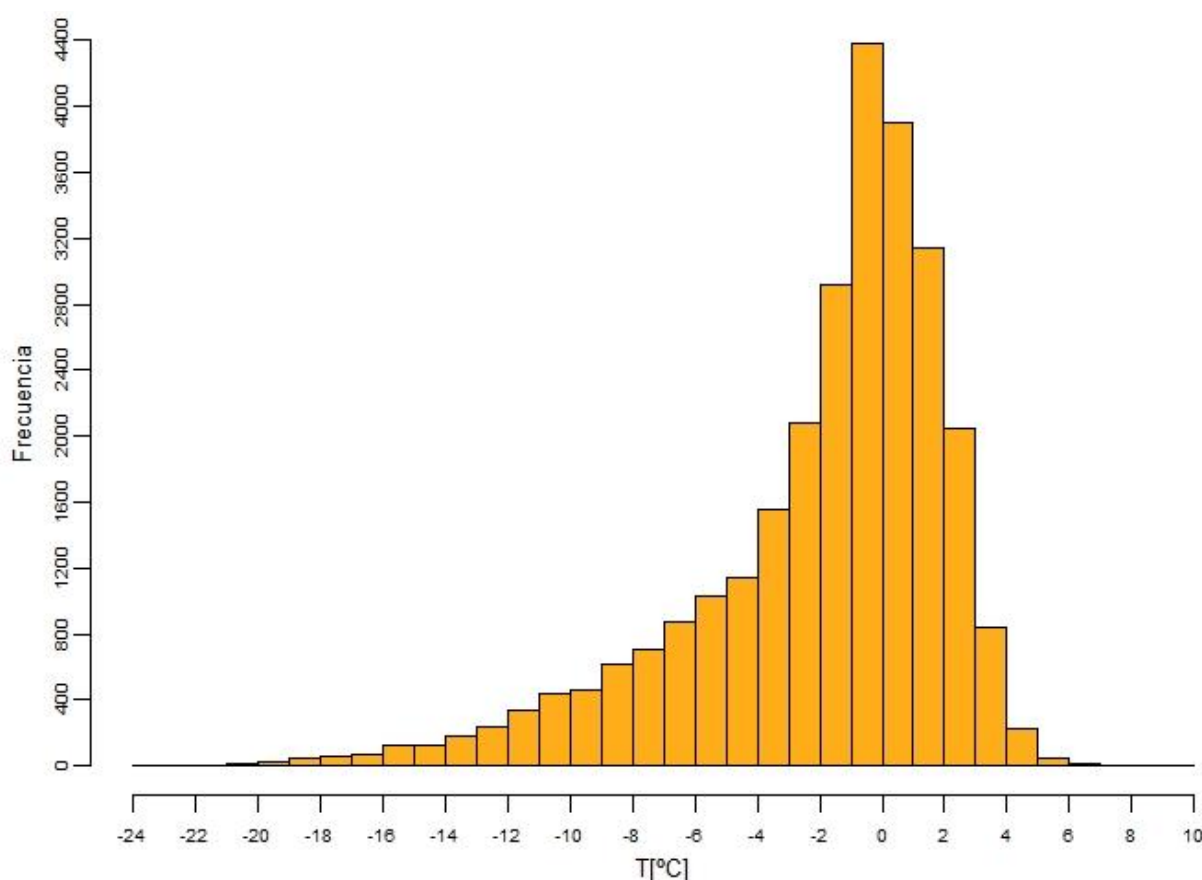


Figura 33. Distribución de frecuencias de temperatura del aire [°C] horaria para la estación BCAA.

A partir de la Fig. 33 se desprende que las mayores frecuencias (superiores a 3.900) se ubican en el rango comprendido entre los -1 y 1°C, y que los valores negativos de temperatura presentan mayores frecuencias que los positivos, algo ya observado con claridad en las gráficas previas de temperatura (Fig. 15), donde la mayor parte de la serie se encontró por debajo de los 0°C.

La temperatura del aire mínima registrada fue de -23.5°C y ocurrió el 15/07/2007, y fue registrada también por FREI y KOREA, aunque siendo unas décimas de grado menor

en estas estaciones. El descenso de temperatura comenzó el día previo (14/07/2007) a las 6 UTC y culminó el 16/07/2007 a las 18 UTC. Este descenso de temperatura coincidió con un aumento de la presión atmosférica; la misma comenzó a aumentar el 14/07/2007 a las 12 UTC (1006.8 hPa) alcanzando su máximo el 15/07/2007 a las 6 UTC (1018.3 hPa), comenzando luego a disminuir gradualmente. El máximo registrado fue de 9.1°C y ocurrió el 25/01/2004, registrándose un valor bastante similar en KOREA.

- **Análisis a escala anual**

El ciclo anual de la temperatura se caracteriza por estar comprendido entre valores medios mensuales de -5.6° y 1.7°C, y una media anual de -1.9°C. Como es de esperar, se observan valores positivos de T en los meses centrales del verano austral, diciembre a marzo, y valores de T negativa desde abril a noviembre, siendo julio el mes que presenta la menor temperatura y enero la T más alta (Fig. 34). Lo que sí es interesante destacar, es la casi ausencia de amplitud térmica diaria en los meses más fríos (abril-julio), donde los promedios mensuales de las 4 observaciones que se utilizaron son aproximadamente iguales. Mientras que a partir del mes de agosto, se observa una mayor amplitud térmica diaria, en particular la media de las 18 UTC (15 hs local) alcanza un valor por encima del resto. Esto se debe a que entre el mes de julio y agosto existe un aumento de aproximadamente 3 horas más de luz por día, lo que genera este cambio en la amplitud térmica diaria. Se observa que julio es el mes que más bajas temperaturas presenta en cualquiera de los cuatro horarios, siendo a su vez mínima a las 12 UTC (9 hrs local) y máxima a las 18 UTC (15 hrs local). A su vez, destaca la poca diferencia entre las medias mensuales para los diferentes horarios durante los meses de mayo y junio, observándose en julio una mayor diferencia entre las 18 UTC y los restantes horarios. En ese mismo período destaca la marcada caída en la temperatura que ocurre de mayo a junio. Se observa también que enero y diciembre son los meses que presentan, en promedio, una mayor amplitud térmica entre las 6 y 18 UTC, siendo de 1.56° y 1.34°C respectivamente. Esto mismo se observa en la Fig. 35, donde en la distribución anual de los valores horarios se evidencia que, en el caso de las 18 UTC, los meses de diciembre a marzo inclusive, presentan el 75% de sus datos positivos.

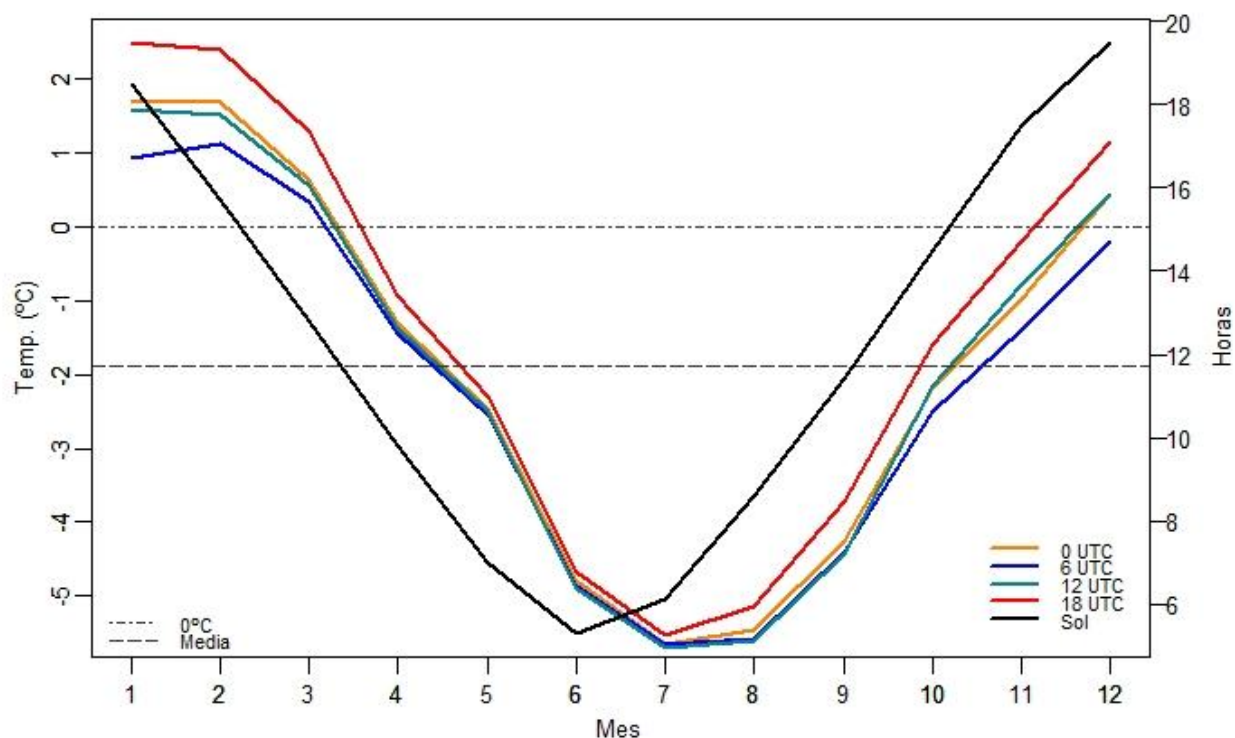


Figura 34. Ciclo anual de la temperatura media mensual para cada horario: 0 UTC (naranja), 6 UTC (azul), 12 UTC (verde) y 18 UTC (rojo). La línea de guiones representa la media de la serie, y la línea guión-punto indica los 0°C. En negro se visualizan las horas medias de sol por mes.

En la Fig. 35, se observa con mayor claridad la gran variabilidad que ocurre durante los meses de junio a setiembre inclusive (siendo julio el máximo), para los 4 horarios. Durante dicho período, las 18 UTC presentan, en promedio, el menor rango intercuartil, mientras que las 6 UTC presentan el mayor. Asimismo, julio es el mes que presenta el mayor rango intercuartil a las 0 UTC (7.10°C). La menor variabilidad se registra para los meses de enero y diciembre. En lo que respecta a la amplitud térmica (diferencia entre máxima y mínima absoluta) para cada uno de los horarios, las 0 UTC fue el horario que mayor amplitud presentó (32.6°C), con una mínima de -23.5°C y una máxima de 9.1°C. Por su parte, las 6 UTC fue el horario que menor amplitud de temperatura presentó (28.5°C), con una mínima de -22.6°C y una máxima de 5.9°C.

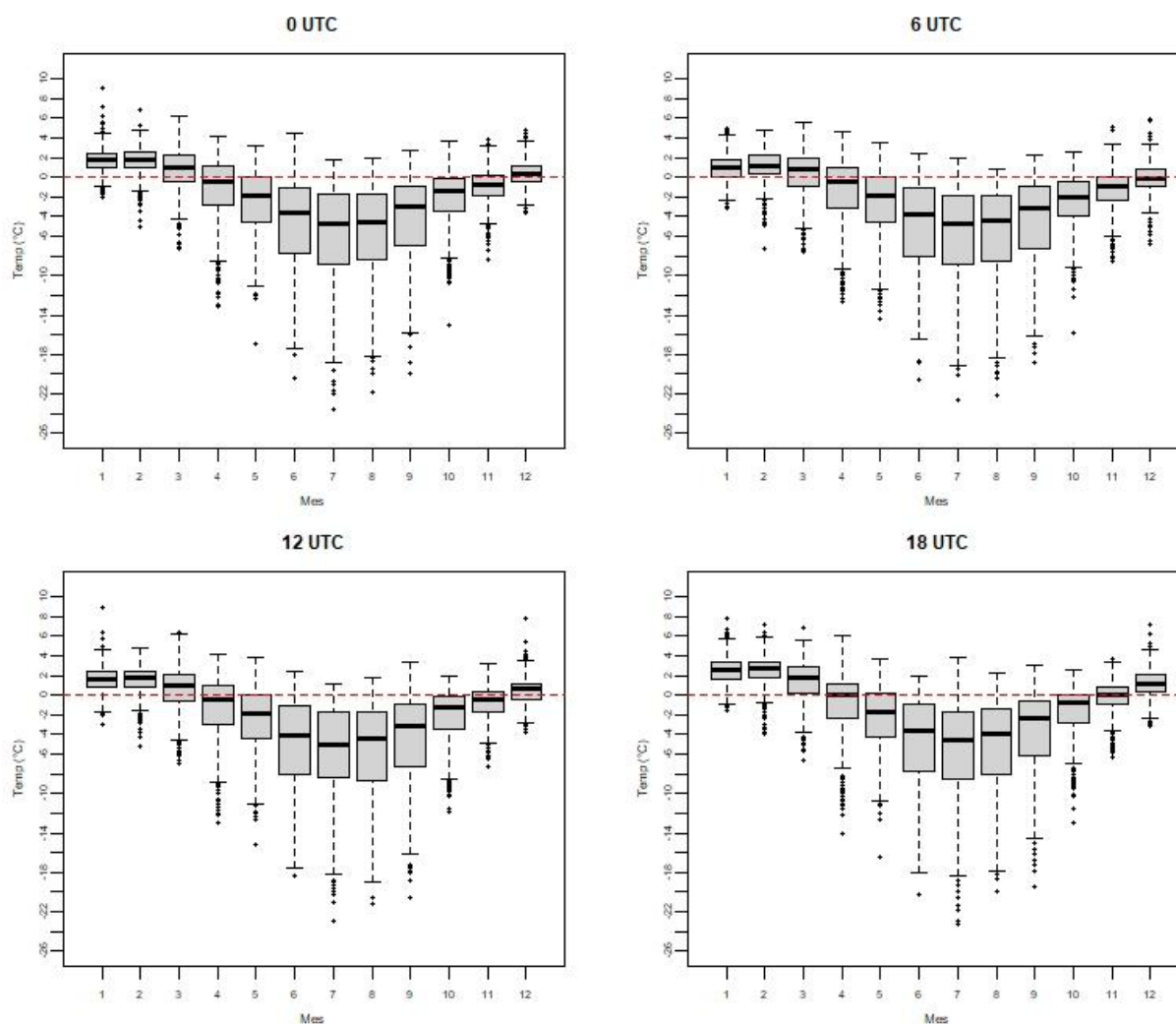


Figura 35. Distribución anual de la temperatura por horario (0, 6, 12 y 18 UTC).

Observando las anomalías anuales (Fig. 36), se desprende que, de los 19 años de la serie, 10 de ellos presentaron anomalías positivas y 9 anomalías negativas, siendo un único año (2014) muy próximo a la condición media. Se observa también que en la primera mitad de la serie las anomalías son principalmente positivas, destacando los años 1999 y 2008 como años más cálidos de lo normal, con anomalías de 0.8 y 0.9°C respectivamente. Las restantes anomalías positivas son todas inferiores a 0.5°C. Por el contrario, la segunda mitad de la serie presenta anomalías principalmente negativas, siendo la mayoría de ellas superiores a los 0.5°C. Llama particularmente la atención el año 2007, con una anomalía negativa de 1.3°C.

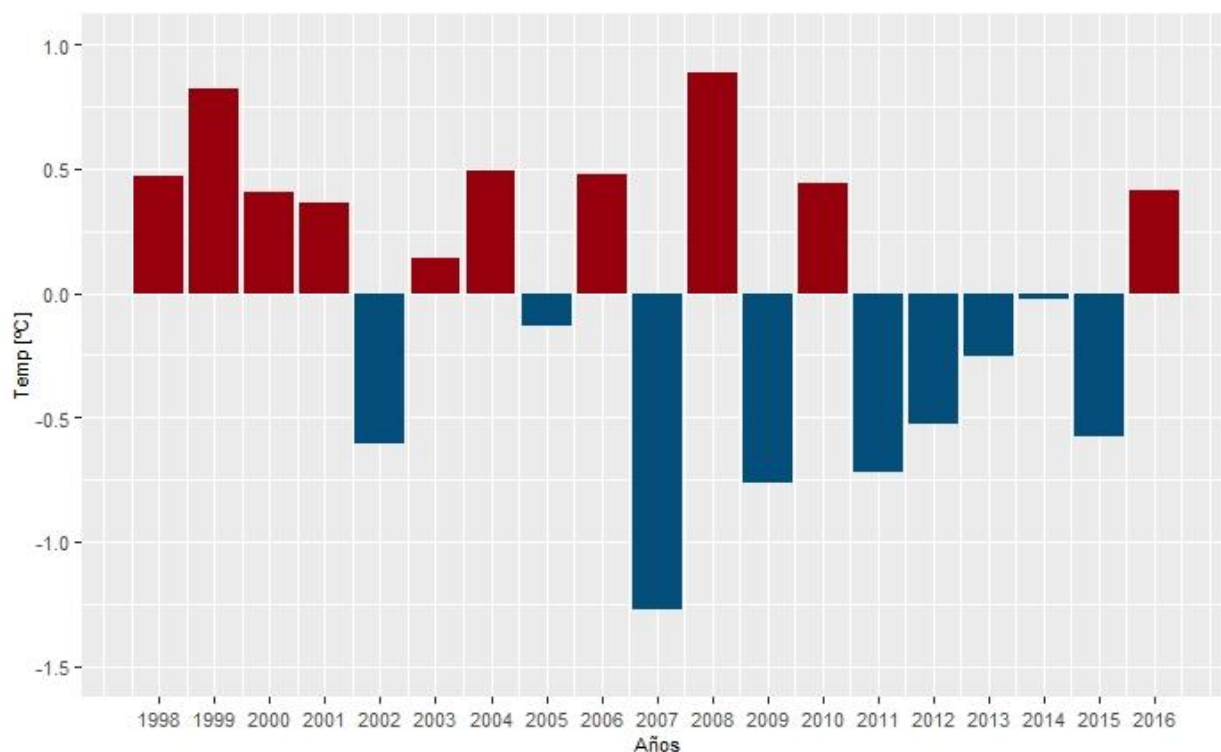


Figura 36. Anomalías anuales de temperatura. Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

Finalmente, se constató una tendencia negativa ($-0.0047^{\circ}\text{C}/\text{mes}$, $-0.06^{\circ}\text{C}/\text{año}$) de la temperatura media mensual pero que no fue estadísticamente significativa al 95% ($p\text{-valor} = 0.11$) (Fig. 37).

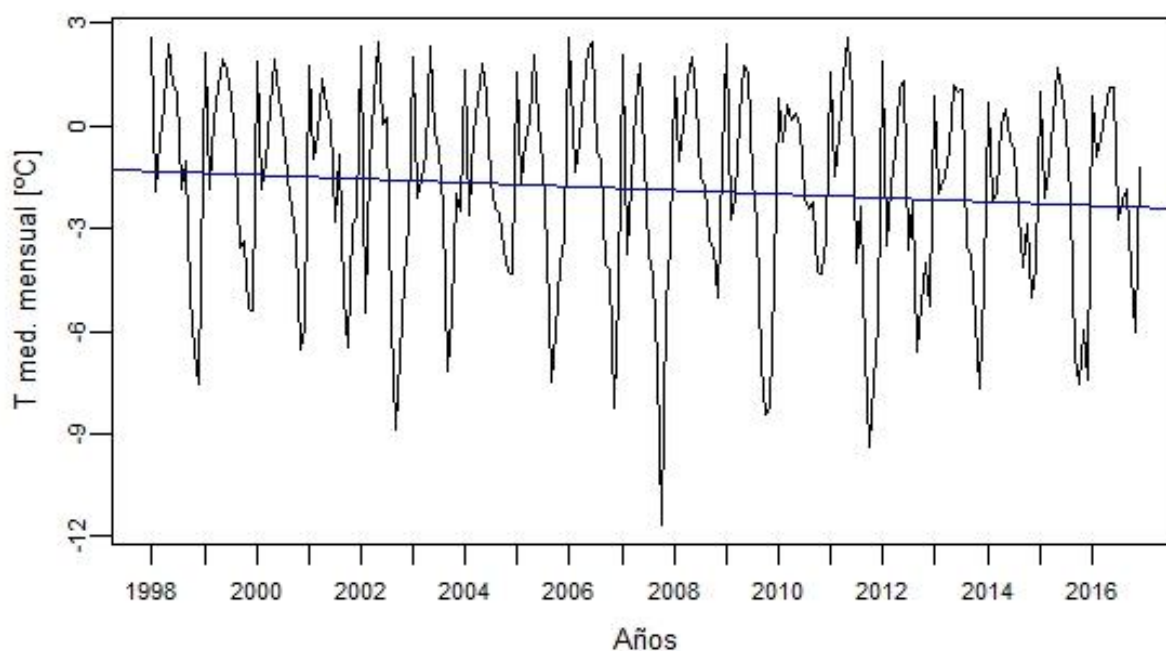


Figura 37. Serie temporal de temperatura media mensual por año. En azul se visualiza la regresión lineal.

- **Análisis a escala estacional**

En la Fig. 38 se observa la distribución de los valores de temperatura para cada una de las épocas. En ellas se observa que ambas épocas presentan un rango de temperatura similar, de aproximadamente 30°C, siendo levemente inferior en la época cálida. Si bien en ambas épocas la distribución es asimétrica y sesgada hacia la izquierda (asimetría de -1.65 y -1.02 para la época cálida y fría respectivamente), las temperaturas más bajas ocurren con mayor frecuencia en la época fría que en la cálida, lo que se evidencia con una menor kurtosis (3.83), más próxima a una distribución normal, en comparación a la época cálida (kurtosis de 7.17), con menor frecuencia de valores negativos. A su vez, la época cálida presenta mayores frecuencias en valores en torno a los 0°C (-1 a 1°C), mientras que la época fría presenta mayores frecuencias en torno a los -1°C. En el caso de la época cálida, la mayor frecuencia (4.933) se presenta en el rango -1 a 1°C, mientras que en la época fría la mayor frecuencia (3.371) ocurre en el rango -2 a 0°C.

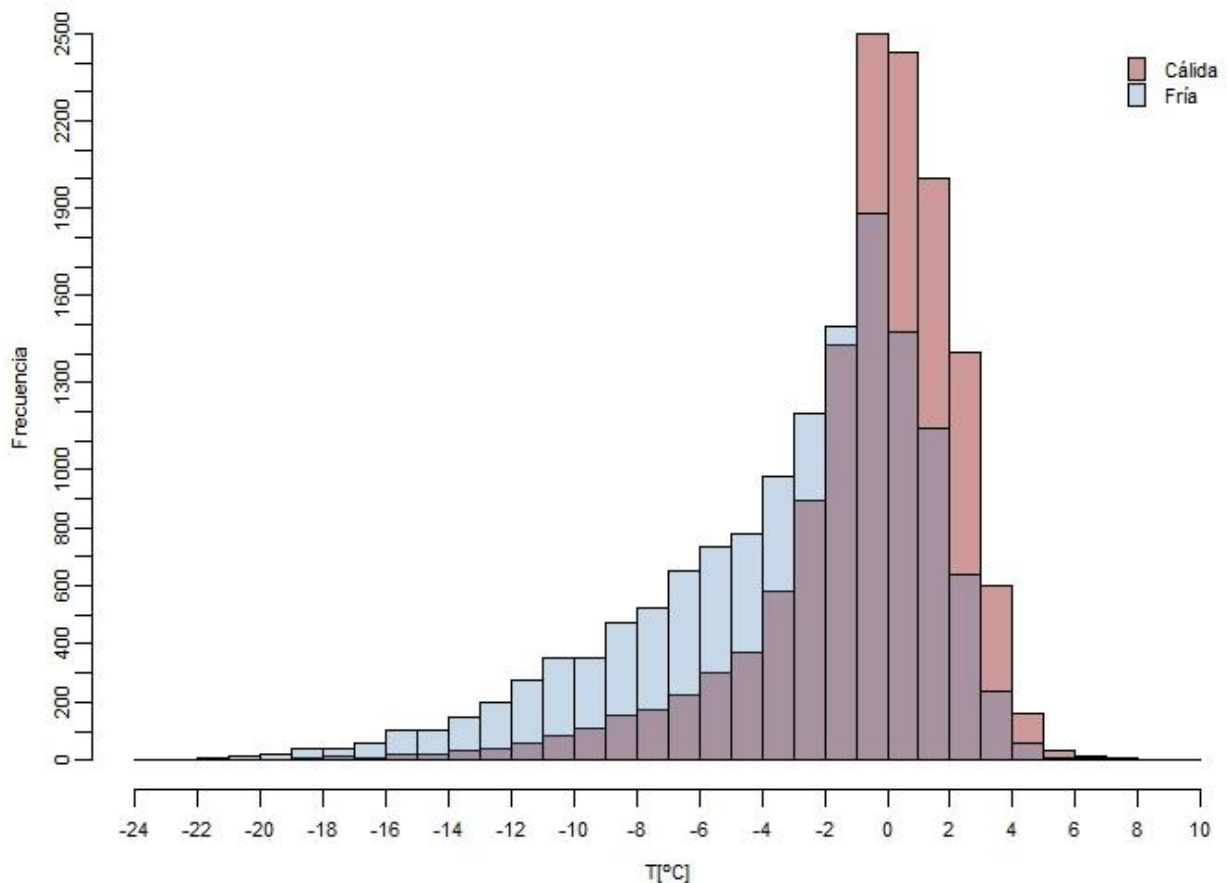


Figura 38. Distribución de frecuencias de temperatura del aire para la época cálida (rosado) y la fría (celeste).

La Fig. 39 muestra la variabilidad interanual de las épocas fría y cálida. Los valores medios para cada época son de -0.55°C para la época cálida y de -3.15°C para la fría,

con una desviación estándar de 0.59° y 1.01°C respectivamente, lo que confirma que la época fría es la que presenta mayor variabilidad interanual. El rango de temperatura media de la época cálida es de 3°C (de -2 a 1°C), mientras que el de la época fría es de 4.2°C (de -5.7 a -1.5°C).

Analizando las anomalías estacionales (Fig. 40) se observa con claridad que la época fría presenta mayores anomalías que la época cálida, con un rango de anomalías entre -2.35 y 1.38°C , en comparación al rango -0.99 a 1.13°C de la época cálida. A su vez, se observa que durante algunos años (por ejemplo, 1998, 2000, 2003, 2005, 2011, 2013 y 2014) las anomalías son opuestas: mientras que una época se presenta más cálida de lo normal, la otra se presenta más fría, y viceversa. A simple vista destaca el año 1999 con una época fría más cálida de lo normal, y los años 2002, 2007 y 2011 como particularmente fríos. En lo que respecta a la época cálida, la misma se mantiene alrededor de la media, con algunos años anómalamente cálidos, destacando el 2008 ($>1^{\circ}\text{C}$ por encima de la media climática), 2001 (0.92°C) y 2010 (0.76°C). Por su parte, las estaciones cálidas de los años 2012, 2015 y 2009 presentaron anomalías negativas de -0.99°C , -0.86°C y -0.76°C respectivamente. La época fría presentó una marcada anomalía negativa en el 2007 ($>2^{\circ}\text{C}$ por debajo de la media climática), así como también en el 2011 (-1.68°C) y 2009 (-1.27°C).

Por último, este análisis constata que, las 2 anomalías más grandes de toda la serie (2007: negativa, 2008: positiva), se vieron reflejadas en ambas épocas. Sin embargo, el mayor motivo de la anomalía negativa del 2007, fue que la época fría fue muy fría, y no tanto la cálida, a pesar de que estuvo 0.25°C más fría de lo normal. En el 2008 pasó algo similar: la época cálida fue mucho más cálida de lo normal, generando que el año fuera anómalamente cálido (Fig. 40).

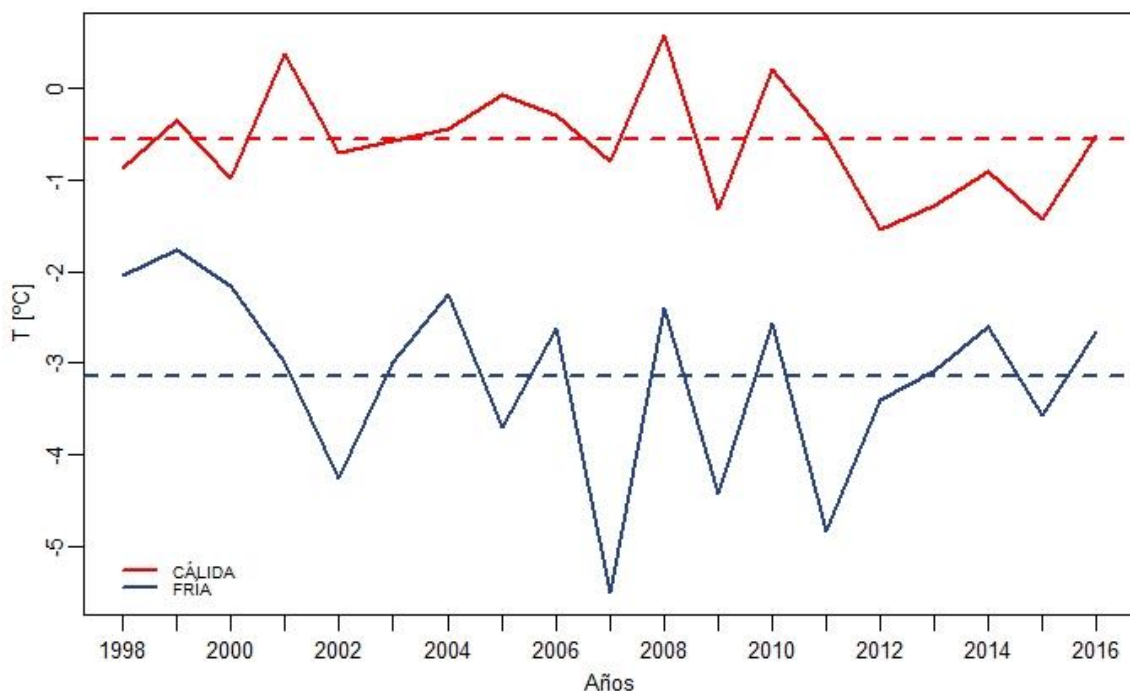


Figura 39. Variabilidad interanual de la temperatura media del aire para la época cálida (rojo) y fría (azul). Las líneas punteadas representan la media climatológica de cada época.

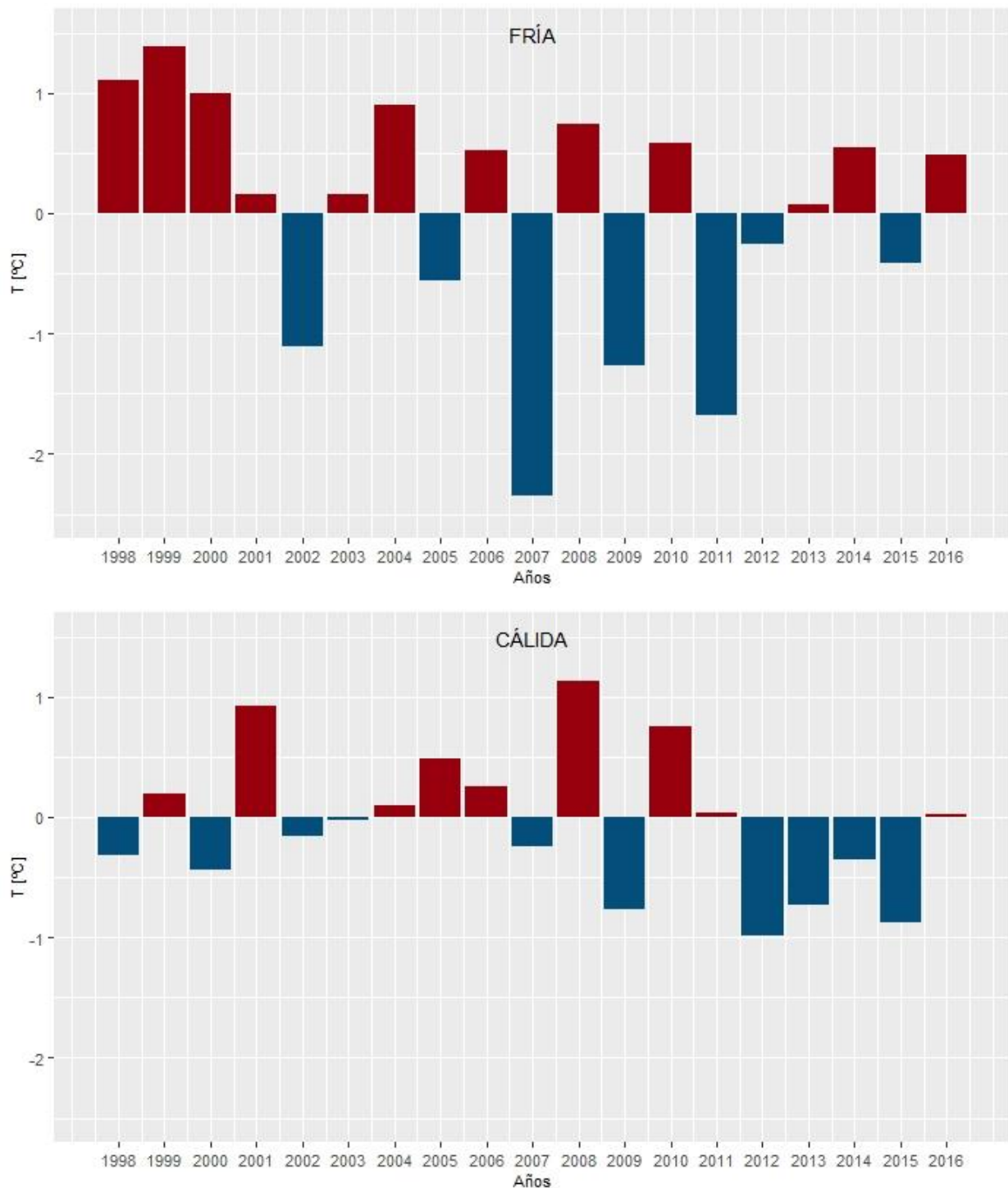


Figura 40. Anomalías de temperatura para la época fría (superior) y cálida (inferior). Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

Para visualizar la diferencia entre un día promedio en la época cálida y uno en la época fría, se realizaron diagramas para cada época y horario. En la Fig. 41 se observa notoriamente cómo las temperaturas son mayores en la época cálida que en la fría, así como la mayor amplitud térmica que existe en la época cálida donde se observa claramente que la T mínima diaria ocurre a las 6 UTC y la máxima a las 18 UTC,

existiendo una notoria diferencia entre ambos horarios, siendo las medias -1.09°C y 0.07°C respectivamente. Por el contrario, en la época fría las temperaturas no varían mucho durante el día y todos los horarios cuentan con un valor de mediana en torno a los -3°C , si bien las 18 UTC que se diferencia levemente de los restantes horarios. Hay que considerar que en los meses centrales de la época fría hay aproximadamente 5 horas de sol.

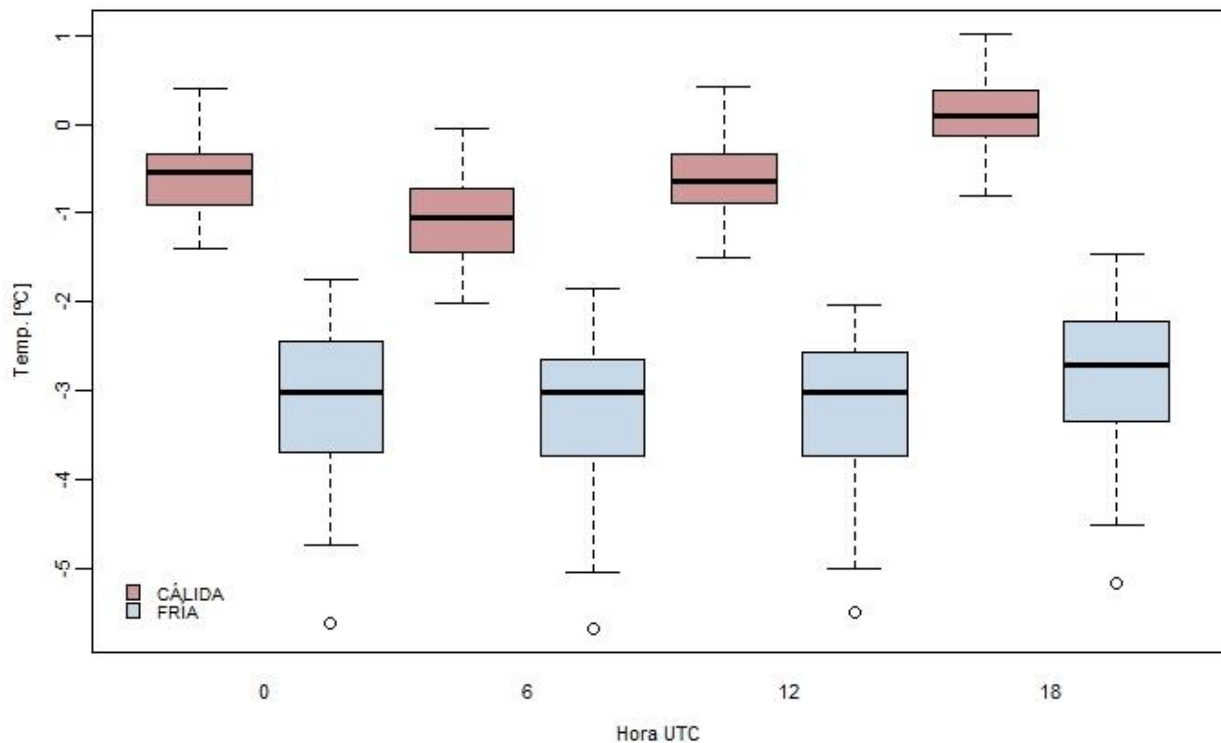


Figura 41. Distribución de los valores diarios de la temperatura del aire en la época cálida (rosado) y fría (celeste).

• Análisis a escala trimestral

Para el análisis de la variabilidad trimestral de la temperatura se dividió al año en las 4 estaciones convencionales del año: verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON). Los veranos se nombran por el año correspondiente al mes de diciembre.

En lo que respecta a la temperatura, como es de esperar, el verano es la estación de mayor temperatura y el invierno la de menor, con medias climatológicas de 1.27°C y -5.30°C respectivamente (Fig. 42). A su vez, el verano es la estación de menor variabilidad (valores más próximos a la media climatológica), presentando las menores anomalías (-1.1 a 1.2°C) (Fig. 43), mientras que el invierno presenta mayor variabilidad, con las mayores anomalías (rango de -2.7°C a 1.8°C), siendo a su vez la mayoría de ellas negativas. El año 2007, observado en la Fig. 36 como el año más frío (anomalía

negativa de 1.3°C), se visualizó aquí con el otoño e invierno más fríos de toda la serie (2.03°C y 2.7°C respectivamente más fríos de lo normal). Para la estación de verano se constató una tendencia negativa ($-0.07^{\circ}\text{C/año}$) y estadísticamente significativa ($p\text{-valor}=0.0026$), que se evidencia en la Fig. 43 con los primeros dos tercios de la serie siendo más cálidos de la media climatológica, y el último tercio de la serie más fríos de lo normal.

Por su parte, las estaciones intermedias de otoño (-1.0°C) y primavera (-2.38°C) son más similares entre sí, siendo el otoño levemente más cálido. Se observa, sin embargo, que durante los años 2008, 2010 y 2016, las temperaturas medias de dichas primaveras estuvieron más próximas a la media del otoño (más cálida), al tiempo que el otoño del 2007 fue más frío incluso que la media climatológica de la primavera. Las anomalías anuales positivas observadas en la Fig. 36 para los años 1999 y 2008, se observan aquí con mayor claridad. Si bien las 4 estaciones fueron más cálidas, en 1999 fue más notoria en el otoño (1.5°C), y en el 2008 lo fue en la primavera (1.7°C). Finalmente, destaca la primavera del 2004, como la única estación de toda la serie que no presentó ningún tipo de anomalía, comportándose de igual forma que la condición media.

Resulta interesante observar cómo las anomalías no se mantienen en las 4 estaciones del año, sino que varían siendo incluso de signos opuestos, a excepción de los años 1999 y 2008, que presentaron las 4 estaciones con anomalías positivas. Un claro ejemplo es el 2002, donde todas las estaciones presentaron anomalías negativas, excepto el verano, el cual fue 0.8°C más cálido de lo normal. Lo inverso ocurrió en el 2014, donde todas las estaciones presentaron anomalías negativas, a excepción del invierno, el cual estuvo 1.3°C más cálido de lo normal.

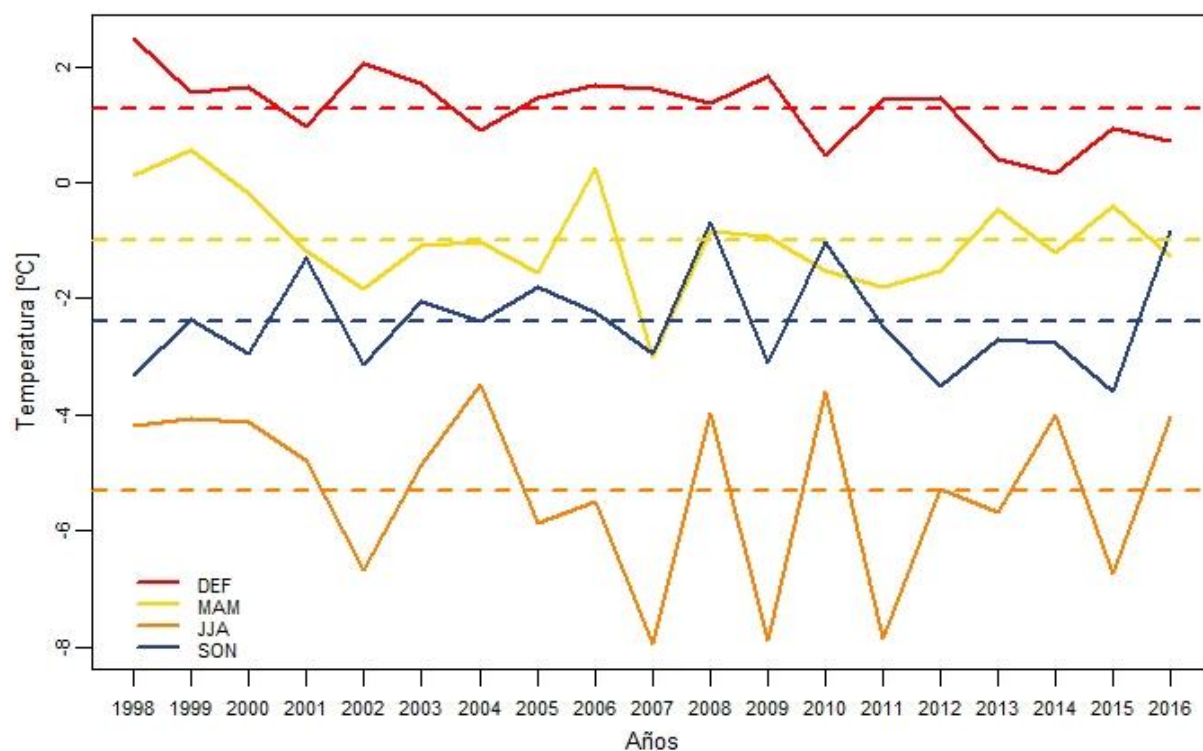


Figura 42. Temperatura media anual para cada una de las estaciones: verano (DEF, rojo), otoño (MAM, amarillo), invierno (JJA, naranja) y primavera (SON, azul). Las líneas punteadas corresponden a la media climatológica de cada estación.

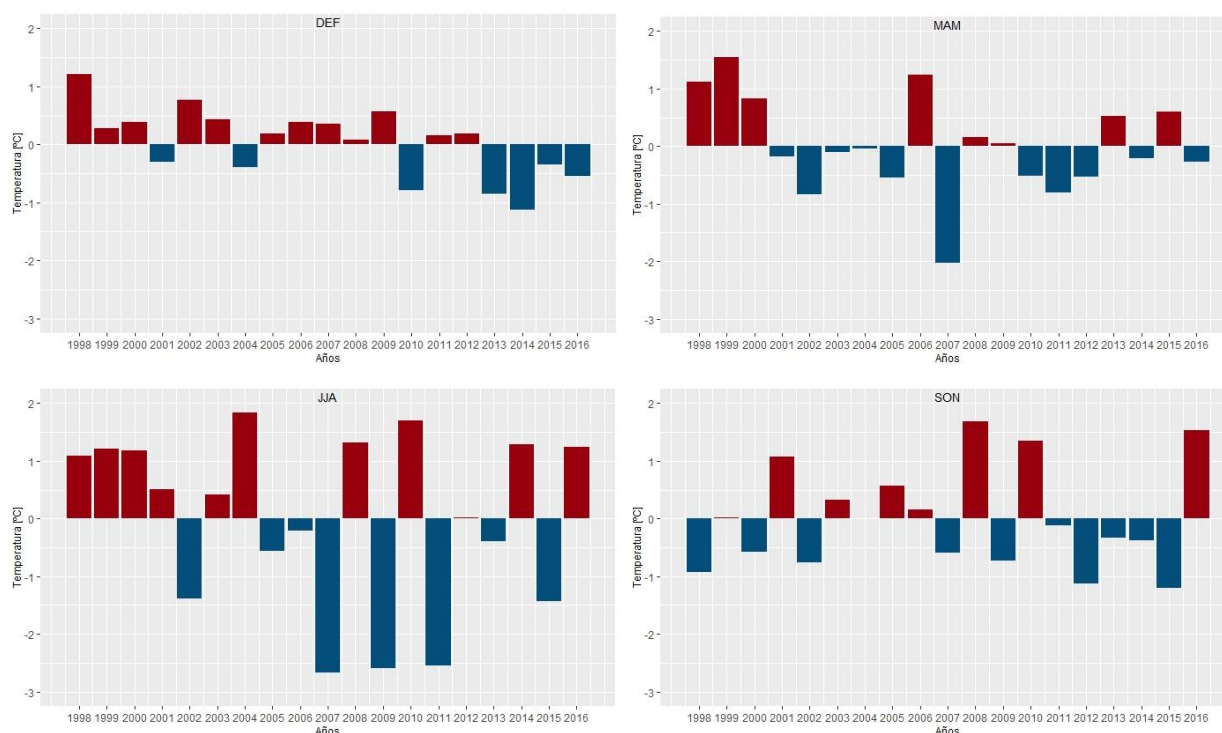


Figura 43. Anomalías de temperatura para las 4 estaciones: verano (DEF, superior izquierda), otoño (MAM, superior derecha), invierno (JJA, inferior izquierda) y primavera (SON, inferior derecha). Las barras rojas representan anomalías positivas, y las barras azules anomalías negativas.

CAPÍTULO 5.

EVENTOS CÁLIDOS

Tras haber construido una base de datos horaria confiable y haber caracterizado las principales variables atmosféricas para el período de estudio, en el presente capítulo se analizarán los eventos cálidos y cálidos extremos en la Isla Rey Jorge.

5.1 Metodología y Definición

Un evento cálido u ola de calor se determina cuando durante varios días las temperaturas están por encima de un cierto umbral respecto a la climatología local.

A partir de las series horarias, se construyó una serie de Temperatura media diaria para el período 1998-2016. La consideración de tomar la temperatura media diaria es porque, como se describe en el capítulo 4, la variabilidad horaria máxima se observó en la época cálida y no supera los 1.16°C, mientras que en la época fría prácticamente no existe variabilidad. A partir de dicha serie, se generó una serie anual diaria, con una ventana móvil de 5 días, centrada en el día, a la cual se le calcularon los percentiles 90 y 99. Para determinar la espacialidad de los eventos, esta misma metodología fue aplicada a las 3 estaciones antárticas: BCAA, FREI y KOREA.

Definimos un evento cuando la temperatura media diaria supera un percentil determinado por 3 días consecutivos o más, definiendo los eventos de la siguiente manera:

- Evento Cálido (EC) cuando supera el percentil 90
- Evento Cálido Extremo (ECE) cuando supera el percentil 99.

Una vez detectados los eventos, fueron revisados manualmente para corroborar que no hubiera eventos repetidos y para chequear la congruencia temporal entre las 3 estaciones. Todos los eventos detectados en FREI y/o KOREA que tuvieran una diferencia máxima de +/- 2 días desde su fecha de inicio en relación a los eventos detectados en BCAA, fueron considerados el mismo evento.

Por otro lado, cuando el evento abarca 2 meses, es considerado perteneciente al mes de inicio, excepto cuando el evento comienza el último o penúltimo día del mes, y abarca más días del mes siguiente, y dicho caso es considerado del mes siguiente. Por ejemplo, el evento del 31/03/2004 tuvo una duración de 4 días, culminando el 03/04/2004, por lo que fue considerado perteneciente al mes de abril. Por el contrario, en el evento del 27/08/2003 de 7 días de duración que culminó el 02/09/2003, se mantuvo el mismo mes de inicio.

5.2 Percentiles

La figura 44 muestra la serie de percentiles diarios para las 3 estaciones analizadas. La marcha diaria de los percentiles es similar entre las 3 estaciones. Se destaca que, durante los meses centrales del invierno (Jun-Ago) los percentiles 90 y 99 muestran la mayor separación entre ellos en cada una de las bases antárticas, seguido de un incremento importante a partir del mes de setiembre. Allí se observa que las 3 estaciones presentan similares percentiles y comportamientos a lo largo de toda la serie temporal, alcanzando mayores valores en BCAA y KOREA, que ya mostraban una mayor correlación en el capítulo pasado, y menores valores en FREI, donde los percentiles son de hasta casi 1°C menor. Si bien el ciclo anual es muy similar, en FREI es levemente menor la diferencia entre los percentiles de los meses cálidos y los meses fríos. Resalta también que KOREA es la estación que presenta mayor diferencia entre los percentiles (0.9°C) y FREI la que menor diferencia presenta (0.6°C).

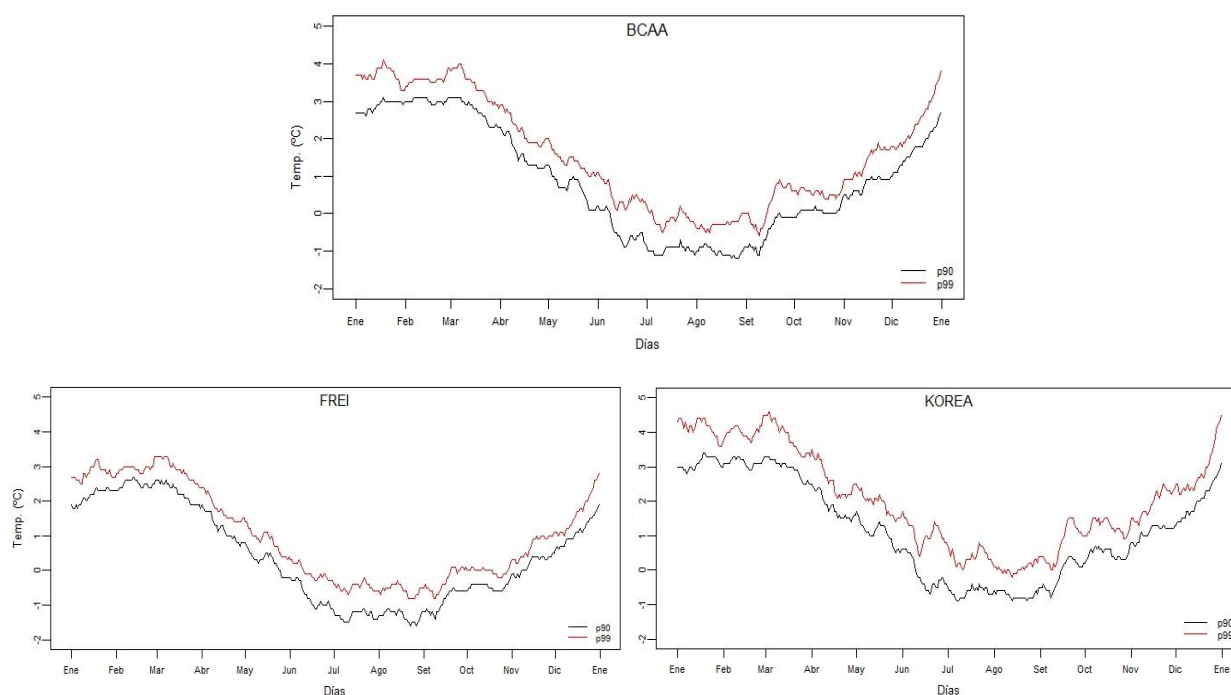


Figura 44. Percentiles diarios para las 3 estaciones: BCAA (arriba), FREI (izquierda) y KOREA (derecha), negro: percentil 90 y rojo: percentil 99.

Analizando los percentiles por separado, se observa una mayor similitud entre BCAA y KOREA, que entre BCAA y FREI, siendo ésta más evidente en el P90, con una diferencia media absoluta de 0.29°C en el primer caso y 0.47°C en el segundo. Esta relación de semejanza se mantiene en los 2 percentiles diarios (Fig. 45). A su vez, en ambos casos se observa que los percentiles de KOREA son superiores a los de cualquier otra estación, y los de FREI son los más bajos, ubicándose BCAA entre medio de ambas estaciones.

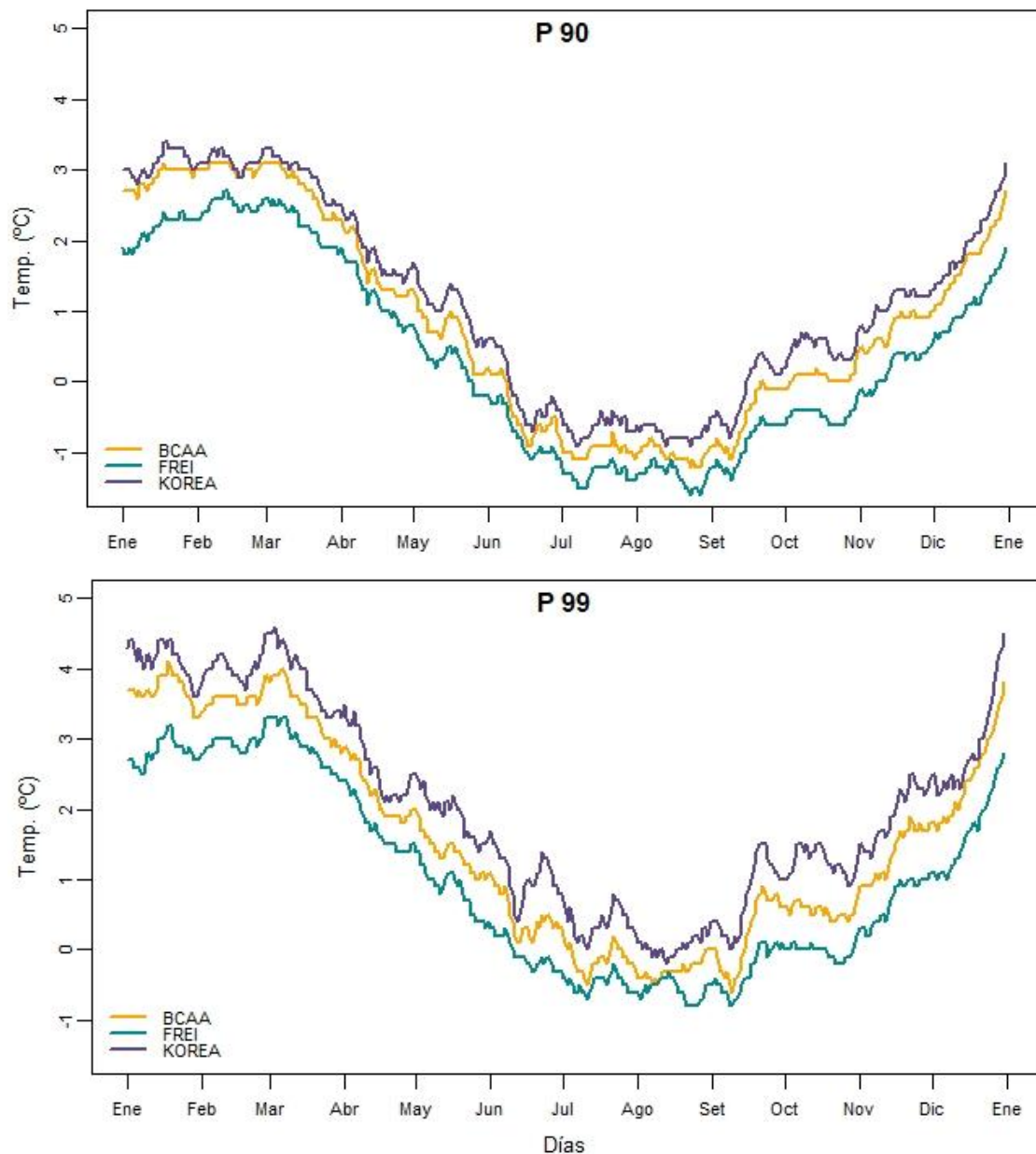
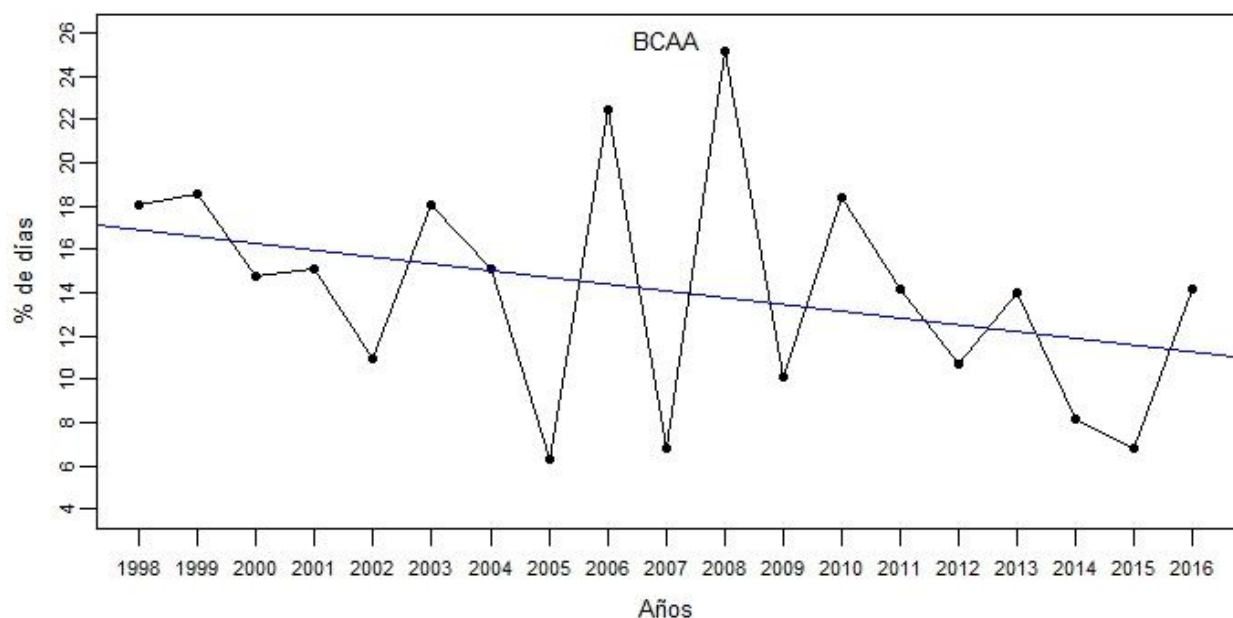


Figura 45. Percentiles diarios para las 3 estaciones antárticas: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta). En la imagen superior se visualiza el percentil 90 y en la inferior el percentil 99.

Siguiendo la metodología de Turner et al. (2021), se analizó el porcentaje de días por año con temperaturas cálidas (medias diarias iguales o superiores al percentil 90) para cada una de las estaciones, con la finalidad de observar la variabilidad interanual en la ocurrencia de días cálidos en la serie temporal. Para ello se realizó una regresión por mínimos cuadrados para calcular la tendencia, y la posterior aplicación del test estadístico no paramétrico de Mann-Kendall para calcular la significancia de dicha tendencia. La Fig. 46 muestra en los 3 casos una tendencia negativa, que fue significativa al 95% ($\alpha = 0.05$) en las estaciones de FREI (-0.57% de días por año,

p-value=0.02) y KOREA (-0.37% de días por año, p-value=0.02), no así en BCAA (-0.31% de días por año, p-value=0.11). Resulta interesante destacar que en el caso de BCAA, el año 2008 fue el que mayor cantidad de días cálidos presentó (25% del año con temperaturas superiores al P90), seguido del año 2006, con el 22.5% de sus días con temperaturas cálidas. Sin embargo, en el caso de FREI y KOREA, la relación fue inversa, con el 2006 destacando como el año con mayor cantidad de días cálidos (24.7% en ambas estaciones) y el 2008 en segundo lugar (22.7% en FREI y 22.2% en KOREA). Llama particularmente la atención que, tanto en BCAA como en KOREA, ambos años estuvieron precedidos por 2 de los años con menor cantidad de días cálidos de toda la serie, el 2005 (6.3% en BCAA y 7.7% en KOREA) y el 2007 (6.8% en BCAA y 7.1% en KOREA). Concorde al análisis de temperatura visto en el capítulo previo, tanto el 2008 como el 2007 presentaron en BCAA las mayores anomalías positiva y negativa respectivamente.



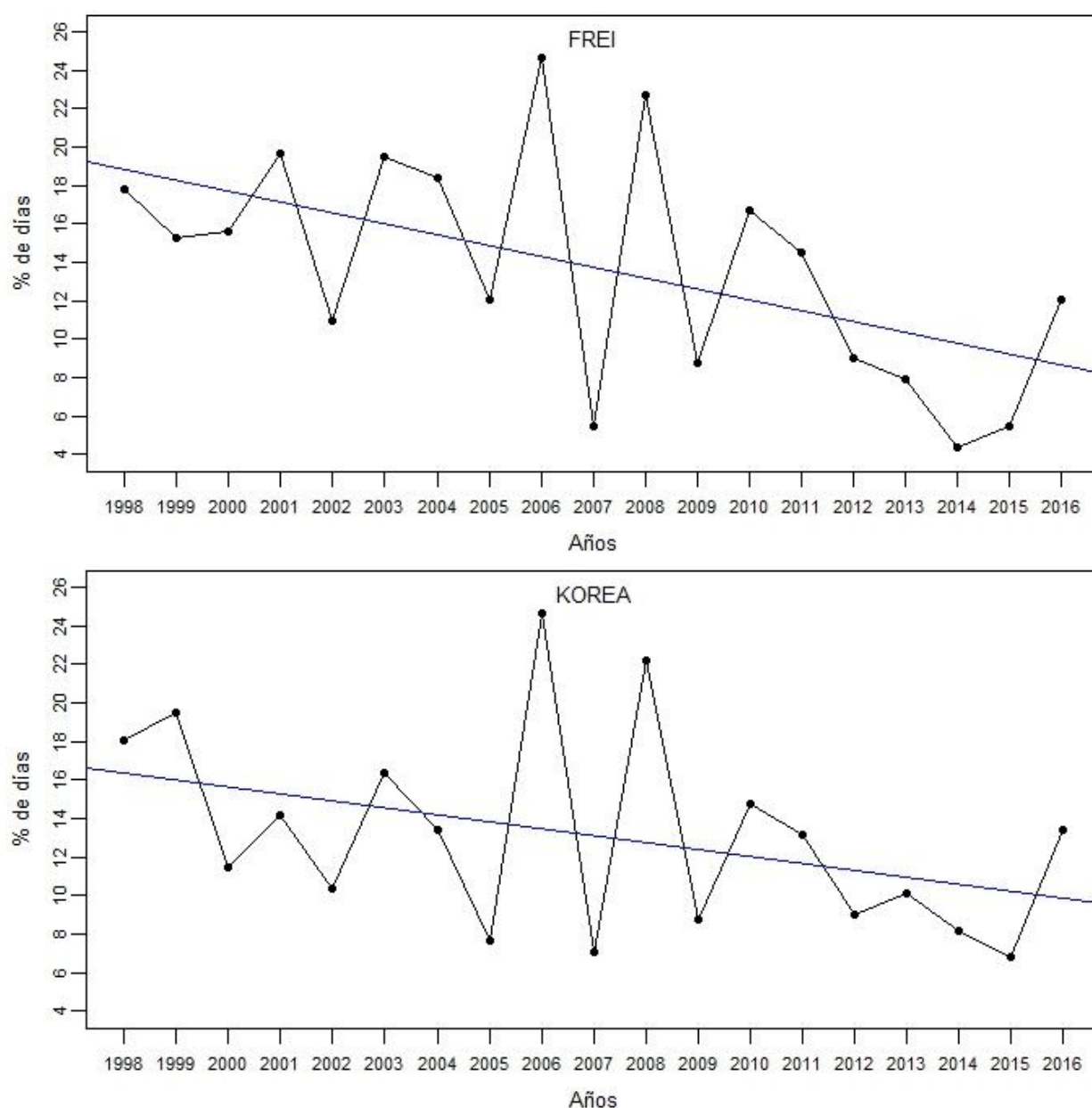


Figura 46. Serie temporal del porcentaje de días con temperaturas medias diarias iguales o superiores al percentil 90, para cada año de la serie, para la estación BCAA (superior), FREI (central) y KOREA (inferior). En azul se visualiza la regresión lineal.

5.3 Eventos Cálidos (EC) y Cálidos Extremos (ECE)

En la tabla a continuación se detalla la totalidad de eventos que fueron encontrados para cada una de las estaciones y para cada percentil (90 y 99), así como la cantidad de eventos según sus días de duración.

Tabla 9. Frecuencias de eventos de olas de calor discriminados por intensidad (EC y ECE) y por estación (BCAA, FREI y KOREA) detallando la cantidad de eventos totales y la cantidad de eventos acorde a los días de duración. En rojo se visualizan los eventos superiores al percentil 99.

		Nº eventos	Días de duración								
			3	4	5	6	7	8	9	10	11
EC	BCAA	101	48	24	13	6	6	-	2	-	2
	FREI	100	43	29	11	9	5	-	2	1	-
	KOREA	93	47	28	9	6	2	1	-	-	-
ECE	BCAA	19	15	4	-	-	-	-	-	-	-
	FREI	21	15	4	-	2	-	-	-	-	-
	KOREA	10	6	2	2	-	-	-	-	-	-

Llama particularmente la atención la diferencia que hay en el número de eventos cálidos extremos que se registraron en KOREA, en relación a los registrados en BCAA y FREI. La cantidad es prácticamente la mitad. Esto podría explicarse al analizar los percentiles de cada estación (Fig. 44), donde se observa que KOREA presenta valores superiores a los de BCAA y FREI, generando que para conformar un ECE los valores deban superar un percentil mayor.

• EC

De la totalidad de eventos encontrados al P90 para BCAA: 57 fueron compartidos con FREI y KOREA, 19 eventos fueron compartidos sólo con FREI, 12 sólo con KOREA, y 13 eventos fueron registrados únicamente en BCAA (Anexo II y IV). Paralelamente, 9 eventos fueron compartidos por FREI y KOREA, y cada base por separado registró 15 eventos de forma independiente.

Analizando la persistencia (en días) de dichos eventos, se observó que la mayoría persisten entre 3 y 4 días, teniendo la mayoría de ellos una duración de 3 días (frecuencia superior a los 43 eventos en cualquiera de las estaciones) (Fig. 46). KOREA no presentó eventos con duración mayor a los 8 días, y únicamente BCAA presentó dos eventos de 11 días de duración (17/09/2003 y 23/11/2008). Es importante destacar que la región de estudio presenta una alta variabilidad sinóptica, por lo que un evento persistente durante 6 o 7 días sugiere un fuerte sistema de bloqueo en la región. Sumando todos los días de eventos cálidos, se tiene que de la totalidad de la serie (6.915 días), un total de 423 días constituyeron EC, lo que supone más de un año completo, y lo que sería el 6% de la serie.

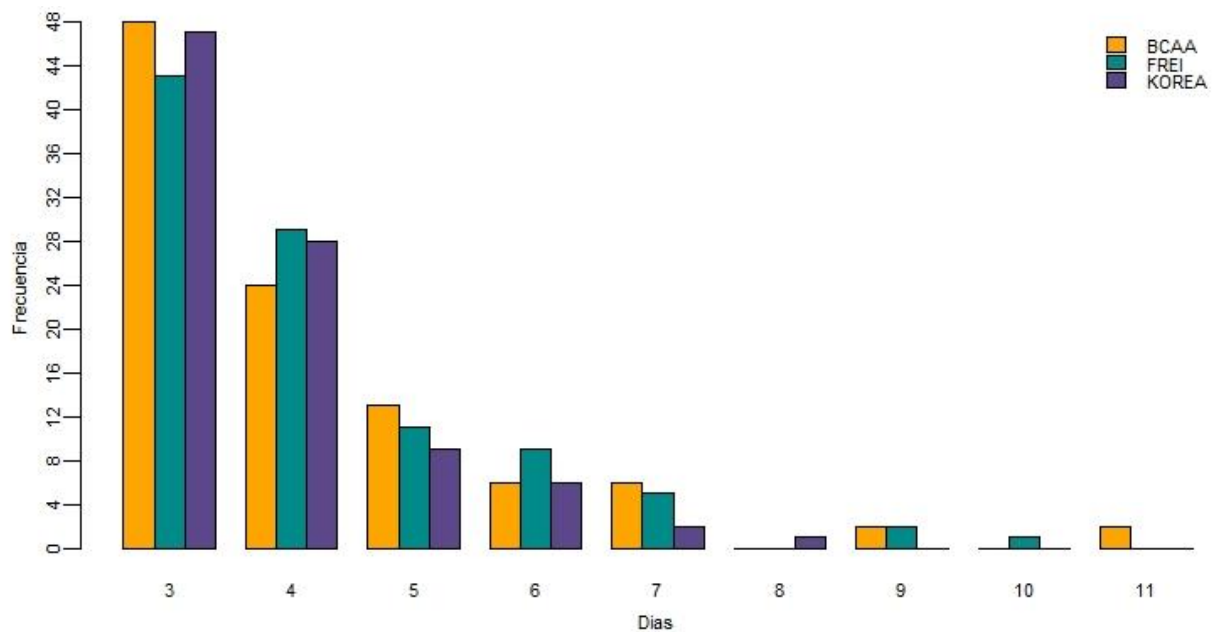


Figura 46. Frecuencia de los EC acorde a su persistencia para cada una de las estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

La variabilidad anual de los eventos se observa en la Fig. 47. Destacan los años 1999, 2006 y 2008 como los años con mayor cantidad de eventos cálidos, registrándose un total de 11 eventos cada año en BCAA. Tanto para FREI como para KOREA fue también el 2006 el año de mayor cantidad de eventos, con un total de 13 EC en cada estación, seguido por el 2008, con 12 eventos en FREI y 11 en KOREA. En lo que respecta a la intensidad de los eventos, los años 1998 y 2012 registraron los eventos con mayores anomalías, siendo de 6.4 y 6.3°C respectivamente. Los años 2003 y 2008 destacan como los años que presentaron los EC de mayor duración, presentando cada uno de ellos un EC de 11 días de duración. El 2008 también presentó un evento de 9 días. Finalmente, en lo que respecta a la extensión espacial de los eventos, el año 2006 presentó 9 eventos cálidos que fueron compartidos por las 3 estaciones (BCAA, FREI, KOREA), seguido por el 2008 que presentó 8 eventos. Los restantes años presentaron 5 o menos compartidos por las 3 estaciones. El único año en que no se detectaron eventos fue el 2015.

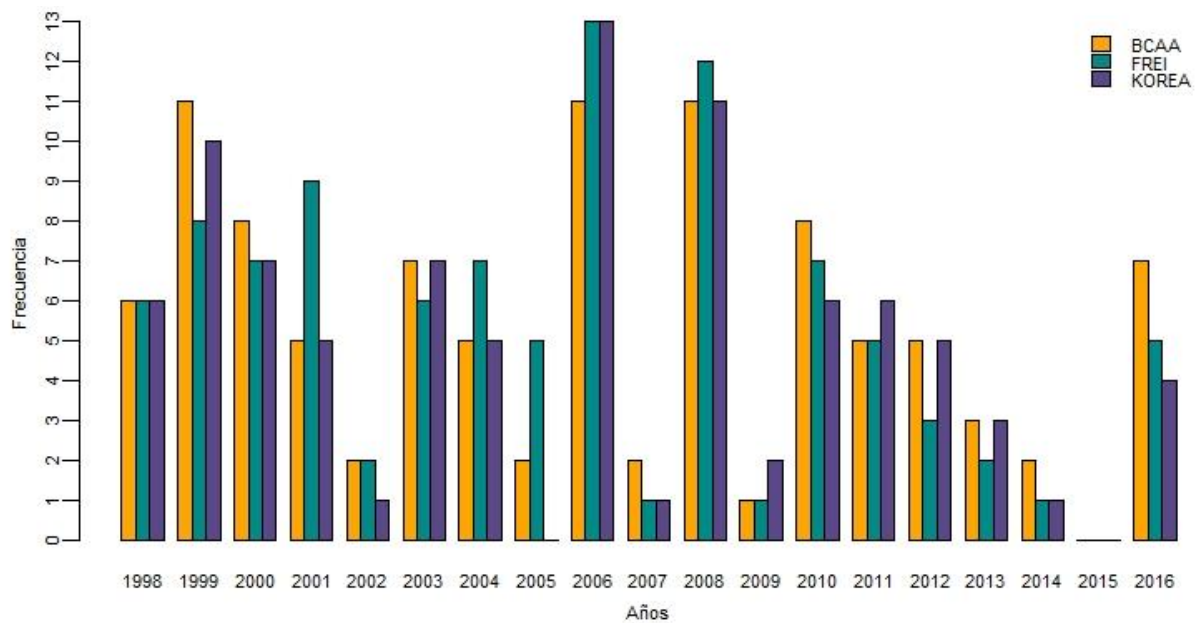
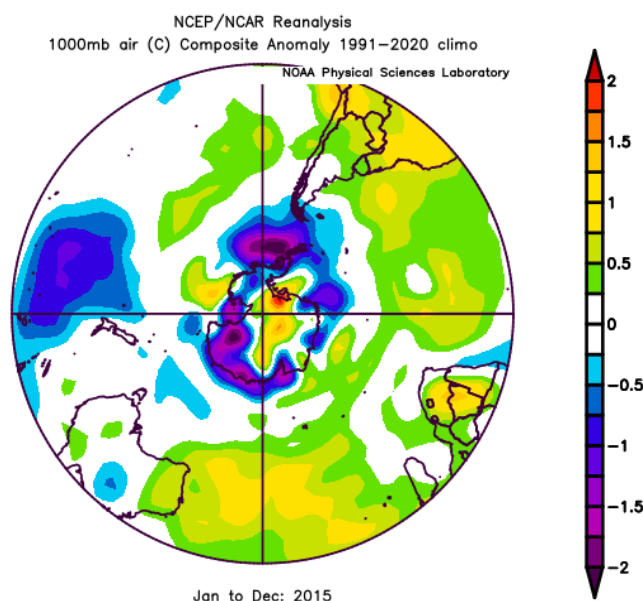


Figura 47. Distribución anual de los EC para las estaciones BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

Los siguientes gráficos obtenidos de la salida del reanálisis NCEP-NCAR Reanalysis 1 (Kalnay et al. 1996) (<https://psl.noaa.gov/>) muestran las anomalías de temperatura del año 2015 (Fig. 48), el cual fue determinado a nivel anual como un año frío, observación que fue también vista en el capítulo 4, al realizar la climatología de la temperatura (Fig. 36). Si bien la época fría tuvo a nivel regional mayores anomalías negativas (hasta 3°C en algunas regiones), éstas fueron más localizadas, al tiempo que la época cálida presentó anomalías negativas de mayor extensión, quedando inmersa la Isla Rey Jorge en una anomalía negativa de casi 1°C.



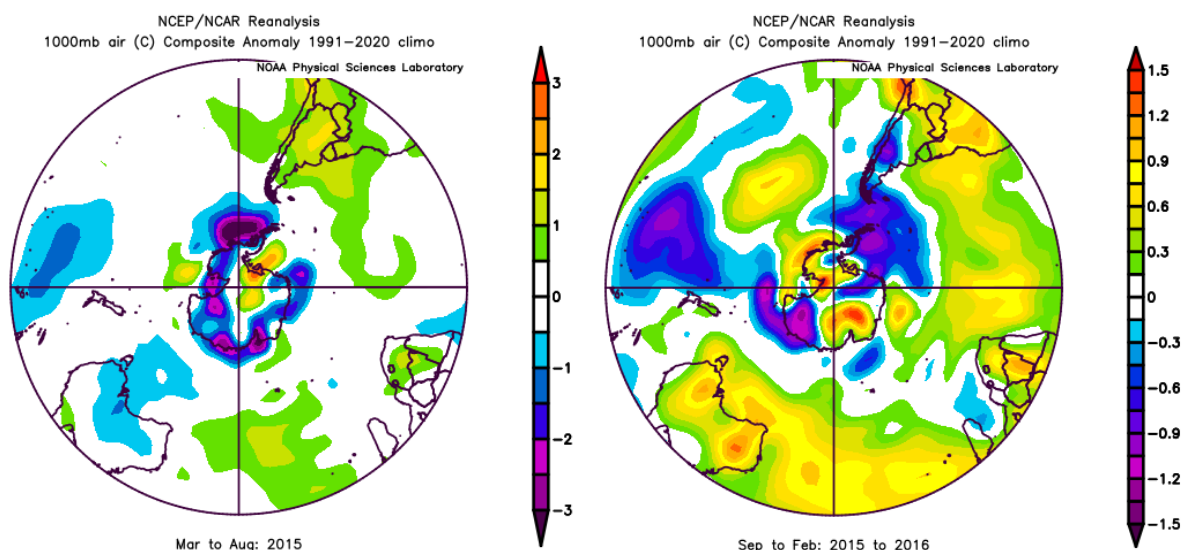
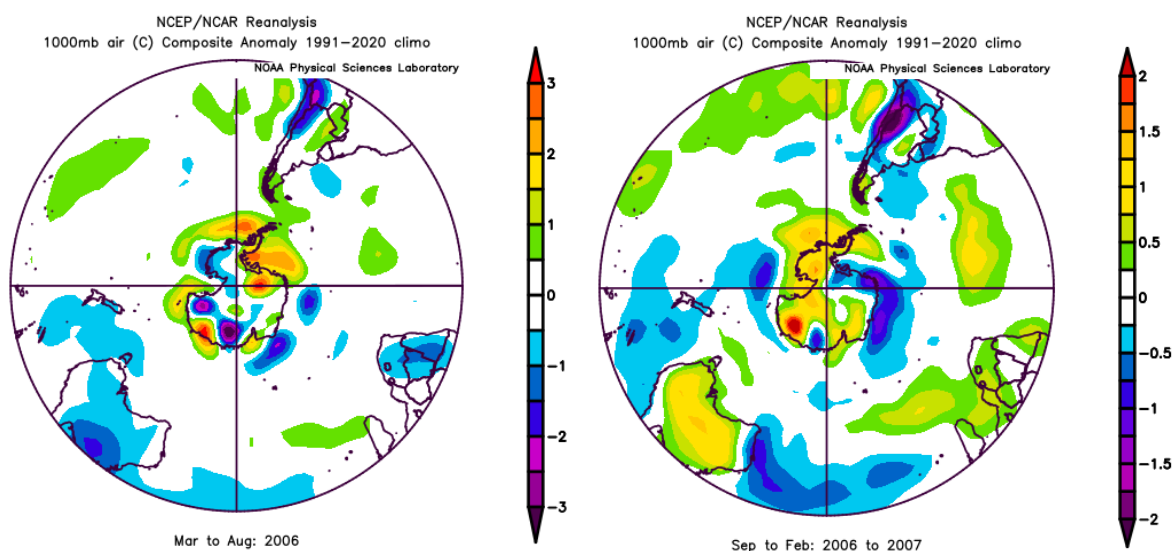


Figura 48. Anomalía anual de temperatura para el año 2015 (superior) para la región 40-90°S. Anomalía de temperatura para la estación fría Mar-Ago (izquierda) y cálida Set-Feb (derecha). Fuente: Physical Sciences Laboratory, NOAA.

Por otro lado, el año 2006 se detecta como el año que mayor cantidad de eventos cálidos presentó (11 para BCAA, y 13 para FREI y KOREA), seguido por el año 2008 (11 eventos para BCAA y KOREA, y 12 para FREI). En ambos años se observa, tanto para la estación fría como la cálida, anomalías positivas de temperatura superiores a los 0.5°C (Fig. 49).



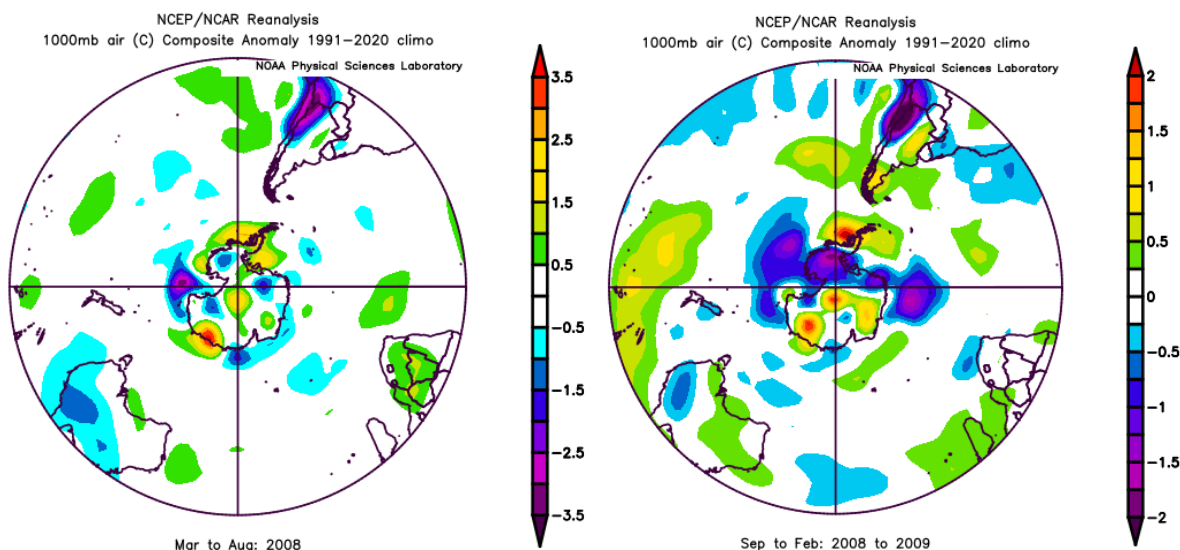


Figura 49. Anomalía anual de temperatura para la estación fría (izquierda) y cálida (derecha), de los años 2006 (superior) y 2008 (inferior) para la región 40-90°S. Fuente: Physical Sciences Laboratory, NOAA.

El año 1999 también destacó con una gran cantidad de eventos cálidos (BCAA: 11, FREI: 8, KOREA: 10), así como también los años 2000 (8 eventos en BCAA, y 7 en FREI y KOREA), 2003 (7 en BCAA y KOREA, 6 en FREI) y 2010 (BCAA: 8, FREI: 7, KOREA: 6) (Fig. 47). Todos estos años presentaron anomalías anuales positivas en el análisis de temperatura visto en el capítulo anterior (Fig. 36), siendo el año 2008 el de mayor anomalía (0.9°C) seguido por el año 1999 (0.8°C).

En lo que refiere a la distribución mensual de los eventos cálidos, resulta interesante observar que la mayor ocurrencia de eventos sucede en los meses más fríos del año, principalmente de junio a setiembre, siendo éstos a su vez los eventos de mayores anomalías ($> 5^{\circ}\text{C}$). La menor ocurrencia se da en los meses cálidos de enero y febrero, siendo éstos eventos menos intensos (anomalías inferiores a 2.5°C). Junio destaca como el mes de mayor ocurrencia de eventos cálidos (12 eventos registrados en BCAA, 11 en FREI y en KOREA). También destacan los meses de setiembre, noviembre y marzo como meses de ocurrencia de eventos cálidos, habiéndose registrado en BCAA al menos un total de 10 eventos en cada mes (Fig. 50). En cuanto a la duración de los eventos, no se observó un claro patrón que relacione la persistencia de los eventos y el momento del año. Los eventos más largos ocurrieron en setiembre y noviembre (11 días de duración), y mayo y agosto (9 días). Enero, julio y agosto registraron eventos de 7 días de duración. Finalmente, junio destacó como el mes de mayor cantidad de eventos que abarcan las 3 estaciones (BCAA, FREI y KOREA), con un total de 11 eventos en toda la serie temporal. Marzo presentó un total de 7 eventos compartidos por las 3 estaciones, y los meses de julio, agosto y setiembre presentaron 6 eventos compartidos por las 3 estaciones.

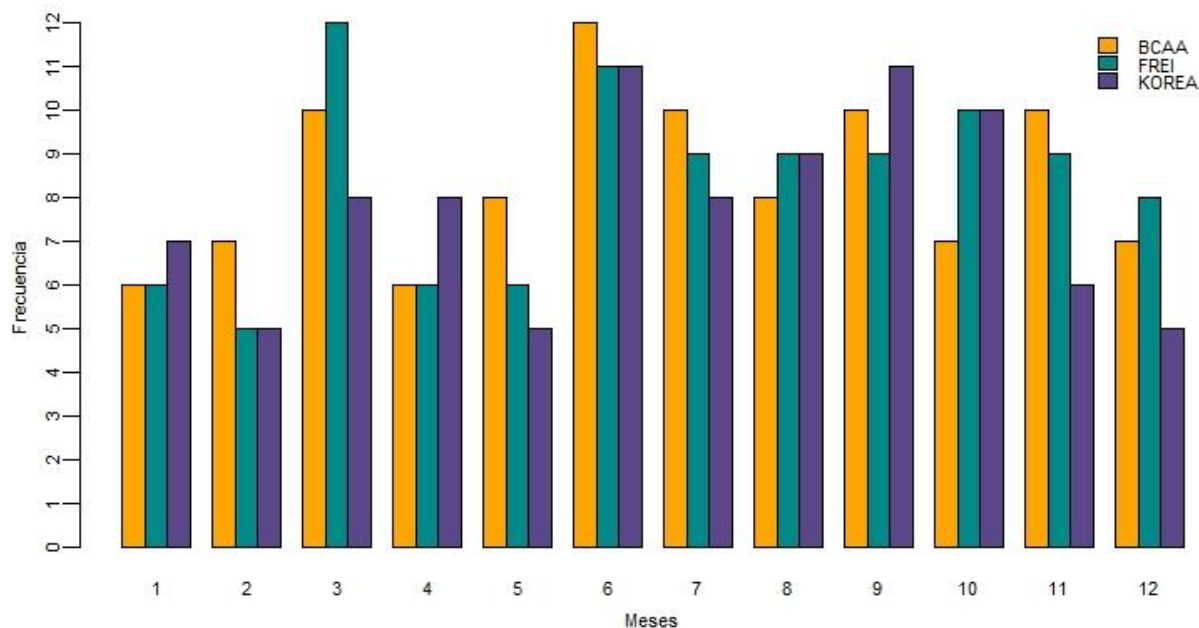


Figura 50. Distribución mensual de los EC para las 3 estaciones (BCAA, FREI y KOREA).

El diagrama de caja de la Fig. 51 muestra la dispersión de las temperaturas asociadas a la totalidad de los EC encontrados en las 3 estaciones antárticas. Todas las cajas cuentan con más de 50 observaciones, siendo enero y febrero los meses de menor cantidad de observaciones (76 y 62 respectivamente) y los meses de junio y julio son los que presentan mayor cantidad de datos (129 y 130 respectivamente). Se observa una asimetría en los datos en prácticamente todos los meses, exceptuando febrero que es el mes más simétrico, con una media y mediana prácticamente iguales (3.25 y 3.2°C respectivamente). Por el contrario, marzo es el mes más asimétrico en cuanto a la distribución de los valores de los eventos cálidos, siendo ésta positiva, con una media de 3.18°C y una mediana de 3°C.

Junio y diciembre son los meses que presentan mayor dispersión en sus EC, con un rango intercuartil de 1.1°C cada uno. En el primer caso el 50% de las temperaturas se encuentra entre -0.1 y 1°C, mientras que en el segundo el rango es entre 1.4 y 2.5°C. Por el contrario, febrero es el mes de menor dispersión en lo que respecta a las temperaturas de los EC, presentando un rango intercuartil de 0.7°C, y la mitad de los valores entre 2.9 y 3.6°C. Considerando que febrero es el mes de menor cantidad de observaciones (62), destaca agosto como el segundo mes de menor dispersión de datos (RIC=0.7°C). Todos los EC presentan una media mensual positiva, a excepción de los meses de julio y agosto, cuyas medias son negativas (-0.2 y -0.3°C, respectivamente). En lo que respecta a los outliers, marzo es el mes con mayor cantidad de valores extremos, siendo un total de 8 outliers que adoptan valores entre 4.8 y 6.1°C. También destaca el mes de noviembre con 6 outliers, cuyos valores van de 2.5 a 4.8°C. Resulta también interesante destacar que varios de los eventos cálidos ocurridos en los meses de invierno, superan las medias de los meses de verano.

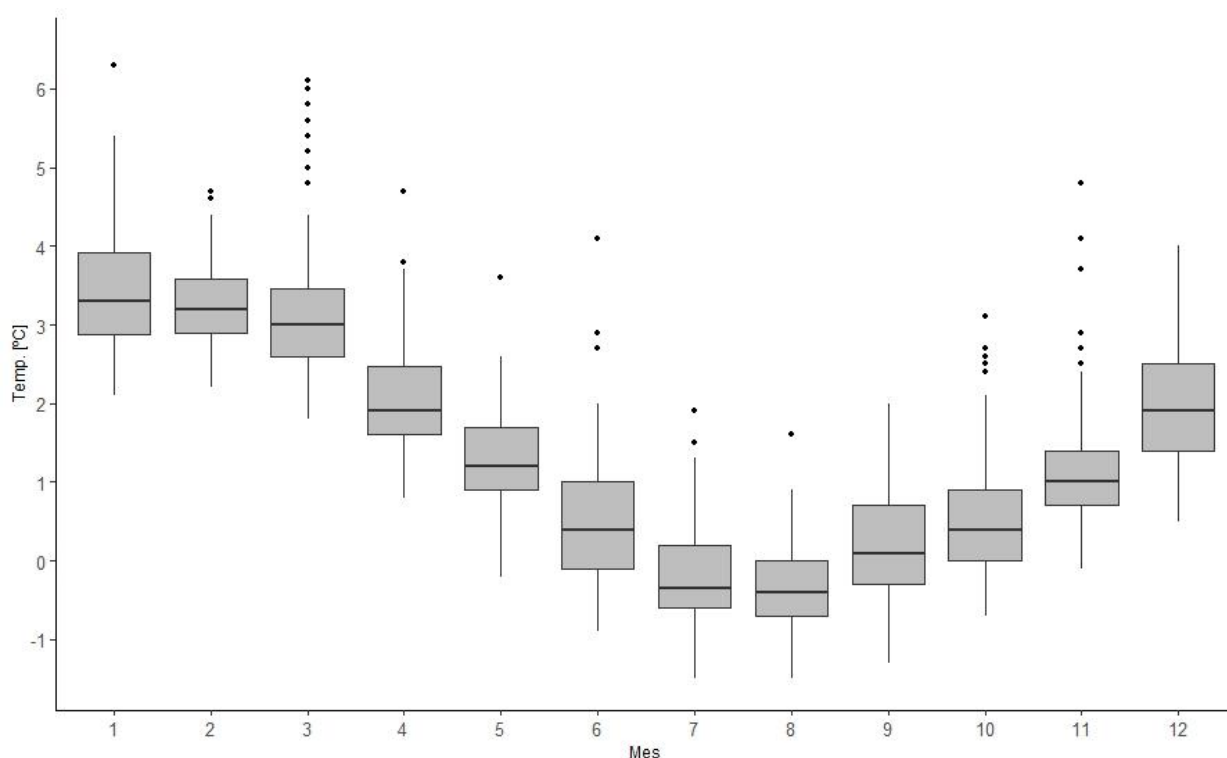


Figura 51. Dispersión mensual de las temperaturas asociadas a la totalidad de los EC (3 estaciones). En negro se observan los outliers.

Al realizar un análisis estacional (época cálida y fría), se constató que en BCAA más de la mitad de los EC ocurrieron en la época fría (54 eventos), que comprende los meses de marzo a agosto, lo que tiene sentido al ver que la mayor cantidad de eventos ocurrió en el mes de junio. A su vez, en la Fig. 52 se observa que los años 2009, 2012, 2014 y 2015 no presentaron EC en la época cálida en ninguna de las bases, mientras que la época fría presentó EC todos los años, a excepción del 2015.

En la época cálida destacan los años 1999, 2008 y 2010 como los años que mayor cantidad de eventos superiores al P90 presentaron, siendo el 2008 el más significativo, con 7 eventos detectados tanto en BCAA como en FREI, y 8 en KOREA. Por su parte FREI registró también 7 EC en los años 2001 y 2005. En la época fría destacan de forma genérica los años 2000 y 2006 con la mayor ocurrencia de eventos cálidos, alcanzando en el año 2000 un total de 6 eventos tanto en BCAA como en FREI, y 5 eventos en KOREA, y en el 2006 5 eventos en BCAA y 7 en FREI y KOREA. También destaca el año 1999 con 6 eventos en BCAA y los años 2003 y 2012 con 5 EC cada uno. A su vez, en la época cálida se observa una alternancia entre años con mayor cantidad de eventos y años con menor cantidad. En lo que respecta a la época fría, la primera mitad de la serie (1998-2006) registró mayor cantidad de eventos.

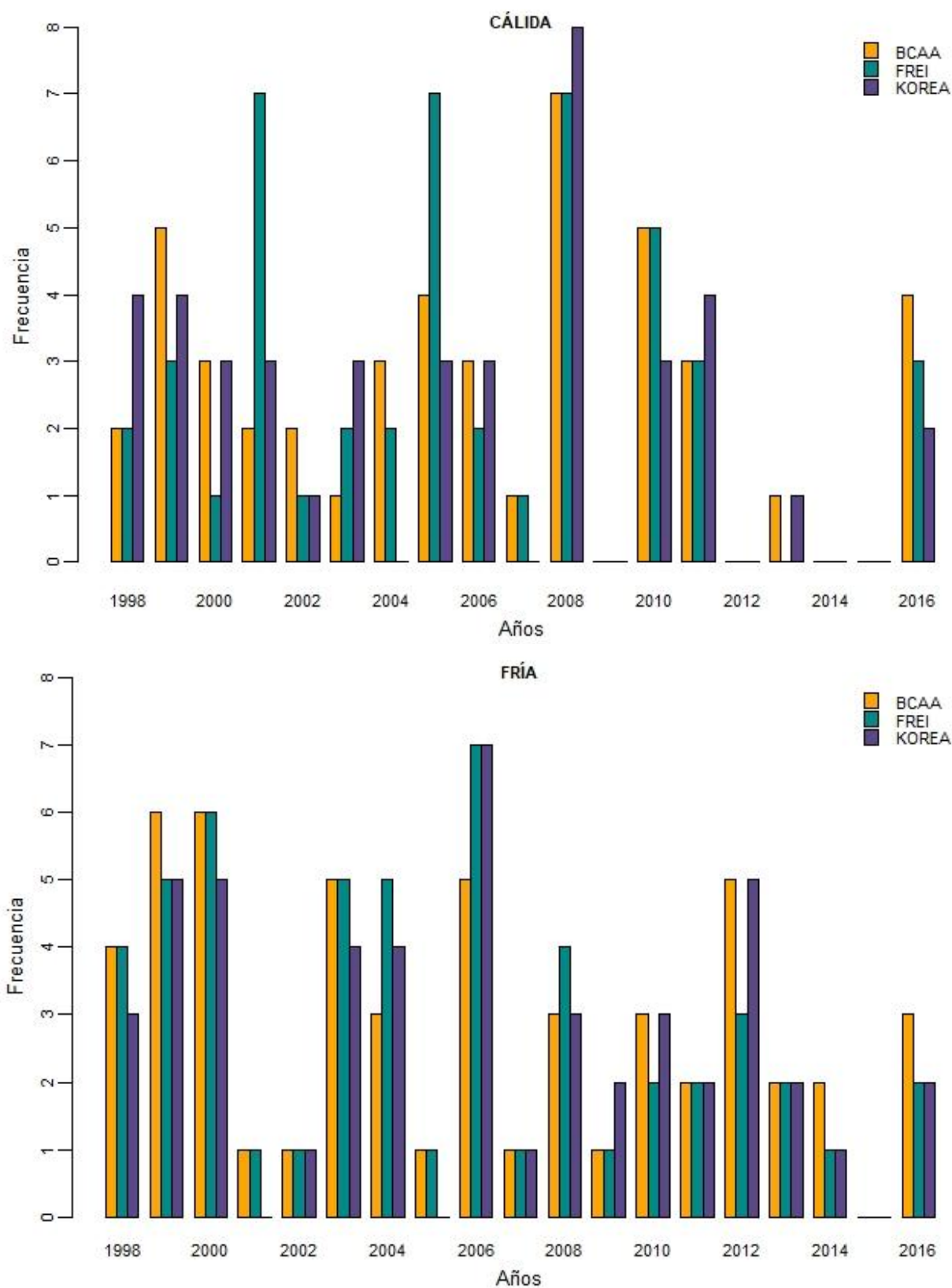


Figura 52. Distribución anual de los EC para la época cálida (superior) y fría (inferior), para las 3 estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

- **ECE**

En lo que respecta a los eventos cálidos extremos, únicamente dos eventos fueron compartidos entre las tres estaciones y ambos ocurrieron en la estación fría (18/06/1998 y 07/08/2003); 5 eventos fueron compartidos sólo con FREI, 6 sólo con KOREA, y 6 eventos fueron registrados únicamente en BCAA (Anexo III y IV). Se registraron 14 eventos sólo para FREI y 2 sólo para KOREA. Todos los eventos registrados en BCAA presentaron una duración de entre 3 y 4 días (Fig. 53), siendo la mayoría de ellos de tan sólo 3 días. Sin embargo, KOREA registró dos eventos de 5 días de duración (09/06/1999 y 27/08/2012) y FREI dos EC de 6 días (15/05/2000 y 28/08/2003). Sumando todos los días de ECE, se obtiene que un total de 199 días constituyeron eventos cálidos extremos, lo que equivale a casi el 3% de la serie total.

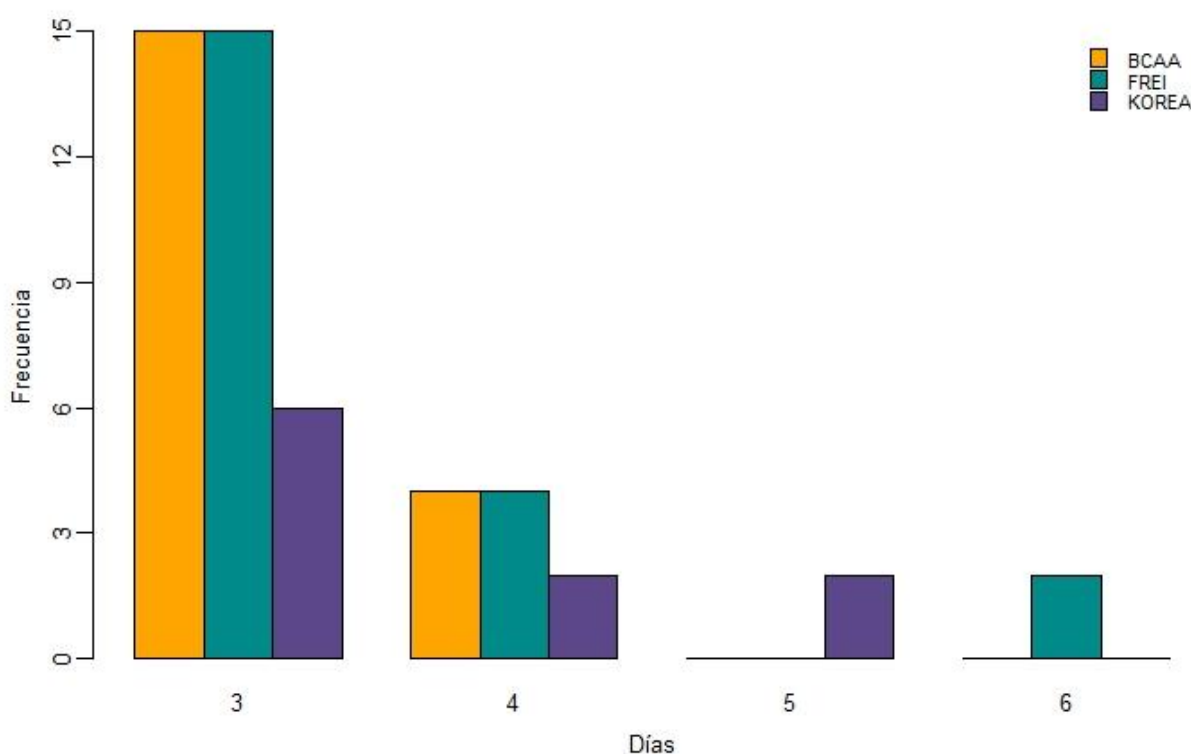


Figura 53. Frecuencia de los ECE acorde a su duración para cada una de las estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

En lo que respecta a la distribución anual de los eventos extremos que superaron el percentil 99, destacan los años 1998, 2006 y 2008 con ocurrencia de ECE, presentando BCAA hasta 4 eventos en el 2008, y FREI hasta 4 en el 2006. En el primero de los mencionados años se registraron 3 eventos en FREI y 2 eventos en BCAA y KOREA, en el segundo caso fueron 2 eventos para BCAA, 4 para FREI y 1 para KOREA, y en el último caso fueron 4 para BCAA y 2 para KOREA. Estos 3 años presentaron anomalías positivas de temperatura, siendo el 2008 el año más cálido de

toda la serie. Por el contrario, los años 2002, 2009, 2010, 2013, 2014 y 2015 no registraron ningún evento extremo en ninguna de las estaciones (Fig. 54).

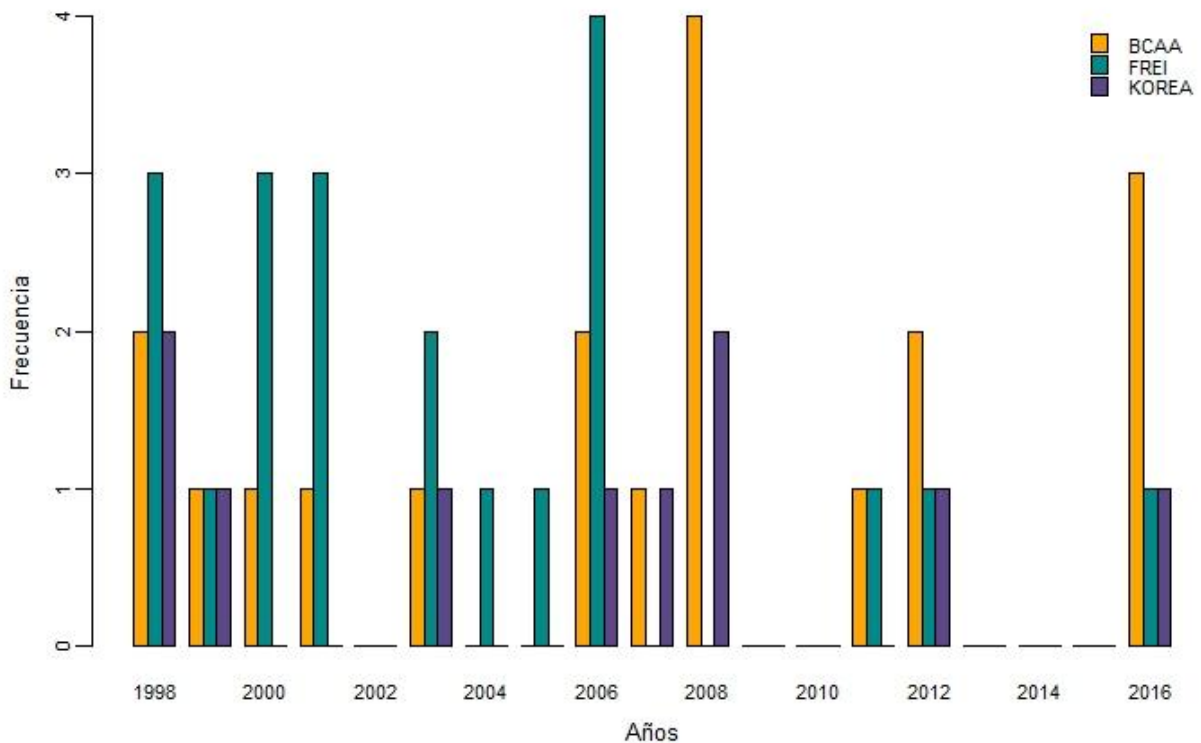


Figura 54. Distribución anual de los ECE, para las estaciones BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

Los ECE mostraron una ocurrencia a lo largo de todo el año, a excepción de los meses cálidos: febrero no registró eventos en ninguna de las 3 estaciones, y enero presentó sólo 1 evento en KOREA. Realizando un análisis espacial, Agosto es el mes que mostró mayor ocurrencia de eventos cálidos extremos, habiendo ocurrido 3 en BCAA y KOREA, y 2 en FREI. Si nos centramos en la frecuencia de eventos por estación, marzo y junio fueron los meses que mayor cantidad de eventos presentaron en FREI. En la serie de BCAA destacan los meses de mayo, julio, agosto y octubre como los meses de mayor registro de eventos, registrándose 3 eventos en cada mes (Fig. 55).

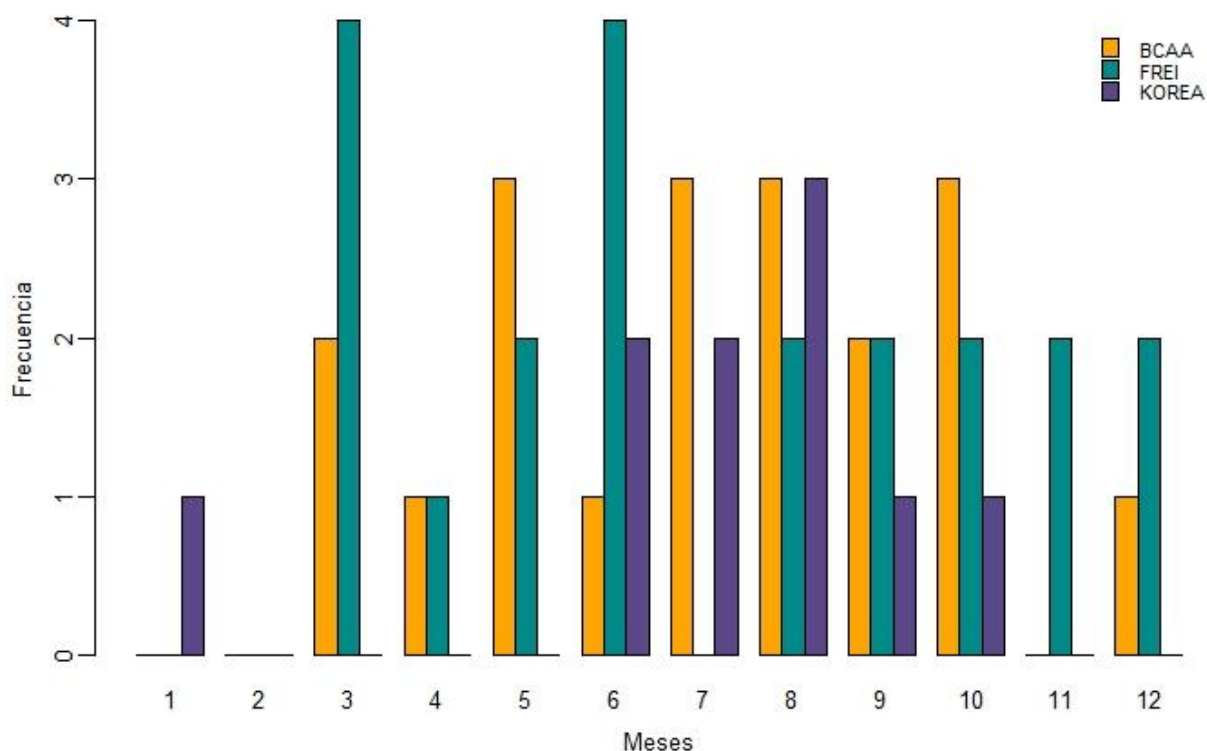


Figura 55. Distribución mensual de los ECE para las 3 estaciones (BCAA, FREI y KOREA).

Los ECE del mes de diciembre fueron los que presentaron la mayor simetría en lo que respecta a las temperaturas alcanzadas, presentando una media y mediana de 2°C , al tiempo que marzo presentó los ECE con mayor asimetría positiva en su distribución, con una media de 3.5°C y una mediana de 3.2°C . Junio fue el mes que presentó mayor rango intercuartil (1.3°C) de la temperatura de los ECE, lo que significa que la mitad central de las temperaturas se encuentran entre los 0°C y 1.3°C , que se visualiza en la Fig. 56 en una caja de mayor tamaño. Por el contrario, los ECE del mes de Noviembre presentaron la mitad central de sus temperaturas en un pequeño rango de 0.8 y 1°C . En lo que refiere a los outliers, marzo fue el mes que mayor cantidad presentó, alcanzando temperaturas de 5.6°C , el máximo alcanzado en los ECE.

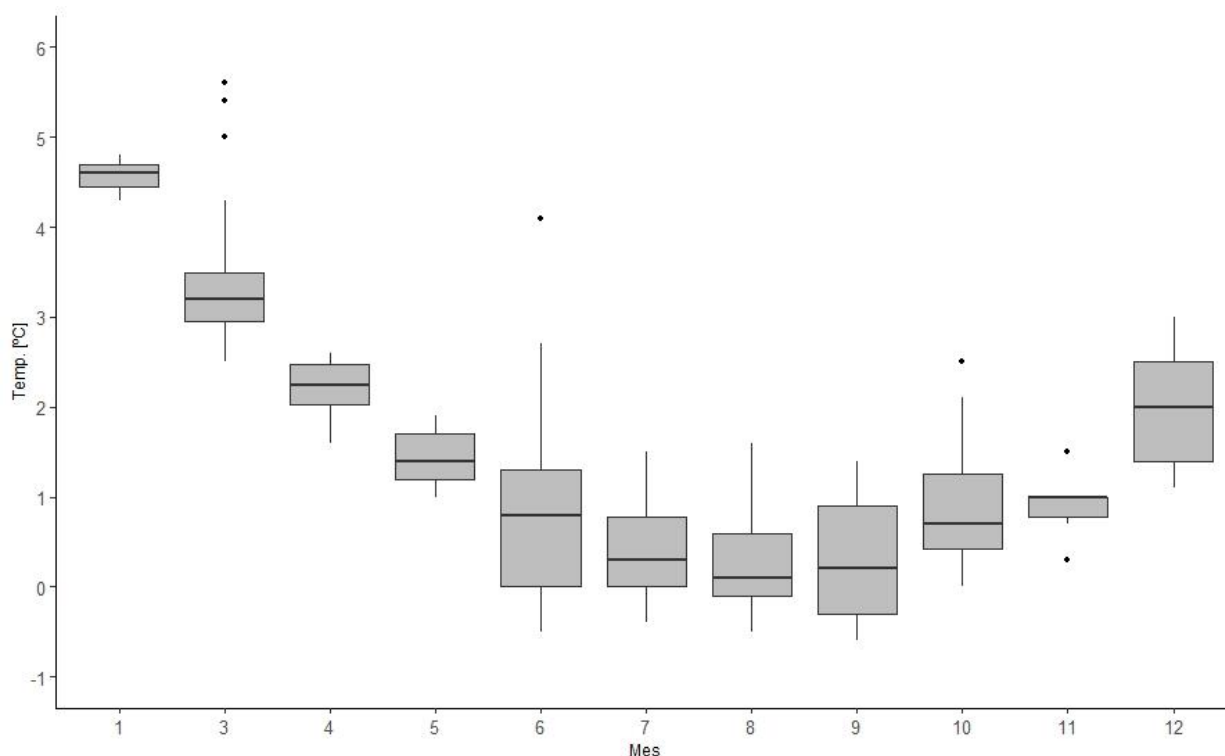


Figura 56. Dispersión mensual de las temperaturas asociadas a la totalidad de los ECE (3 estaciones). En negro se observan los outliers.

La distribución estacional de los ECE es, al igual que los EC, mayor en la época fría que en la cálida, registrándose un total de 13 y 6 eventos respectivamente (Fig. 57). El único año que registró eventos durante la época cálida en las 3 estaciones fue el 2006, con 1 evento cada una, siendo éste coincidente entre BCAA y KOREA el 19/10/2006 con una persistencia de 3 días y una anomalía positiva de 3.5°C. Por su parte, FREI registró un ECE el 3 de diciembre del mismo año. BCAA también presentó eventos durante los años 2008 y 2016, registrando 3 eventos en el primer año y 2 en el segundo. Uno de los eventos del 2008 (15/09/2008) fue también compartido por KOREA con 3 días de duración y una anomalía de 4.5°C. El 04/09/2016 también hubo un ECE compartido con FREI, con una duración de 4 días y una anomalía de 5.8°C. FREI registró su máximo de 3 eventos en el año 2001, y los únicos 2 eventos registrados por KOREA (2006 y 2008) fueron compartidos con BCAA (Fig. 57, superior).

Por su parte, la época fría registró eventos en las 3 estaciones en los años 1998, 2003 y 2012, alcanzando en el caso de BCAA 2 eventos por año en 1998 y 2012. FREI registró 3 eventos en 1998, 2000 y 2006. Los eventos extremos del 18/06/1998 y 07/08/2003 fueron compartidos por las 3 estaciones y tuvieron ambos una persistencia de 4 días. El primero de ellos tuvo una media de 1.1°C, que si comparamos con la media mensual climatológica del mes de junio (-4.8°C), la anomalía fue de 6.5°C. KOREA no presentó más de 1 evento extremo por año (Fig. 57, inferior).

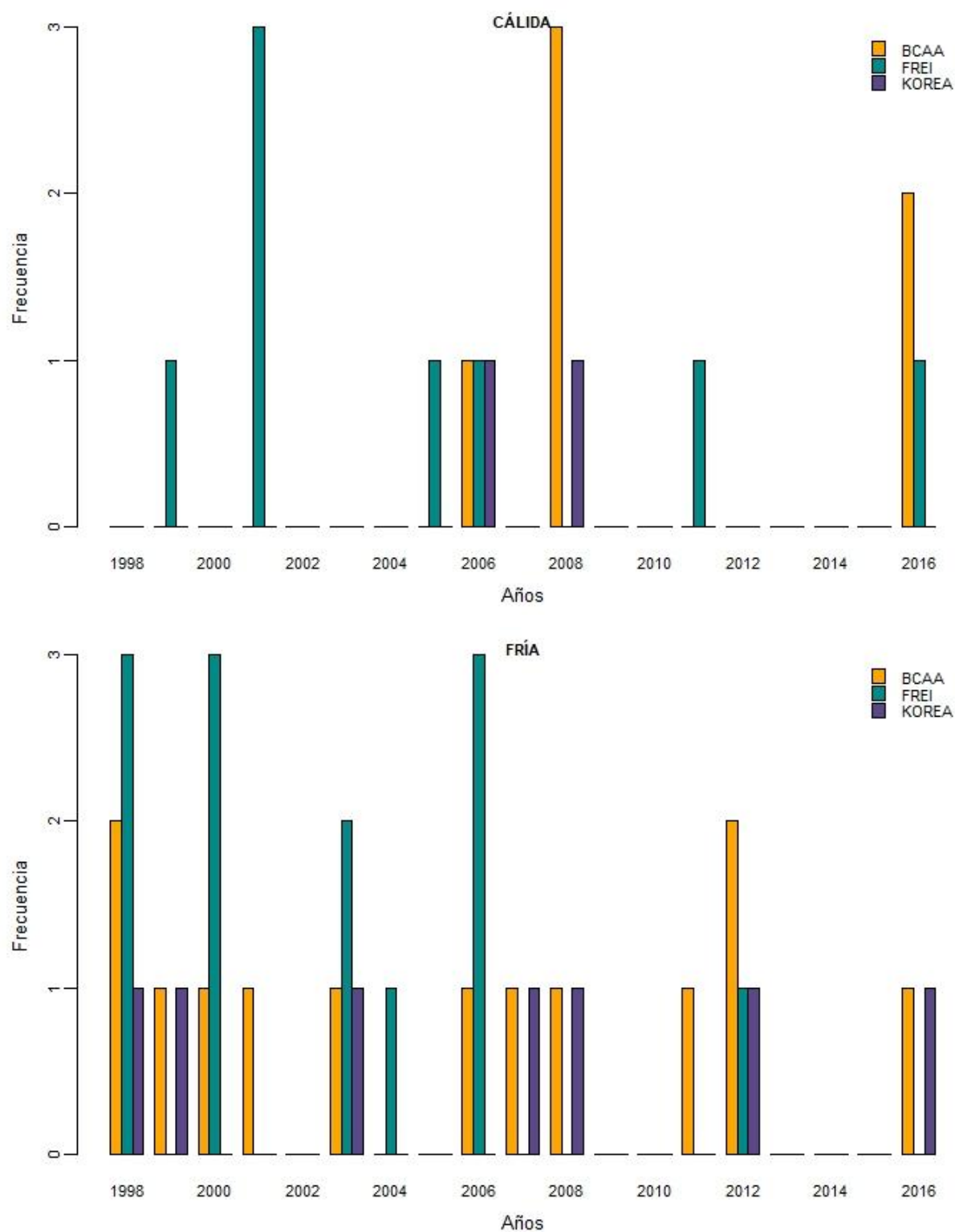


Figura 57. Distribución anual de los ECE en la época cálida (superior) y fría (inferior), para las 3 estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

En cuanto a la duración de los eventos, llama la atención que los ocurridos en la estación fría presentan una mayor duración que los de la estación cálida. Si bien en ambas estaciones los eventos de 3 días de duración son los más frecuentes, y la

frecuencia de los eventos disminuye conforme aumentan los días de duración, la estación fría presenta mayor frecuencia de EC de más de 5 días de duración, así como también eventos de hasta 9 días tanto en BCAA como en FREI. Esta diferencia se observa con mayor claridad en los eventos extremos (ECE), en los que la estación cálida presenta eventos sólo de 3 y 4 días, mientras que en la estación fría los mismos tienen una duración de hasta 6 días en FREI. Cabe aclarar que en el caso de BCAA, tanto los ECE de la estación cálida como la fría presentaron una persistencia máxima de 4 días (Fig. 58).

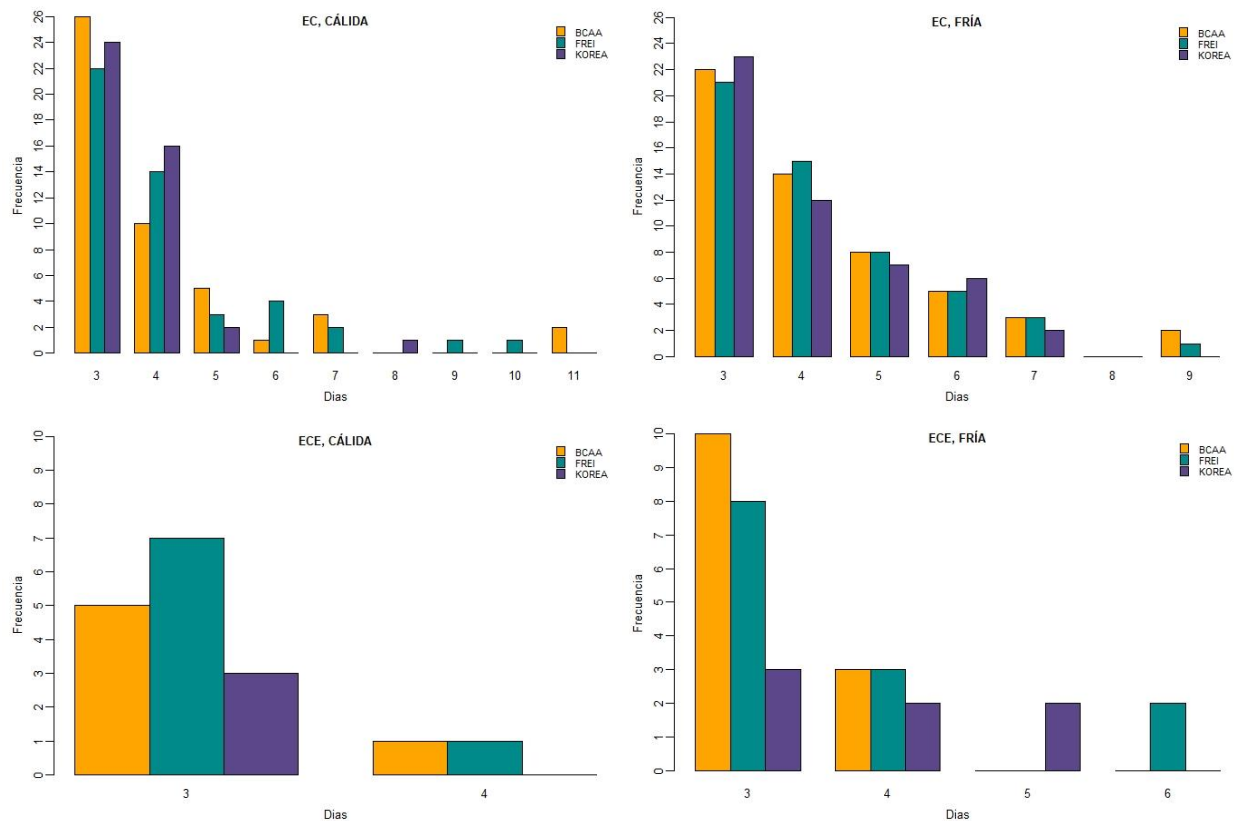


Figura 58. Días de duración de los eventos EC (imágenes superiores) y ECE (imágenes inferiores), para la época cálida (izquierda) y fría (derecha) para las 3 estaciones: BCAA (naranja), FREI (verde) y KOREA (violeta).

CAPÍTULO 6.

ANÁLISIS DE EVENTOS CÁLIDOS EXTREMOS

El presente capítulo analiza los aspectos de la circulación atmosférica asociada a los ECE. Realizamos una descripción de la circulación media en la región y los principales modos de variabilidad.

6.1 Eventos Cálidos Extremos

Teniendo en mente las características generales de la circulación que fueron vistas en el capítulo 2, se estudiaron los campos de anomalías de temperatura del aire, presión y viento a nivel de superficie (1000 hPa) y geopotencial a nivel de 500 hPa para analizar en más detalle la conformación espacial durante los meses en los que ocurrieron ECE. Para ello se seleccionaron todos los meses que presentaron 2 o más ECE en la totalidad de la serie, y se realizaron composiciones estacionales de las anomalías de dichas variables del reanálisis del NCEP, con el uso de climatologías de 1991 a 2020 (<https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>). En la Tabla 10 se detallan los eventos que fueron utilizados para las composiciones. Los únicos meses que fueron descartados por no presentar suficientes eventos fueron Enero, Febrero y Abril.

Tabla 10. Eventos utilizados para los composites. Se detalla la cantidad de eventos por mes, así como la fecha de inicio de cada uno y la cantidad total de días mensuales utilizados para cada composición. La columna Índice ONI clasifica el año en función de la anomalía de temperatura del trimestre noviembre, diciembre, enero. En azul destacan las anomalías negativas (evento Niña), en rojo las anomalías positivas (evento Niño) y en negro los eventos neutro.

	Nº de ECE	Días	Fechas	Índice ONI	Índice SAM
Marzo	4	10	09/03/2000	Niña	+
			21/03/2006, 29/03/2006	Niña	+
			02/03/2012	Niña	+
Mayo	4	16	15/05/2000	Niña	+
			18/05/2001	Niña	-
			01/05/2006	Niña	+
			26/05/2011	Niña	+
Junio	5	18	18/06/1998, 29/06/1998	Niño	+
			09/06/1999	Niña	-
			17/06/2000	Niña	-
			02/06/2004	Neutro	+
Julio	3	10	08/07/1999	Niña	+
			25/07/2008	Niña	+

			18/07/2016	Niño	+
Agosto	4	17	07/08/2003, 28/08/2003	Niño	+
			19/08/2007	Niño	-
			27/08/2012	Niña	+
			07/09/2005	Niña	+
Setiembre	3	10	15/09/2008	Niña	+
			04/09/2016	Niño	+
			15/10/2001, 29/10/2001	Niña	+
Octubre	5	15	19/10/2006	Niña	+
			29/10/2008	Niña	+
			29/10/2016	Niño	-
			17/11/1999	Niña	+
Noviembre	2	6	04/11/2011	Niña	-
			13/12/2001	Niña	+
Diciembre	3	9	03/12/2006	Niña	+
			18/12/2008	Niña	+

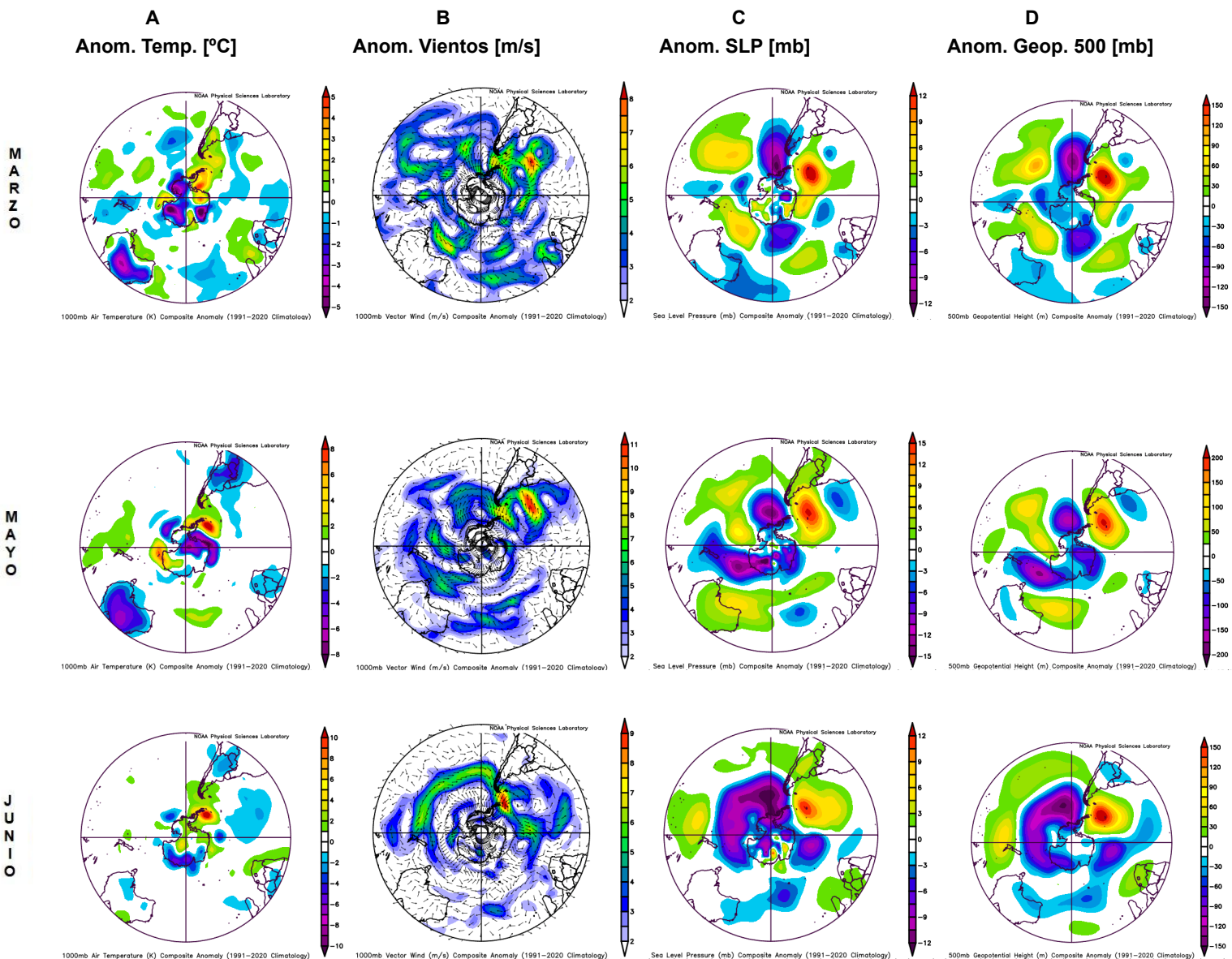
Las composiciones obtenidas se observan en la Fig. 59. Allí se observa una clara consistencia espacial entre los eventos encontrados y las condiciones climáticas para la región en dichos períodos. En lo que respecta a la temperatura del aire, en todos los casos la anomalía abarca un área sustancialmente mayor a la Isla Rey Jorge, incluso la isla no está dentro de las temperaturas máximas de la anomalía. En la gran mayoría de los eventos, el centro de la anomalía de temperatura se localiza al este de la PA, abarcando gran parte de ella. Excepciones a esto son los meses de julio y setiembre, en los que la mayor anomalía se localiza sobre la PA y hacia el oeste de la misma, y los meses de noviembre y diciembre. En el primero de ellos, la anomalía ocurre del lado este de la PA pero hacia el interior del continente. En el segundo caso, la anomalía máxima ocurrió en el sur de América del Sur, siendo más leve en la región antártica.

Excepto en noviembre y diciembre, en el resto de los meses se observa, en simultáneo, una anomalía de temperatura negativa sobre ciertas partes del continente sudamericano, siendo en algunos meses de mayor intensidad. En los meses de marzo, mayo, agosto y setiembre, dicha anomalía negativa cubre toda o casi toda la superficie de Uruguay, con valores de hasta 6°C por debajo de la media en el mes de agosto. En dichos eventos, Paraguay se observa en casi todos los casos afectado con anomalías negativas, que en agosto alcanzan los 10°C por debajo de la media. Los meses de noviembre y diciembre, la anomalía positiva de temperatura se extiende hacia el norte, alcanzando partes de Brasil y Bolivia.

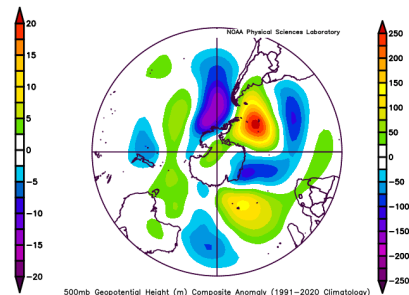
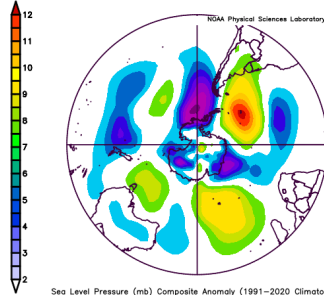
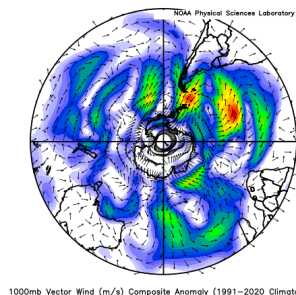
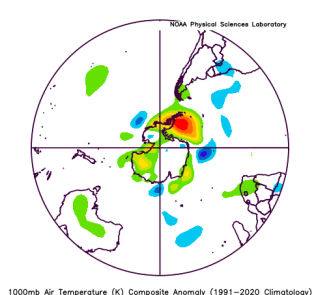
Estas anomalías positivas de temperatura en la región de la PA cobran sentido observando las anomalías de los vientos en superficie (Fig. 59B), donde en todos los meses se observa una advección de viento cálido proveniente del Norte anómalamente positiva, de hasta 10 o 12 m/s por encima de la media, en la región frente a la PA.

Dicha advección es favorecida por un bloqueo atmosférico de presión (Fig. 59C). Tal como se observa en las figuras, en todos los meses ocurre un marcado dipolo en las variaciones de presión, con un centro de baja presión al oeste de la PA y con sentido de giro horario, y un centro de alta presión al este de la PA y con sentido de giro antihorario. Este dipolo se visualiza con anomalías negativas de presión (centro de baja) en color azul a violeta, y anomalías positivas de presión (centro de alta) en color amarillo a rojo. Estos sentidos de giro (horario a la izquierda y antihorario a la derecha) genera que confluyan en el centro del bloqueo los vientos predominantes del Norte, trayendo aire cálido de latitudes menores.

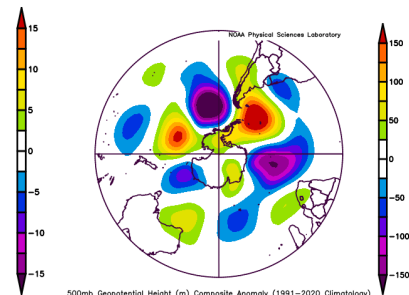
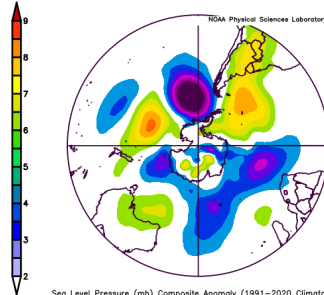
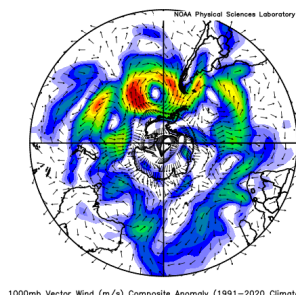
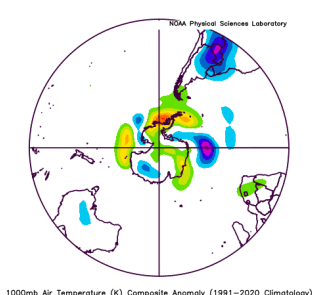
A su vez, analizando el campo de altura geopotencial en 500 hPa (Fig. 59D) junto con la presión a nivel del mar (Fig. 59C) se puede inferir que se trata de una atmósfera barotrópica, lo que significa que todos los niveles muestran aproximadamente los mismos patrones en las anomalías de altura geopotencial y de presión.



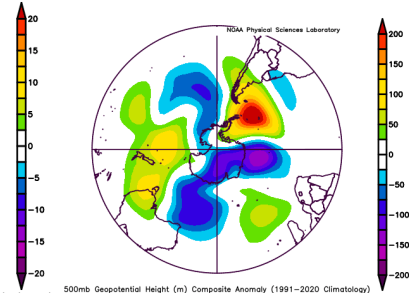
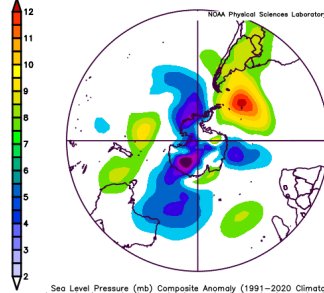
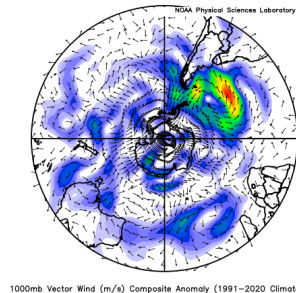
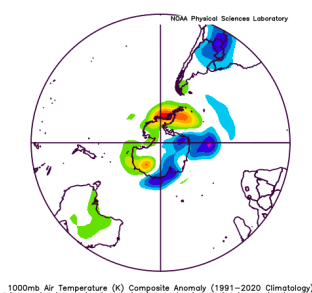
JULIO



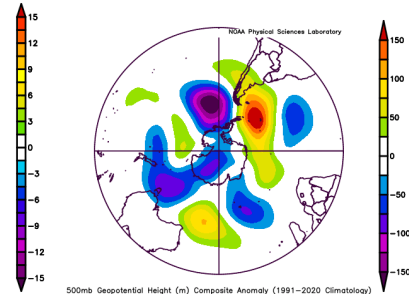
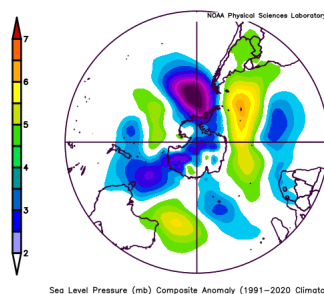
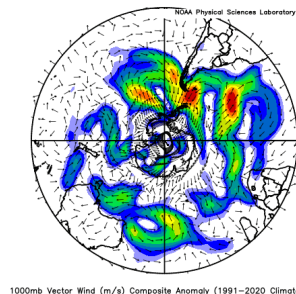
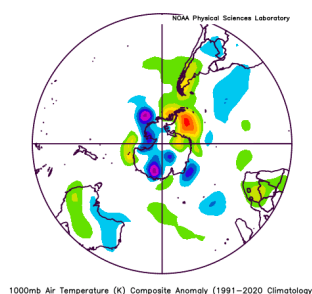
AGOSTO



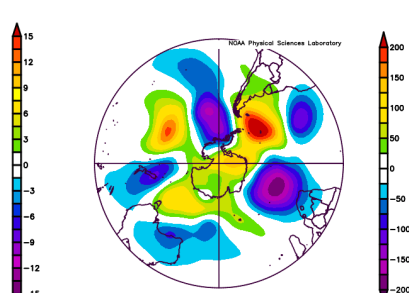
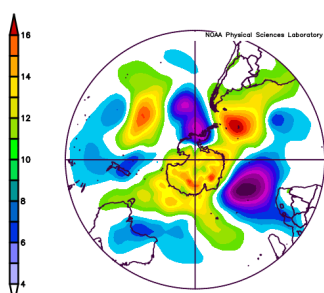
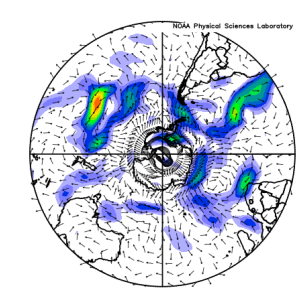
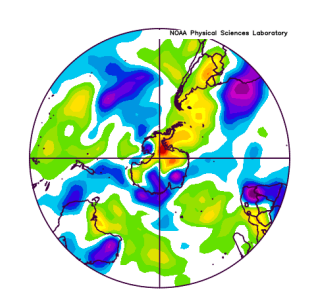
SEPTIEMBRE



OCTUBRE



NOVIEMBRE



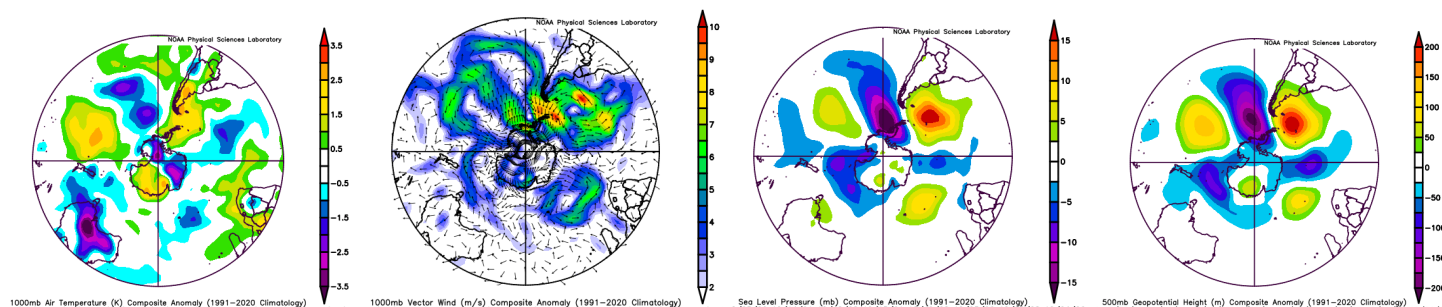


Figura 59. Composiciones estacionales de anomalías de las variables: temperatura del aire en superficie (A), vector viento en superficie (B), presión a nivel del mar - SLP (C) y geopotencial en 500 hPa (D). Los datos tienen una resolución diaria y las anomalías se construyeron sobre la climatología del período 1991-2020, y fueron obtenidos del *Physical Sciences Laboratory* de la NOAA en Boulder, Colorado (<https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>).

Tras haber analizado los campos de anomalías de temperatura del aire, presión, viento y geopotencial en 500 hPa para los ECE, se analizó qué ocurrió con el máximo de presión atmosférica (1036.4 hPa) detectado en la serie el 08/09/2000 a las 12 UTC. Para ello se realizó una composición de los mismos campos para el período 06 al 09 de setiembre del 2000 inclusive. Se seleccionaron esos días por presentar presiones iguales o superiores a los 1015 hPa, valor que ya se encuentra en la cola de distribución de presión, tal como se vio en el Capítulo 4 (Fig. 22). En la Fig. 60 se visualizan los 4 campos analizados para dicho período. Si bien se trató de un potente sistema de alta presión, no generó un evento cálido, sino que por el contrario, la temperatura en la Isla Rey Jorge presentó una anomalía negativa de aproximadamente 6°C. Esto es debido a que el centro de alta, a diferencia de los ECE, se localizó al oeste de la PA, y esto genera que su circulación en sentido antihorario genere una anomalía de vientos de componente Sur, trayendo aire frío hacia la PA, tal como se observa en la Fig. 60 superior derecha. Con esto se concluye que alta presión no significa necesariamente alta temperatura.

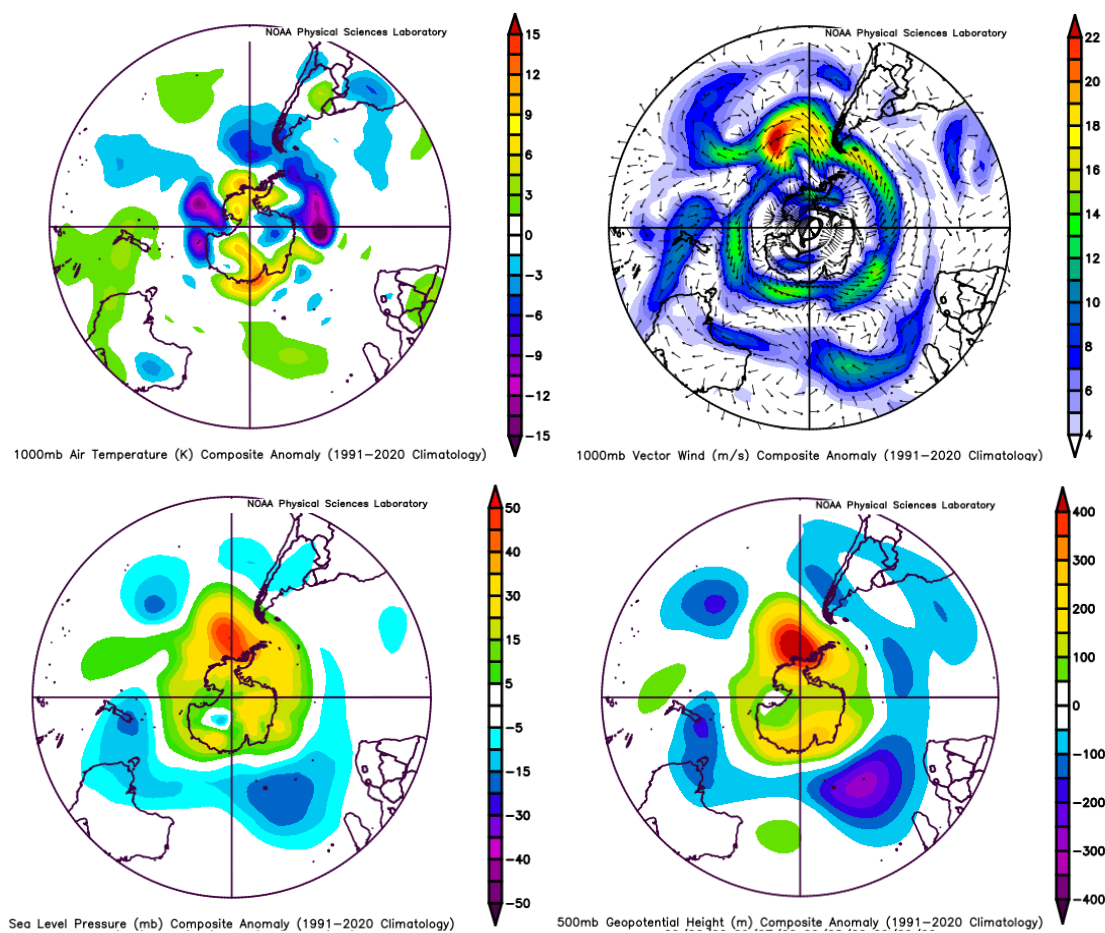


Figura 60. Composiciones estacionales de anomalías de las variables: temperatura del aire en superficie (superior izquierda), vector viento en superficie (superior derecha), presión a nivel del mar - SLP (inferior izquierda) y geopotencial en 500 hPa (inferior derecha). Los datos tienen una resolución diaria y las anomalías se construyeron sobre la climatología del período 1991-2020, y fueron obtenidos del *Physical Sciences Laboratory* de la NOAA en Boulder, Colorado (<https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>).

Cabe también mencionar que el máximo de temperatura de 9.1°C alcanzado el día 25/01/2004 no constituyó un evento cálido. Tras buscar los EC mediante la serie anual de medias diarias, se observó que el día 24/01/2004 fue un día cálido (superando el percentil 90) y el 25/01/2004 fue muy cálido (superaron el percentil 99), pero no así el día 26/01/2004, por lo que no se alcanzó el criterio de tres días consecutivos con temperaturas por encima del percentil 90.

A partir del presente análisis, se desprende la importancia de analizar no sólo los campos de anomalías de presión y temperatura, sino evaluar además su ubicación, ya que para que ocurran eventos cálidos extremos en la Isla Rey Jorge es necesario que se forme la estructura de dipolo de baja y alta presión al oeste y este de la PA respectivamente. De este modo, la circulación de ambos en dicha posición generará una advección de aire cálido desde el Norte hacia la PA, elevando así la temperatura.

Tal como se observa en la Tabla 10, la gran mayoría de los ECE ocurrieron durante años clasificados como Niña acorde al índice ONI, así como durante fases positivas del

SAM, acorde al índice SAM descrito en el Cap. 2. Para ver si existe alguna relación entre la ocurrencia de eventos cálidos en el área de estudio y las fases de estos dos modos de variabilidad climática, se realizaron correlaciones con ambos índices y las anomalías medias mensuales de temperatura de los meses de junio y octubre para cada una de las estaciones, por ser éstos los meses con mayor cantidad de eventos extremos (5 cada uno).

Para el caso de El Niño - Oscilación del Sur, se utilizaron para las correlaciones los trimestres MJJ (mayo, junio y julio) y SON (setiembre, octubre, noviembre) del período 1998-2016. Se realizó el test estadístico no paramétrico Rho de Spearman (ρ) para las 3 estaciones (BCAA, FREI, KOREA). En todos los casos la correlación de rango de Spearman fue negativa y estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$), lo que significa que a una anomalía positiva de temperatura media mensual se correlaciona con un índice ONI negativo, reflejando una fase de La Niña. Las correlaciones fueron levemente mayores para el mes de octubre que para el de junio y, a su vez, fueron mayores para BCAA que para las demás estaciones (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados del test paramétrico Rho de Spearman (ρ) realizado entre el trimestre MJJ y el mes de junio de cada estación, y el trimestre SON y el mes de octubre de cada estación.

		ρ (ρ)	S	p-valor
J U N	BCAA	- 0.43	1627.7	0.034
	FREI	- 0.42	1612.7	0.039
	KOREA	- 0.42	1613.7	0.038
O C T	BCAA	- 0.50	1706.7	0.015
	FREI	- 0.45	1656.7	0.051
	KOREA	- 0.48	1684.7	0.039

Para el caso del SAM, se utilizaron para las correlaciones los Índices mensuales de los meses junio y octubre. Se realizó el mismo test estadístico no paramétrico Rho de Spearman (ρ) para las 3 estaciones (BCAA, FREI, KOREA), y se encontró una correlación positiva, pero que no es estadísticamente significativa en ninguno de los casos (Tabla 12). Sin embargo, si bien la correlación no es significativa, y la cantidad de casos utilizados es pequeña, es importante resaltar que la mayoría de los ECE ocurrieron en fase positiva del SAM, y que trabajos como el de Fogt & Marshall (2020) han encontrado una correlación positiva y significativa entre la temperatura superficial media mensual de la región occidental de la Península Antártica y la fase positiva del SAM.

Tabla 12. Resultados del test paramétrico Rho de Spearman (ρ) realizado entre el trimestre MJJ y el mes de junio de cada estación, y el trimestre SON y el mes de octubre de cada estación.

		rho (ρ)	S	p-valor
J U N	BCAA	0.56	506	0.99
	FREI	0.48	596	0.98
	KOREA	0.52	542	0.99
O C T	BCAA	0.44	638	0.97
	FREI	0.45	630	0.97
	KOREA	0.49	582	0.98

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES

En relación al primer objetivo específico, se generó una base de datos confiable a escala horaria mediante un exhaustivo control de calidad de las variables meteorológicas temperatura y presión en superficie de INUMET para la estación antártica Artigas. Se ordenó, sistematizó y dio uso a una base de datos nacional totalmente subutilizada y que no había sido trabajada hasta el momento ni utilizada en publicaciones científicas. A partir de esto, se realizarán las gestiones pertinentes para que dicha base de datos sea incorporada al proyecto READER del Comité Científico de Investigación Antártica para que pueda ser utilizada por la comunidad científica antártica y que constituya, además, un aporte del país al conocimiento de la región antártica.

En relación al segundo objetivo, se generó una climatología con parámetros estadísticos básicos para las variables temperatura y presión, analizando además la variabilidad espacial con el uso de información de bases antárticas cercanas (FREI y KOREA). Ambas variables presentaron un ciclo anual con una marcada variabilidad interanual y estacional, siendo la época fría la de mayor variabilidad y mayores anomalías, tanto positivas como negativas. La variabilidad estacional observada entre la época fría y cálida puede deberse principalmente al movimiento estacional del cinturón de bajas presiones. Este cinturón suele moverse 5° hacia el norte en junio/julio y 5° hacia el sur en diciembre/enero, ocasionando un predominio de presiones altas en la isla durante la época fría y presiones más bajas durante la época cálida. A su vez, la variación en posición e intensidad del centro de baja presión ASL modifica el campo de vientos meridionales locales (del Norte-Noroeste), ocasionando un fortalecimiento o debilitamiento del flujo del norte hacia la PA, conduciendo a un calentamiento o enfriamiento de la costa occidental de la misma. No se encontró una tendencia significativa para la temperatura media mensual.

Por último, se analizaron los eventos cálidos ocurridos en 3 puntos de la Isla Rey Jorge, detectando una alta frecuencia (ocurrencia en todos los años excepto el 2015) que es sorprendentemente mayoritaria en la época fría y con gran variabilidad interanual. El análisis preliminar de la circulación atmosférica asociada a los eventos resalta la importancia de evaluar la ubicación de las anomalías de presión. La dinámica atmosférica asociada a los mismos se vio compuesta por una estructura de dipolo de anomalía de presión atmosférica en superficie, con un centro de baja presión al oeste de la PA y uno de alta presión al este de la misma, con la consecuente generación de una advección de viento cálido proveniente del Norte, trayendo aire cálido de latitudes menores. Se encontró también una correlación negativa y estadísticamente significativa entre los ECE y el fenómeno de La Niña, por lo que es esperable una mayor configuración del dipolo de presión durante años Niña, con una consecuente mayor

ocurrencia de ECE. Si bien la mayoría de los ECE ocurrieron durante fases positivas del SAM, las correlaciones estadísticas no fueron significativas.

Trabajos a futuro

El presente trabajo pretende generar un aporte a la ciencia antártica y ser un insumo tanto para proyectos que realizan actualmente actividad de investigación en la Isla Rey Jorge, así como para dar comienzo a un área de investigación que Uruguay no ha explorado aún en el área del clima antártico.

En futuras investigaciones se pretende abarcar los siguientes aspectos:

- incorporar información de más estaciones antárticas de la IRJ para ampliar la cobertura espacial.
- ampliar la cobertura temporal, alcanzando idealmente un período no menor a 30 años.
- analizar en profundidad la información generada sobre la intensidad de los ECE (Anexos II y III), así como el impacto de los mismos.
- analizar la base de datos generada en búsqueda de Eventos Fríos Extremos.
- analizar en mayor profundidad la circulación atmosférica y los modos de variabilidad asociados a ambos extremos de temperatura.
- analizar los datos en función de la variabilidad de la concentración de ozono estratosférico para ver cómo dicho gas impacta en la variabilidad de temperatura y en la ocurrencia de ECE.

Finalmente, cabe mencionar que generar conocimiento científico antártico es un deber a nivel país para poder continuar siendo miembro consultivo del Tratado Antártico.

BIBLIOGRAFÍA

- Bañón, M.; Justel, A.; Velázquez, D.; Quesada, A. (2013). Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 25(2), 146-156.
- Blindow, N.; Suckro, S. K.; Rückamp, M.; Braun, M.; Schindler, M.; Breuer, B.; Saurer, H.; Simões, J. C.; Lange, M. A. (2010). Geometry and thermal regime of the King George Island ice cap, Antarctica, from GPR and GPS. *Annals of Glaciology* 51(55): 103-109 (2010).
- Bracegirdle, T. J. (2013). Climatology and recent increase of westerly winds over the Amundsen Sea derived from six reanalyses. *Int. J. Climatol.* 33: 843-851 (2013). DOI: 10.1002/joc.3473.
- Bracegirdle, T. J. & Marshall, G. J. (2012). The Reliability of Antarctic Tropospheric Pressure and Temperature in the Latest Global Reanalyses. *Journal of Climate*, Vol. 25: 7138-7146. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00685.1.
- Braun, C.; Esefeld, J.; Peter, H.-U. (2017). Monitoring the consequences of local climate change on the natural resources of the ice-free regions of Maxwell Bay (King George Island, Antarctic). Polar and Bird Ecology Group, Institute of Ecology, Friedrich-Schiller-University Jena. ISSN 1862-4804.
- Braun, M. & Gossmann, H. (2002). Glacial changes in the areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, maritime Antarctica. *Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes*, Vol. 154: 75-89 (2002).
- Braun, M.; Saurer, H.; Vogt, S.; Cardia Simões, J.; Gossmann, H. (2001). The influence of large-scale atmospheric circulation on the surface energy balance of the King George Island ice cap. *International Journal of Climatology*, Vol. 21: 21-36 (2001).
- British Antarctic Survey (1999). The Antarctic Treaty Explained. Recuperado el 16/03/2022 de <https://www.bas.ac.uk/about/antarctica/the-antarctic-treaty/the-antarctic-treaty-explained/>
- British Antarctic Survey (2022). Extreme temperatures in Antarctica. Atmosphere, Ice and Climate team. Recuperado de <https://www.bas.ac.uk/blogpost/what-extreme-temperatures-mean-for-antarctica/>
- Carvalho, L. M.; Jones, C.; Ambrizzi, T. (2005). Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. *Journal of climate*, 18(5): 702-718.
- Cerlini, P. B.; Silvestri, L.; Saraceni, M. (2020). Quality control and gap-filling methods applied to hourly temperature observations over central Italy. *Meteorological Applications*, 27(3). DOI: 10.1002/met.1913.

- Chan, P. W.; Catto, J. L.; Collins, M. (2022). Heatwave–blocking relation change likely dominates over decrease in blocking frequency under global warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1): 1-8. DOI: 10.1038/s41612-022-00290-2
- Chapman, W. L. & Walsh, J. E. (2006). A Synthesis of Antarctic Temperatures. *Journal of Climate*, Vol. 20: 4096-4117. DOI: 10.1175/JCLI4236.1.
- Cheng, A. R.; Lee, T. H.; Ku, H. I.; Chen, Y. W. (2016). Quality control program for real-time hourly temperature observation in Taiwan. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(5), 953–976. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0005.1.
- Clem, K. R. & Fogt, R. L. (2013). Varying roles of ENSO and SAM on the Antarctic Peninsula climate in austral spring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (20): 11.481 - 11.492. DOI: 10.1002/jgrd.50860.
- 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*, Vol. 121: 9324-9341. DOI: 10.1002/2016JD025305.
- Collins M.; Sutherland, M.; Bouwer, L.; Cheong, S.-M.; Frölicher, T.; Jacot Des Combes, H.; Koll Roxy, M.; Losada, I.; McInnes, K.; Ratter, B.; Rivera-Arriaga, E.; Susanto, R.D.; Swingedouw, D.; Tibig, L. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Minterbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- COPERNICUS - ECMWF (2020). Reanalysis Q&As. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Disponible en: <https://climate.copernicus.eu/reanalysis-qas>
- Copland, L. (2013). Classification of ice masses. In: *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA., Glacial and Periglacial Geomorphology, Vol.8: 45–52. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00193-7.
- Council of Managers of National Antarctic Programs. (2017). Antarctic Station Catalogue. ISBN 978-0-473-40409-3. Recuperado el 03/11/2022 de: https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaaf464/t/611497cc1ece1b43f0eeca8a/1628739608968/COMNAP_Antarctic_Station_Catalogue.pdf
- Da Rosa, K. K.; Freiburger, V. L.; Vieira, R.; Algayer da Rosa, C.; Simões, J. C. (2014). Glacial recent changes and climate variability in King George Island, Antarctica. *Quaternary and Environmental Geosciences* 05(2): 176-183 (2014).
- Dastidar, P. G., & Persson, O. (2005). Mapping the global structure of Antarctic research vis-à-vis Antarctic Treaty System. *Current Science*, 89(9), 1552-1560.
- Dätwyler, C.; Grosjean, M.; Steiger, N. J.; Neukom, R. (2020). Teleconnections and relationship between the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and the Southern

- Annular Mode (SAM) in reconstructions and models over the past millennium. *Climate of the Past*, 16 (2): 743-756. DOI: 10.5194/cp-16-743-2020.
- Davies, B. (2023, 11 de febrero). Southern Annular Mode. AntarcticGlaciers.org, URL: <https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/changing-antarctica/southern-annular-mode/>
- Dierssen, H. M.; Smith, R. C.; Vernet, M. (2002). Glacial meltwater dynamics in coastal waters west of the Antarctic peninsula. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 99 (4): 1790-1795. DOI: 10.1073/pnas.032206999.
- Doran, P. T.; Prisco, J. C.; Lyons, W. B.; Walsh, J. E.; Fountain, A. G.; McKnight, D. M.; Moorhead, D. L.; Virginia, R. A.; Wall, D. H.; Clow, G. D.; Fritsen, C. H.; McKay, C. P.; Parsons, A. N. (2002). Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. *Nature*, 415 (6871): 517-520.
- Dudeney, J. R., & Walton, D. W. (2012). Leadership in politics and science within the Antarctic Treaty. *Polar Research*, 31 (1), 11075.
- Elzinga, A. (2011). Origin and limitations of the Antarctic treaty. *Science diplomacy: Antarctica, science, and the governance of international spaces*.
- Ferron, F.; Simões, J.; Aquino, F.; Setzer, A. (2004). Air temperature time series for King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, Vol. 4: 155-169 (2004). ISSN 0103-4049.
- Fogt, R. L.; Bromwich, D. H.; Hines, K. M. (2011). Understanding the SAM influence on the South Pacific ENSO teleconnection. *Clim Dyn*, Vol. 36: 1555-1576 (2011). DOI: 10.1007/s00382-010-0905-0.
- Fogt, R. L.; Jones, J. M.; Renwick, J. (2012). Seasonal zonal asymmetries in the Southern Annular Mode and their impact on regional temperature anomalies. *Journal of Climate*, Vol. 25 (18): 6253-6270. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00474.1.
- Fogt, R. L. & Marshall, G. J. (2020). The Southern annular mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 11 (4): e652. DOI: 10.1002/wcc.652.
- Foken, T.; Göckede, M.; Mauder, M.; Mahrt, L.; Amiro, B.; Munger, W. (2004). Post-field data quality control. In *Handbook of micrometeorology* (pp. 181-208). Springer, Dordrecht.
- Gerber, E. P. & Martineau, P. (2018). Quantifying the variability of the annular modes: reanalysis uncertainty vs. sampling uncertainty. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 18 (23): 17099-17117. DOI: 10.5194/acp-18-17099-2018.
- Gonzalez, S.; Vasallo, F.; Recio-Blitz, C.; Guijarro, J. A.; Riesco, J. (2018). Atmospheric patterns over the Antarctic Peninsula. *Journal of Climate*, 31 (9): 3597-3608. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0598.1.

- González-Herrero, S.; Barriopedro, D.; Trigo, R. M.; López-Bustins, J. A.; Oliva, M. (2022). Climate warming amplified the 2020 record-breaking heatwave in the Antarctic Peninsula. *Communications Earth & Environment*, 3 (1): 1-9. DOI: 10.1038/s43247-022-00450-5
- Hosking, J. S.; Orr, A.; Marshall, G. J.; Turner, J.; Phillips, T. (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*, 26(17), 6633–6648. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00813.1.
- Hunt, G. L.; Drinkwater, K. F.; Arrigo, K.; Berge, J.; Daly, K. L.; Danielson, S.; Daase, M.; Hop, H.; Isla, E.; Karnovsky, N.; Laidre, K.; Mueter, F. J.; Murphy, E. J.; Renaud, P. E.; Smith, W. O.; Trathan, P.; Turner, J.; Wolf-Gladrow, D. (2016). Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems. In *Progress in Oceanography* (Vol. 149, pp. 40–81). Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.pocean.2016.10.004.
- Instituto Antártico Uruguayo (s.f.). Lineamientos para el desarrollo de la actividad científica de Uruguay en la Antártida. Recuperado el 17/03/2022 de http://www.iau.gub.uy/?page_id=932&doing_wp_cron=1647527940.9756369590759277343750&lang=es
- Jones, P. D. (1995). Recent variations in mean temperature and the diurnal temperature range in the Antarctic. *Geophysical Research Letters*, 22(11): 1345-1348.
- Jones, R. W.; Renfrew, I. A.; Orr, A.; Webber, B. G. M.; Holland, D. M.; Lazzara, M. A. (2016). Evaluation of four global reanalysis products using in situ observations in the Amundsen Sea Embayment, Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121. DOI: 10.1002/2015JD024680.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77 (3), 437-472. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2. Provided by the NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA, from their Website: <https://psl.noaa.gov/>
- Kejna, M.; Arazny, A.; Sobota, I. (2013). Climatic change on King George Island in the years 1948–2011. *Polish Polar Research*, Vol. 34, no. 2: 213-235 (2013). DOI: 10.2478/popore-2013-0004.
- Kerr, R.; Mata, M.; Mendes, C.; Secchi, E. (2018). Northern Antarctic Peninsula: a marine climate hotspot of rapid changes on ecosystems and ocean dynamics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 149: 4-9 (2018). DOI: 10.1016/J.DSR2.2018.05.006.

- King, J. C. (1994). Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *International Journal of Climatology*, Vol. 14: 357-369 (1994). DOI: 551.524.34(99:410).
- King, J. C. & Turner, J. (1997). *Antarctic meteorology and climatology*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series (p. 425). ISBN 0521465605.
- King, J. C.; Turner, J.; Marshall, G. J.; Connolley, W. M.; Lachlan-Cope, T. A. (2003). Antarctic Peninsula climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records. *Antarctic Research Series*, Vol. 79: 17-30 (2003).
- Lee, T.; Hobbs, W. R.; Willis, J. K.; Halkides, D.; Fukumori, I.; Armstrong, E. M.; Hayashi, A. K.; Liu, W. T.; Patzert, W.; Wang, O. (2010). Record warming in the South Pacific and western Antarctica associated with the strong central-Pacific El Niño in 2009–10. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37 (19): L19704. DOI: 10.1029/2010GL044865.
- Lefebvre, W.; Goosse, H.; Timmermann, R.; Fichefet, T. (2004). Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice–ocean system. *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, C09005. DOI: 10.1029/2004JC002403.
- Macheret, Y. Y. & Moskalevsky, M. Y. (1999). Study of Lange Glacier on King George Island, Antarctica. *Annals of Glaciology* 29(1): 202-206. DOI: 10.3189/172756499781820941.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. *Journal of Climate*, Vol. 16: 4134-4143 (2003).
- Marshall, G. J. (2007). Half-century seasonal relationships between the Southern Annular Mode and Antarctic temperatures. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27 (3): 373-383. DOI: 10.1002/joc.1407.
- Marshall, G. J., & Thompson, D. W. J. (2016). The signatures of large-scale patterns of atmospheric variability in Antarctic surface temperatures. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 121: 3276-3289 (2016). DOI: 10.1002/2015JD024665.
- Meredith, M. P.; Falk, U.; Bers, A. V.; Mackensen, A.; Schloss, I. R.; Ruiz Barlett, E.; Jerosch, K.; Busso, A. S.; Abele, D. (2018). Anatomy of a glacial meltwater discharge event in an Antarctic cove. *Phil. Trans. R. Soc. A* 376: 20170163. DOI: 10.1098/rsta.2017.0163.
- Moll, A. & Braun, M. (2006). Determination of glacier velocities on King George Island (Antarctica) by DinSAR. In 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (pp. 1236-1239). IEEE.
- Monaghan, A. J.; Bromwich, D. H.; Chapman, W.; Comiso, J. C. (2008). Recent variability and trends of Antarctic near-surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D04105. DOI: 10.1029/2007JD009094.

- Neder, C.; Fofonova, V.; Androsov, A.; Kuznetsov, I.; Abele, D.; Falk, U.; Schloss, I. R.; Sahade, R.; Jerosch, K. (2022). Modelling suspended particulate matter dynamics at an Antarctic fjord impacted by glacier melt. *Journal of Marine Systems*, 231 (2022), 103734. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2022.103734.
- Nicolas, J. P. & Bromwich, D. H. (2014). New Reconstruction of Antarctic Near-Surface Temperatures: Multidecadal Trends and Reliability of Global Reanalyses. *Journal of Climate*, Vol. 27: 8070-8093 (2014). DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00733.1.
- Njau, E. C. (1990). A new process by which the general circulation system is maintained. International Atomic Energy Agency and United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy. IC/90/402.
- Nowosielski, L. (1980). Meteorological conditions at Arctowski Station in 1978 (King George Island, South Shetland Islands). *Polish Polar Research*, 83-93.
- Nygard, T.; Vihma, T.; Birnbaum, G.; Hartmann, J.; King, J.; Lachlan-Cope, T.; Ladkin, R.; Lüpkes, C.; Weiss, A. (2016). Validation of eight atmospheric reanalyses in the Antarctic Peninsula region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 142: 684-692, January 2016 B DOI: 10.1002/qj.2691.
- Organización Meteorológica Mundial (2000). Guía del Sistema Mundial de Proceso de Datos. Parte VI. Procedimientos de control de calidad. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial - Ginebra - Suiza (2000) N°305.
- Organización Meteorológica Mundial (2010). Guía del Sistema Mundial de Observación. Parte VI. Control de calidad de los datos. N°488.
- Organización Meteorológica Mundial (2018). Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume V – Quality Assurance and Management of Observing Systems.
- Osmanoglu, B.; Braun, M.; Hock, R.; Navarro, F. J. (2013). Surface velocity and ice discharge of the ice cap on King George Island, Antarctica. *Annals of Glaciology* 54(63): 111-119 (2013). DOI: 10.3189/2013AoG63A517.
- Parker, W. S. (2016). Reanalyses and observations: What's the difference?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(9), 1565-1572.
- Petlicki, M.; Szilo, J.; MacDonell, S.; Vivero, S.; Bialik, R. J. (2017). Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sens.* 2017, 9, 520. DOI: 10.3390/rs9060520.
- Petsch, C.; Costa, R. M.; Da Rosa, K. K.; Vieira, R.; Simões, J. C. (2019). Geomorfologia glacial e contexto paleoglaciológico da Península Fildes, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol. 20 (4) (2019). DOI: 10.20502/rbg.v20i4.1480.
- Petsch, C.; Da Rosa, K. K.; Vieira, R.; Braun, M. H.; Mattos Costa, R.; Simões, J. C. (2020). The effects of climatic change on glacial, proglacial and paraglacial

- systems at Collins Glacier, King George Island, Antarctica, from the end of the Little Ice Age to the 21st century. *Investigaciones geográficas*, (103). DOI: 10.14350/rig.60153.
- Raper, S. C. B.; Wigley, T. M. L.; Mayes, P. R.; Jones, P. D.; Salinger, M. J. (1984). *Variations in Surface Air Temperatures. Part 3: The Antarctic, 1957-82*. American Meteorological Society, 1984.
- Raphael, M. N.; Marshall, G. J.; Turner, J.; Fogt, R. L.; Schneider, D.; Dixon, D. A.; Hosking, J. S.; Jones, J. M.; Hobbs, W. R. (2016). The Amundsen sea low: Variability, change, and impact on Antarctic climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1), 111–121. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00018.1.
- Rebollo Márquez, G. (29 de noviembre de 2019). Sesenta años del Tratado Antártico. *Estudios de Política Exterior SA (España)*. Recuperado el 16/03/2022 de <https://www.politicaexterior.com/sesenta-anos-del-tratado-antartico/>
- Renom Molina, M. (2009). *Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relación con la circulación de gran escala*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Romanova, N. A. & Romanov P. Yu. (2020). Antarctic wind intensification as inferred from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Journal of Oceanological Research*, 2020, Vol. 48 (3): 96–108. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).6.
- RStudio Team (2021). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Rückamp, M. & Blindow, N. (2012). King George Island ice cap geometry updated with airborne GPR measurements. *Earth Syst. Sci. Data*, 4, 23–30, 2012. DOI: 10.5194/essd-4-23-2012.
- Rückamp, M.; Blindow, N.; Suckro, S.; Braun, M.; Humbert, A. (2010). Dynamics of the ice cap on King George Island, Antarctica: field measurements and numerical simulations. *Annals of Glaciology* 51(55): 80-90 (2010).
- Rückamp, M.; Braun, M.; Suckro, S.; Blindow, N. (2011). Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change* 79 (2011): 99–109. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.06.009.
- Rusticucci, M. & Barrucand, M. (2001). Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorologica*, 26, 69-84.
- Rusticucci, M. & Renom, M. (2007). Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*, 28(8), 1083–1095. DOI: 10.1002/joc.1607.
- Schneider, D. P.; Okumura, Y.; Deser, C. (2012). Observed Antarctic interannual climate variability and tropical linkages. *Journal of climate*, 25 (12): 4048-4066. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00273.1.

- Scientific Committee on Antarctic Research (s.f.). REference Antarctic Data for Environmental Research (READER). Recuperado el 05/11/2021 de <https://www.scar.org/resources/ref-data-environmental-research/>
- Seneviratne, S.I.; Zhang, X.; Adnan, M.; Badi, W.; Dereczynski, C.; Di Luca, A.; Ghosh, S.; Iskandar, I.; Kossin, J.; Lewis, S.; Otto, F.; Pinto, I.; Satoh, M.; Vicente-Serrano, S.M.; Wehner, M.; Zhou, B. (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766. DOI: 10.1017/9781009157896.013.
- Simões, M.; Ambrizzi, T.; Porfírio da Rocha, R. (2009). Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 24 (1): 48-55, 2009.
- Simões, J. C.; Bremer, U. F.; Aquino, F. E.; Ferron, F. A. (1999). Morphology and variations of glacial drainage basins in the King George Island ice field, Antarctica. *Annals of Glaciology* 29, 1999.
- Simões, C. L.; Da Rosa, K. K.; Czapela, F. F.; Vieira, R.; Simões, J. C. (2015). Collins Glacier retreat process and regional climatic variations, King George Island, Antarctica. *Geographical Review* 105 (4): 462–471, October 2015.
- Skansi, M. d. L.; King, J.; Lazzara, M. A.; Cervený, R. S.; Stella, J. S.; Solomon, S.; Jones, P.; Bromwich, D.; Renwick, J.; Burt, C. C.; Peterson, T. C.; Brunet, M.; Driouech, F.; Vose, R.; Krahenbuhl, D. (2017). Evaluating highest temperature extremes for the Antarctic region. *Eos*, 98. DOI:10.1029/2017EO068325.
- Smith, R. C.; Stammerjohn, S. E.; Baker, K. S. (1996). Surface air temperature variations in the western Antarctic Peninsula region. *Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula*, Vol. 70: 105-121.
- Stammerjohn, S. E.; Martinson, D. G.; Smith, R. C.; Yuan, X.; Rind, D. (2008). Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, C03S90. DOI: 10.1029/2007JC004269.
- Stastna, V. (2010). Spatio-temporal changes in surface air temperature in the region of the northern Antarctic Peninsula and South Shetland Islands during 1950–2003. *Polar Science*, 4 (1): 18-33. DOI: 10.1016/j.polar.2010.02.001
- Stuecker, M. F.; Bitz, C. M.; Armour, K. C. (2017). Conditions leading to the unprecedented low Antarctic sea ice extent during the 2016 austral spring season. *Geophys. Res. Lett.*, 44: 9008–9019. DOI: 10.1002/2017GL074691.

- Swanson, K. L.; Sugihara, G.; Tsonis, A. A. (2009). Long-term natural variability and 20th century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (38), 16120-16123. DOI: 10.1073/pnas.0908699106.
- Tetzner, D.; Thomas, E.; Allen, C. (2019). A Validation of ERA5 Reanalysis Data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth Land Region, and Its Implications for Ice Core Studies. *Geosciences* 2019, 9, 289. DOI: 10.3390/geosciences9070289.
- Thompson, D. W. J. & Solomon, S. (2002). Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, Vol. 296: 895-899 (2002).
- Thompson, D. W. J. & Wallace, J. M. (2000). Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, Vol. 13: 1000-1016 (2000).
- Thompson, D. W. J.; Solomon, S.; Kushner, P. J.; England, M. H.; Grise, K. M.; Karoly, D. J. (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, Review Article, Published Online (2011). DOI: 10.1038/NGEO1296.
- Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M.; Hegerl, G. C. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *Journal of Climate*, Vol. 13: 1018-1036.
- Tian, S.; Jin, H.; Gao, S.; Zhuang, Y.; Zhang, Y.; Wang, B.; Chen, J. (2015). Sources and distribution of particulate organic carbon in Great Wall Cove and Ardley Cove, King George Island, West Antarctica. *Advances in Polar Science*, Vol. 26 (1-English): 55-62. DOI: 10.13679/j.advps.2015.1.00055.
- Turner, J. (2004). The el nino–southern oscillation and antarctica. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24 (1): 1-31. DOI: 10.1002/joc.965.
- Turner, J.; Colwell, S. R.; Marshall, G. J.; Lachlan-Cope, T. A.; Carleton, A. M.; Jones, P. D.; Lagun, V.; Reid, P. A.; Iagovkina, S. (2004). The SCAR READER project: Toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. *Journal of Climate*, 17(14): 2890-2898.
- Turner, J.; Colwell, S. R.; Marshall, G. J.; Lachlan-Cope, T. A.; Carleton, A. M.; Jones, P. D.; Lagun, V.; Reid, P. A.; Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.* 25: 279-294 (2005). DOI: 10.1002/joc.1130.
- Turner, J.; King, J. C.; Lachlan-Cope, T. A.; Jones, P. D. (2002). Recent temperature trends in the Antarctic. *Nature*, 418(6895): 291-292.
- Turner, J.; Lu, H.; King, J.; Marshall, G. J.; Phillips, T.; Bannister, D.; Colwell, S. (2021). Extreme temperatures in the Antarctic. *Journal of Climate*, 34 (7): 2653-2668. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0538.1.

- Turner, J.; Marshall, G. J.; Clem, K.; Colwell, S.; Phillips, T.; Lu, H. (2019). Antarctic temperature variability and change from station data. *Int. J. Climatol.* 40: 2986-3007 (2020). DOI: 10.1002/joc.6378.
- Turner, J.; Phillips, T.; Hosking, J. S.; Marshall, G. J.; Orr, A. (2013). The Amundsen Sea Low. *International Journal of Climatology*, Vol. 33 (7): 1818-1829. DOI: 10.1002/joc.3558.
- Turner, J.; Scott Hosking, J.; Marshall, G. J.; Phillips, T.; Bracegirdle, T. J. (2016). Antarctic sea ice increase consistent with intrinsic variability of the Amundsen sea low. *Climate Dynamics*, 46(7–8), 2391–2402. DOI: 10.1007/s00382-015-2708-9.
- UNESCO/IOC (2020). Quality Control of in situ Sea Level Observations: A Review and Progress towards Automated Quality Control, Vol. 1. París, UNESCO/IOC. Manuals and Guides No.83. (IOC/2020/MG/83Vol.1).
- Van Lipzig, N. P.; Marshall, G. J.; Orr, A.; King, J. C. (2008). The relationship between the Southern Hemisphere Annular Mode and Antarctic Peninsula summer temperatures: Analysis of a high-resolution model climatology. *Journal of Climate*, Vol. 21(8): 1649-1668. DOI: 10.1175/2007JCLI1695.1.
- Veiga, H.; Herrera, N.; Skansi, M.; Podestá, G. (2015). Descripción de controles de calidad de datos climáticos diarios implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. Serie Reportes Técnicos – Reporte Técnico CRC-SAS-2014-001. Última actualización: 2015-12-15.
- Venturini, N.; Zhu, Z.; Bessonart, M.; García-Rodríguez, F.; Bergamino, L.; Brugnoli, E.; Muniz, P.; Zhang, J. (2020). Between-summer comparison of particulate organic matter in surface waters of a coastal area influenced by glacier meltwater runoff and retreat. *Polar Science*, 26, 100603. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100603.
- Welhouse, L. J.; Lazzara, M. A.; Keller, L. M.; Tripoli, G. J.; Hitchman, M. H. (2016). Composite analysis of the effects of ENSO events on Antarctica. *Journal of Climate*, 29 (5): 1797-1808. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0108.1.
- Ye, X.; Yang, X.; Xiong, X.; Yang, S.; Chen, Y. (2017). Spatial quality control method for surface temperature observations based on multiple elements. *Earth Sciences Research Journal*, 21(2), 101–107. DOI: 10.15446/esrj.v21n2.65185.
- Yoon, H. I.; Park, B. K.; Domack, E. W.; Kim, Y. (1998). Distribution and dispersal pattern of suspended particulate matter in Maxwell Bay and its tributary, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 152(4): 261-275.
- Zazulie, N.; Rusticucci, M.; Solomon, S. (2010). Changes in climate at high southern latitudes: a unique daily record at Orcadas spanning 1903–2008. *Journal of Climate*, 23 (1): 189-196. DOI: 10.1175/2009JCLI3074.1.

ANEXOS

Anexo I. Productos del control de calidad de los datos

Tabla A1. Valores de temperatura del aire que escapan al rango de control variable para la estación BCAA. Se detalla la fecha y hora, así como los valores registrados por las estaciones de FREI y KOREA. La columna EP representa la clasificación del tipo de Error Potencial, resaltando en negrita los EP de tipo 2 y 3.

Fecha	Hora (UTC)	BCAA	FREI	KOREA	EP
9/5/1998	0	20	-2,4	-1,8	2
8/9/1998	12	-18,9	-19,8	-19,2	1
9/9/1998	12	-18,9	-20,4	-19,9	1
9/9/1998	18	-19,4	-20	-19,6	1
10/9/1998	12	-20,6	-21,3	-20,5	1
10/9/1998	0	-20	-20,7	-20,4	1
11/9/1998	0	-18,9	-18,7	-17,8	1
11/1/1999	12	8,9	3,8	9,9	1
11/1/1999	18	7,8	2,8	9,9	1
29/11/1999	12	7,8	0,3	0,6	2
18/2/2001	6	-7,3	-4,2	-3,3	3
6/11/2001	6	-10	-0,9	-0,7	2
28/5/2002	0	-17	-16,3	-16	1
16/6/2002	6	-18,8	-19	-19,1	1
22/10/2002	18	-13	-14,1	-13,9	1
23/10/2002	0	-15	-15,9	-16,9	1
23/10/2002	6	-15,8	-15,7	-14,6	1
5/12/2002	6	-5,8	-3,5	-2,5	3
2/12/2003	6	-6,4	-6	-4,5	1
25/1/2004	0	9,1	5,2	8,1	1
29/12/2004	18	7,2	5,6	8,1	1
3/3/2005	18	11,8	1	1,9	2
30/6/2005	0	-20,4	-21,1	-21,8	1
30/6/2005	6	-20,6	-20,7	-21	1
30/6/2005	12	-18,4	-18,8	-19,7	1
30/6/2005	18	-20,3	-17	-15,5	1
1/7/2005	12	-19	-19,7	-20,7	1
1/7/2005	6	-19,1	-19,7	-20,2	1
2/7/2005	0	-19,6	-20,2	-20,2	1
1/7/2005	18	-18,8	-19,3	-19,7	1
2/3/2006	6	10,2	1,2	1,5	2
24/8/2006	12	-19	-19,5	-20	1
24/8/2006	18	-18,6	-19,8	-19,6	1
26/12/2006	12	7,8	4,3	7,5	1

3/7/2007	18	-20,6	-21,5	-21,3	1
4/7/2007	0	-21	-20,6	-21,4	1
4/7/2007	12	-20	-20	-19,7	1
10/7/2007	6	-19	-13,6	-18,2	1
14/7/2007	12	-20	-20,8	-20,7	1
14/7/2007	18	-23	-23,4	-23,2	1
15/7/2007	0	-23,5	-23,4	-23,2	1
15/7/2007	6	-22,6	-22,7	-22,8	1
15/7/2007	12	-23	-23	-22,4	1
15/7/2007	18	-23,2	-21,7	-21	1
16/7/2007	0	-21,6	-17,2	-22,5	1
16/7/2007	12	-21	-19,9	-19,8	1
16/7/2007	18	-18,4	-17,4	-16,7	1
17/7/2007	12	-19	-15,9	-18,4	1
19/7/2007	0	-18,8	-15,4	-18,1	1
21/7/2007	6	-19	-16,8	-18,9	1
21/7/2007	12	-20,3	-16,1	-18,5	1
22/7/2007	0	-18,6	-17,7	-18,5	1
25/7/2007	12	-19	-20,4	-20,4	1
25/7/2007	18	-21,4	-21,8	-21,6	1
26/7/2007	0	-22	-23,2	-21,7	1
26/7/2007	12	-19,3	-20,4	-20,4	1
1/11/2007	6	-8,2	-8,6	-8	1
2/11/2007	6	-8,6	-4,4	-4,1	1
6/12/2008	18	10,6	0,4	0,8	2
5/8/2009	6	-19,1	-19,4	-17,9	1
12/8/2009	0	-18,6	-19,8	-18,4	1
12/8/2009	6	-22,1	-19,5	-19,2	1
12/8/2009	12	-21,2	-20,4	-20,3	1
15/8/2009	0	-19,4	-17,9	-17,5	1
16/8/2009	0	-21,8	-21,2	-20,8	1
16/8/2009	6	-18,4	-18,3	-18,3	1
21/7/2011	12	-19	-19,3	-19,3	1
23/7/2011	6	-19,4	-25	-20,1	1
1/8/2011	18	-20	-20,7	-20,5	1
2/8/2011	0	-18,4	-19,8	-20,4	1
4/8/2011	6	-19,7	-20,4	-18,6	1
4/8/2011	12	-18,5	-18,7	-18	1
5/8/2011	0	-19,9	-17,3	-18,1	1
5/8/2011	6	-18,8	-16,7	-17,5	1
24/12/2011	12	10	0	0,7	2
1/1/2012	12	16	1,4	1,5	2
19/2/2012	0	-5	-5,7	-5,5	1

19/2/2012	6	-4,8	-5,7	-6,3	1
19/2/2012	12	-5,2	-4,2	-5,3	1
6/12/2013	6	-6,8	-4,4	-5	1
9/2/2014	6	-4,9	-5,7	-5,9	1
5/7/2015	6	-18,4	-14,3	-14	3
21/8/2015	12	-18,7	-19	-18,5	1

Tabla A2. Valores de presión atmosférica que escapan al rango de control variable para la estación BCAA. Ídem Tabla A1.

Fecha	Hora (UTC)	BCAA	FREI	KOREA	EP
30/10/2001	0	933,4	984,6	983,6	2
8/5/2004	0	951,7	951,6	949,5	1
8/5/2004	6	947,9	949	947,5	1
5/6/2005	6	938,3	982	981,6	2
6/1/2006	18	944,5	994,7	993,6	2
7/5/2009	0	948,9	983	985,6	2
9/11/2011	6	933,9	993,6	993,5	2
17/1/2014	0	953,69	995,7	994,9	2
15/8/2015	18	938,29	939,1	940,5	1
17/8/2015	6	932,34	935,8	937,5	1
17/8/2015	0	932,67	931,7	934	1

Tabla A3. Fechas en las que la diferencia de valores entre registros consecutivos de la temperatura (ΔT) escapa al umbral determinado. Resaltan en negrita los registros que fueron enviados a INUMET para su chequeo.

Fecha	ΔT	Fecha	ΔT	Fecha	ΔT
18/5/1998 18	10	24/5/2007 0	10	9/6/2012 0	6,2
8/6/1998 0	6,7	20/6/2007 18	7	9/6/2012 6	6,4
9/7/1998 6	7,7	21/6/2007 12	8,6	11/6/2012 6	8,6
23/7/1998 0	6,1	26/6/2007 12	7	14/6/2012 18	7,6
2/8/1998 18	7,8	30/6/2007 0	6,2	15/7/2012 18	6,4
15/8/1998 18	8,3	30/6/2007 6	6	25/7/2012 12	6,6
17/8/1998 6	11,1	1/7/2007 12	7	10/8/2012 12	7,2
23/8/1998 0	6,1	3/7/2007 0	6,6	11/8/2012 0	7,4
1/9/1998 18	8,9	8/7/2007 6	6,6	11/8/2012 6	7,4
3/9/1998 6	6,7	8/7/2007 12	6,4	26/8/2012 0	9
3/9/1998 12	6,1	9/7/2007 6	9	19/9/2012 18	8
5/9/1998 6	7,2	10/7/2007 12	7	22/10/2012 12	7,2
18/10/1998 6	6,1	17/7/2007 18	6,2	23/5/2013 0	6,9
23/7/1999 12	8,3	19/7/2007 6	6,4	11/6/2013 18	6

31/7/1999	0	7,7	23/7/2007	0	8	18/6/2013	6	6,5
12/9/1999	0	6,1	23/7/2007	18	10,6	23/6/2013	6	7,5
15/9/1999	12	6,1	28/7/2007	0	6,8	2/7/2013	6	6,5
30/9/1999	12	9,5	28/7/2007	6	6,2	7/7/2013	12	7,6
30/9/1999	18	10	9/8/2007	18	6,4	17/7/2013	18	6,8
29/11/1999	12	7,8	10/8/2007	18	8,9	19/7/2013	12	11,2
29/11/1999	18	6,7	15/8/2007	6	6,6	20/7/2013	18	6,2
31/7/2000	12	9,2	15/8/2007	18	7,4	29/7/2013	6	7,5
16/8/2000	18	8,3	24/8/2007	0	6,8	1/8/2013	18	6,8
11/9/2000	6	7	25/8/2007	0	6,4	6/8/2013	12	6,7
27/9/2000	18	8,6	30/8/2007	0	7,3	6/8/2013	18	6
18/2/2001	12	6,1	1/9/2007	12	7	22/8/2013	18	7,5
20/3/2001	18	6,3	2/9/2007	6	11,4	31/8/2013	6	9,1
7/4/2001	0	6	1/10/2007	12	6,5	5/9/2013	12	7
10/4/2001	0	7	16/8/2009	18	6	9/9/2013	6	6,2
13/4/2001	6	7,2	2/9/2009	12	6,2	12/9/2013	0	6,1
16/6/2001	6	6,8	1/4/2010	0	13,4	12/9/2013	18	7,9
19/6/2001	18	8,4	1/4/2010	6	13,6	28/9/2013	0	6,6
21/6/2001	18	6,7	24/4/2010	6	6	20/3/2014	6	7,2
1/7/2001	0	6,8	30/4/2010	12	9,6	12/5/2014	18	6,2
7/7/2001	18	7,9	13/5/2010	18	11	15/6/2014	12	6,7
20/7/2001	6	6,2	28/5/2010	0	6,1	5/8/2014	12	6,1
21/7/2001	0	7	5/7/2010	0	6,2	27/9/2014	12	7
9/8/2001	12	7	13/7/2010	12	6,1	21/5/2015	12	6,8
6/11/2001	6	8,7	9/8/2010	18	7,3	5/6/2015	18	6,3
8/5/2002	12	8,4	16/8/2010	12	6,1	11/6/2015	0	9,2
14/5/2002	0	7,4	5/9/2010	6	6,2	1/7/2015	12	6,7
26/5/2002	18	6	13/4/2011	0	7,2	2/7/2015	12	7,2
8/6/2002	12	7,4	1/6/2011	0	6,4	18/7/2015	0	7,8
10/6/2002	12	9,4	21/6/2011	6	11,2	18/7/2015	18	6
30/6/2002	6	7,4	21/6/2011	18	6,6	21/7/2015	0	9,1
2/7/2002	12	9,7	23/6/2011	0	6,3	22/7/2015	12	6,1
14/7/2002	12	13,6	23/6/2011	6	6	22/7/2015	18	8,5
20/7/2002	18	7,8	24/6/2011	18	7,5	3/8/2015	12	8,6
2/5/2003	12	6,7	16/7/2011	6	7,2	3/8/2015	18	6,3
20/5/2003	0	6,8	17/7/2011	12	8,4	16/8/2015	0	6,4
27/5/2003	0	7,2	29/7/2011	0	6,8	19/8/2015	18	7,2
2/7/2003	6	6,1	29/7/2011	6	8,2	20/8/2015	12	6,9
23/8/2003	6	7,4	1/8/2011	6	7,4	2/9/2015	0	6,4
7/9/2003	0	6	19/8/2011	18	9,8	11/9/2015	0	6,1
7/9/2003	6	10,8	1/9/2011	6	6,1	16/9/2015	0	6,4
24/11/2003	6	6,2	7/9/2011	0	6,2	23/9/2015	12	7,8
25/1/2004	6	6,8	14/9/2011	12	6,3	25/9/2015	18	7

14/5/2004	18	6,3	18/9/2011	6	7	27/9/2015	18	7,6
16/6/2004	6	6,3	25/9/2011	12	6,4	27/7/2016	0	6
2/9/2004	12	8,8	26/9/2011	6	7,6	9/8/2016	0	7
13/9/2004	6	8,1	14/10/2011	18	7	14/8/2016	0	6,9
3/3/2005	18	12,6	24/12/2011	12	10,4	15/8/2016	0	6,2
13/6/2005	18	6	24/12/2011	18	8,2	19/8/2016	0	8,5
29/6/2005	18	9,7	1/1/2012	12	14,8	28/8/2016	0	6
2/7/2005	12	7,9	1/1/2012	18	13,2	30/8/2016	0	10,7
5/9/2005	0	6,4	4/6/2012	12	10,4	31/8/2016	0	9
17/5/2006	6	8,2	5/6/2012	18	7,2	11/9/2016	0	6,9
15/6/2006	6	9,4	7/6/2012	0	6			
17/8/2006	0	8	8/6/2012	0	6,2			

Tabla A4. Valores de temperatura producto del control de consistencia temporal de la serie de BCAA, que fueron clasificados como errores potenciales de tipo 2 (EP2) y enviados a INUMET para su chequeo. En negrita se resaltan los valores que surgieron previamente en el control de rango variable.

Fecha	BCAA	FREI	KOREA
18/5/1998 18:00	5,6	-3,1	-2,8
17/8/1998 0:00	0	-3,6	-4,7
30/9/1999 12:00	-16,7	-7,4	-7,2
29/11/1999 12:00	7,8	0,3	0,6
21/6/2001 18:00	4,4	-3,9	-4,7
6/11/2001 6:00	-10	-0,9	-0,7
14/7/2002 6:00	-2,8	-5,8	-8,4
7/9/2003 6:00	-0,2	-9,5	-9,5
24/11/2003 6:00	-6,4	-0,9	-0,3
13/9/2004 6:00	-8,2	-1,2	-1,1
3/3/2005 18:00	11,8	1	1,9
17/5/2006 6:00	4,1	-5	-5,6
15/6/2006 6:00	4	-3,1	-3,8
1/4/2010 0:00	-11,9	1,3	1,2
30/4/2010 6:00	-3,3	-12,3	-12,6
13/5/2010 18:00	4	-2,9	-3,1
1/6/2011 0:00	-7,7	-1	-0,4
14/10/2011 18:00	0,9	-6,4	-5,9
24/12/2011 12:00	10	0	0,7
10/8/2012 12:00	-1,4	-11,1	-9
11/8/2012 6:00	-0,4	-0,9	-0,3
25/8/2012 18:00	-10,4	-2,5	-2,1
27/7/2016 0:00	-0,7	-4,2	-3,3
9/8/2016 0:00	-10,7	-3,7	-3,1

19/8/2016 0:00	-17,2	-9,9	-8,1
28/8/2016 0:00	0,4	-3,6	-1,8
30/8/2016 0:00	-10,3	0,1	2

Tabla A5. Fechas en las que la diferencia de valores entre registros consecutivos de la presión (ΔP) escapa al umbral determinado. Resaltan en negrita los registros que fueron enviados a INUMET para su chequeo.

Fecha	ΔP	Fecha	ΔP	Fecha	ΔP
12/7/1998 0	15,2	14/8/2005 6	19,4	4/9/2015 12	16,77
12/7/1998 18	17,3	30/8/2005 6	15	16/10/2015 12	14,5
16/11/1998 12	14,5	11/4/2006 12	22,3	11/11/2015 12	17,61
15/7/1999 0	17,7	8/5/2006 0	15	27/3/2016 18	20,62
21/10/1999 6	18,3	5/7/2006 0	14,4	8/4/2016 18	16,98
5/3/2000 6	18	10/9/2006 0	15,9	9/4/2016 0	20,88
5/3/2000 12	21,7	13/9/2006 0	14,4	28/6/2016 0	18,1
20/5/2000 0	16,4	23/10/2006 12	30,5	29/6/2016 0	28,5
7/6/2000 12	27,6	23/10/2006 18	27,8	3/7/2016 0	30,4
7/6/2000 18	15,6	4/11/2006 18	15,5	6/7/2016 0	16,2
16/9/2000 6	16,6	23/11/2006 12	51,5	7/7/2016 0	24,4
28/9/2000 12	27,2	23/11/2006 18	54,1	18/7/2016 0	18
28/9/2000 18	26,9	2/2/2007 6	26,8	1/8/2016 0	17,5
11/10/2000 6	14,6	25/8/2007 6	30,5	2/8/2016 0	16,7
15/10/2000 0	14,1	25/8/2007 12	23,5	7/8/2016 0	21,7
1/7/2001 6	14,5	2/10/2007 6	15,8	10/8/2016 0	37
17/8/2001 12	16	15/12/2007 12	53,5	14/8/2016 0	14,8
17/8/2001 18	15,7	15/12/2007 18	51,7	20/8/2016 0	16,4
29/8/2001 18	15,4	24/3/2008 18	15,8	29/8/2016 0	28,1
2/11/2001 0	14,1	20/4/2008 12	15,1	30/8/2016 0	20,7
2/11/2001 6	15,2	24/3/2009 6	16	1/9/2016 0	26,5
29/11/2001 0	20,2	14/5/2009 18	35,3	2/9/2016 0	20,9
5/1/2002 0	14,8	15/5/2009 0	21,1	4/9/2016 0	34,2
14/7/2002 12	15,7	26/7/2009 18	22,5	7/9/2016 0	20,8
7/1/2003 0	18,8	30/8/2009 0	19,1	10/9/2016 0	20,6
7/1/2003 12	20,4	21/10/2009 12	16,7	14/9/2016 0	19,7
7/3/2003 0	17,1	27/11/2009 0	27,6	20/9/2016 0	16,6
10/4/2003 18	14,1	15/5/2010 18	15,4	22/9/2016 0	17,3
29/4/2003 12	15,2	16/7/2010 18	16,1	26/9/2016 0	14,9
19/5/2003 18	20,2	10/8/2010 12	30	5/10/2016 0	15,3
20/5/2003 0	24,2	10/8/2010 18	36,3	11/10/2016 0	16,9
16/8/2003 18	16,6	25/2/2011 12	18,2	13/10/2016 0	14,2
14/9/2003 0	16,7	6/6/2012 6	16,64	14/10/2016 0	14,9
18/11/2003 0	19,4	22/8/2012 6	14,76	17/10/2016 0	15,6
18/11/2003 6	23,5	16/10/2012 12	16,88	19/10/2016 0	25,5

29/11/2003	6	20,2	19/10/2012	0	15,31	22/10/2016	0	32,7
29/11/2003	12	18,5	22/11/2012	0	28,74	26/10/2016	0	15,8
16/12/2003	18	15,4	12/1/2013	12	15,26	6/11/2016	0	17,5
20/1/2004	12	28,1	23/6/2013	18	15,4	23/11/2016	0	15,2
20/1/2004	18	23,3	4/11/2013	6	15,02	30/11/2016	0	17,8
24/4/2004	6	17	15/8/2015	12	14,13	1/12/2016	0	23
30/9/2004	0	27,3	17/8/2015	0	16,06			
21/11/2004	0	15,3	1/9/2015	18	21,16			

Tabla A6. Valores de presión producto del control de consistencia temporal de la serie de BCAA, que fueron enviados a INUMET para su chequeo. En la columna EP, la sigla S.D. (sin determinar) hace referencia a los valores que no pudieron ser chequeados por INUMET.

Fecha	BCAA	FREI	KOREA	EP
5/3/2000 6	1022,5	1002,9	1002,6	2
19/5/2000 18	998,5	988,3	987,6	3
7/6/2000 12	955,8	973,8	972,6	2
16/9/2000 0	998,6	986,3	985,6	2
28/9/2000 12	1026	1003,4	1002,7	2
11/10/2000 0	980,2	969,6	969,6	2
14/10/2000 18	999	989,2	988,6	2
1/7/2001 0	997	984,6	985,6	3
29/11/2001 0	999	989,9	990,6	2
5/1/2002 0	980,2	990,1	989,6	2
14/7/2002 6	952,3	966,9	954,6	3
7/1/2003 0	977,7	998,6	998,6	2
7/1/2003 6	977,9	998,6	998,6	2
19/5/2003 18	968,4	987,1	986,6	2
14/9/2003 0	1002,8	1022,1	1021,7	2
18/11/2003 0	997,2	977,6	976,6	2
29/11/2003 6	974	994,7	994,6	2
16/12/2003 18	980,7	991,2	990,6	2
20/1/2004 12	992,6	962,5	962,5	2
24/4/2004 0	1009,4	999,2	997,6	2
29/9/2004 18	1027,7	1003,5	1002,7	2
14/8/2005 6	999,5	989,7	988,6	2
30/8/2005 0	978,1	987,8	987,7	2
11/4/2006 6	977,2	997,7	997,6	2
5/7/2006 0	998,4	985,4	986,6	2
23/10/2006 12	997,3	970	971,6	2
23/11/2006 12	939,9	993,3	992,6	2
2/2/2007 6	997,7	976,8	978,6	2

25/8/2007	6	996,7	962,3	966,6	2
15/12/2007	12	939,9	993,7	993,6	2
24/3/2009	6	992,4	974,3	973,6	2
14/5/2009	18	960,2	989,1	988,6	2
26/7/2009	18	1010,3	976,2	975,7	2
29/8/2009	18	997,3	976,2	976,6	2
21/10/2009	6	996,5	964,4	967,6	2
26/11/2009	18	995,6	975,6	975,6	2
10/8/2010	12	949,9	985,3	984,7	2
21/11/2012	18	997,49	977	977,5	2
12/1/2013	6	969,42	977	977,6	2
27/3/2016	18	973,49	992,2	992	S.D.
8/4/2016	18	977,85	998,7	998,1	S.D.
29/6/2016	0	972,5	995,7	995,3	S.D.
3/7/2016	0	958,3	975,2	975,8	S.D.
6/7/2016	0	986,1	972,1	971,3	S.D.
18/7/2016	0	1001,9	1015	1014	S.D.
20/7/2016	0	979,6	990,5	989,4	S.D.
1/8/2016	0	985,1	992,3	993,1	S.D.
2/8/2016	0	999,7	984	984,8	S.D.
7/8/2016	0	966,6	984,8	984,6	S.D.
14/8/2016	0	985,5	998,5	997,5	S.D.
20/8/2016	0	1014,5	1002,8	1003,1	S.D.
29/8/2016	0	973	997,4	996,8	S.D.
31/8/2016	0	977,3	963,1	963	S.D.
1/9/2016	0	996,6	978,1	977,6	S.D.
2/9/2016	0	1014,4	996,6	996,4	S.D.
4/9/2016	0	985,8	1013,3	1013,2	S.D.
7/9/2016	0	971,6	989,8	990	S.D.
10/9/2016	0	996,9	965,8	964,7	S.D.
14/9/2016	0	986,4	999,8	998,8	S.D.
20/9/2016	0	986	997,2	996,8	S.D.
22/9/2016	0	1004,3	985,1	984,5	S.D.
26/9/2016	0	991,5	1006,2	1005,5	S.D.
5/10/2016	0	1012,3	998,2	997,8	S.D.
11/10/2016	0	981,9	997,8	997	S.D.
12/10/2016	0	971,4	982,7	981,7	S.D.
13/10/2016	0	988	971,8	970,8	S.D.
14/10/2016	0	982,7	971,2	971	S.D.
15/10/2016	0	992,3	983	982,6	S.D.
18/10/2016	0	998,9	1007,3	1006,5	S.D.
19/10/2016	0	975,2	1001	1000,1	S.D.
22/10/2016	0	993,6	965,8	965,1	S.D.

26/10/2016	0	1002,2	986,2	987,2	S.D.
6/11/2016	0	973,4	964,4	965,8	S.D.
23/11/2016	0	989,3	1003,3	1003,2	S.D.
30/11/2016	0	968,9	979	979,3	S.D.
1/12/2016	0	988,6	968,9	970,8	S.D.

Anexo II. Eventos Cálidos (EC)

La siguiente tabla muestra todos los eventos cálidos (EC) que fueron registrados en BCAA. Se detalla la fecha de inicio del evento, la duración en días, la temperatura media y máxima del evento, su anomalía y las estaciones en las que fue también registrado (además de BCAA).

Nº evento	Fecha de inicio	Duración (días)	Temp. media (°C)	Temp. Máx. (°C)	Anomalía (°C)	Estaciones
1	13/01/1998	7	4,1	5,2	2,3	F
2	13/03/1998	3	3,2	3,6	2,6	F
3	16/04/1998	4	2,2	2,6	4,1	F, K
4	17/06/1998	5	0,9	1,8	6,4	F, K
5	29/06/1998	4	0,3	1,5	6,0	F, K
6	22/09/1998	3	0,4	1,3	3,5	F, K
7	23/02/1999	3	3,5	4	1,8	F, K
8	18/03/1999	4	3,2	3,9	2,7	F, K
9	10/04/1999	4	2,3	2,9	3,2	K
10	27/04/1999	5	1,9	2,3	4,0	F
11	20/05/1999	3	1,1	1,7	3,9	K
12	09/06/1999	5	0,7	1,1	6,0	F, K
13	08/07/1999	3	0,0	0,7	5,4	-
14	20/09/1999	3	0,3	0,6	4,5	K
15	12/11/1999	3	0,9	1,4	1,4	K
16	17/11/1999	3	1,3	1,3	2,0	F
17	24/12/1999	5	2,7	3,5	1,8	F, K
18	16/02/2000	3	3,0	3	1,1	-
19	09/03/2000	3	4,0	4,8	3,1	F, K
20	19/04/2000	3	1,7	1,8	3,8	K
21	14/05/2000	7	1,4	1,6	3,4	F
22	03/06/2000	5	0,6	1,8	4,8	F, K
23	17/06/2000	3	0,0	0,2	5,9	F, K
24	11/08/2000	3	-0,9	-0,8	4,9	F
25	03/11/2000	3	0,9	1,2	2,4	-
26	22/01/2001	4	3,3	3,5	1,2	F, K
27	26/02/2001	4	3,4	4,2	2,0	K
28	18/05/2001	4	1,4	1,9	3,7	F
29	27/11/2001	3	1,0	1,1	1,1	F
30	13/12/2001	4	2,3	2,8	1,7	F, K
31	24/04/2002	4	1,7	2	4,0	F, K
32	13/12/2002	3	2,1	2,3	1,5	F
33	12/01/2003	3	3,3	3,7	1,6	K
34	14/07/2003	6	-0,3	0,7	5,1	F, K
35	29/07/2003	4	-0,5	-0,4	4,6	F
36	06/08/2003	6	-0,2	0,9	3,8	F, K

37	15/08/2003	3	0,0	0,7	6,1	F, K
38	27/08/2003	7	-0,2	0,6	4,8	F, K
39	17/09/2003	11	0,4	1,2	3,9	F, K
40	31/03/2004	4	3,0	3,7	2,7	F, K
41	01/06/2004	5	0,9	1,4	4,7	F, K
42	17/07/2004	7	-0,1	0,9	5,3	F, K
43	17/11/2004	4	1,2	1,6	1,8	F
44	09/12/2004	3	1,9	2	1,8	-
45	09/02/2005	4	3,3	3,4	1,4	F
46	08/08/2005	3	-0,6	-0,6	3,4	F
47	03/01/2006	3	3,0	3,5	1,3	F, K
48	13/01/2006	7	3,4	4,3	1,7	-
49	22/01/2006	4	4,2	5,4	2,1	F, K
50	07/02/2006	6	3,5	4	1,6	F, K
51	21/03/2006	3	3,2	3,3	3,4	F, K
52	26/03/2006	6	2,9	3,3	2,7	F, K
53	01/05/2006	4	1,6	2	3,4	-
54	01/06/2006	4	0,6	0,9	4,2	F, K
55	29/06/2006	4	-0,2	0,2	5,6	F, K
56	19/10/2006	3	0,9	1,4	3,5	F, K
57	03/12/2006	4	1,7	1,9	2,0	F, K
58	11/02/2007	3	3,2	3,4	1,4	-
59	19/08/2007	3	-0,1	0	5,8	F, K
60	23/02/2008	4	3,0	3,2	1,4	F
61	03/05/2008	9	1,1	2,5	3,4	K
62	22/06/2008	5	0,1	0,7	4,1	F, K
63	24/07/2008	6	0,0	0,5	6,1	F, K
64	15/09/2008	3	0,7	0,9	4,5	F, K
65	24/09/2008	4	0,4	0,7	3,6	F, K
66	29/09/2008	3	0,5	0,8	2,8	F, K
67	27/10/2008	5	0,5	0,8	2,1	F, K
68	18/11/2008	3	1,3	1,4	2,0	F
69	23/11/2008	11	1,5	2,9	1,7	F, K
70	17/12/2008	5	2,4	3	1,8	F, K
71	21/03/2009	5	2,6	2,9	2,5	F, K
72	01/06/2010	3	0,9	1,8	4,4	F, K
73	22/06/2010	3	-0,3	0,1	4,0	-
74	17/07/2010	3	0,0	0,4	4,9	F, K
75	07/10/2010	3	0,5	0,8	2,5	F, K
76	16/10/2010	5	0,5	1,2	3,3	F, K
77	22/10/2010	3	0,2	0,3	2,5	F
78	02/11/2010	5	0,8	1	2,1	F, K
79	15/11/2010	7	1,6	2,3	2,3	F

80	14/05/2011	3	1,1	1,2	2,8	-
81	26/05/2011	5	1,4	2	4,5	F, K
82	18/10/2011	3	0,5	0,9	3,3	-
83	04/11/2011	3	1,6	2,7	2,9	F, K
84	19/12/2011	3	2,9	3,4	2,1	F, K
85	02/03/2012	6	4,1	5,6	2,8	F, K
86	14/05/2012	3	1,1	1,1	2,8	K
87	21/07/2012	3	-0,7	-0,4	5,1	K
88	17/08/2012	3	-0,2	0,2	6,3	F, K
89	26/08/2012	9	-0,4	0,8	4,5	F, K
90	20/03/2013	3	2,9	3	2,6	F
91	18/04/2013	4	1,9	3	4,0	F, K
92	17/09/2013	3	-0,1	0	3,6	K
93	01/07/2014	3	0,1	0,3	6,1	F, K
94	12/07/2014	3	-0,7	-0,5	4,4	-
95	25/03/2016	4	2,4	2,6	1,8	-
96	25/06/2016	3	0,4	1,1	4,3	F, K
97	17/07/2016	4	-0,2	0,1	4,9	F, K
98	04/09/2016	4	0,5	1,4	5,8	F, K
99	17/09/2016	3	-0,2	-0,1	3,5	-
100	23/09/2016	3	0,5	0,7	3,3	F
101	29/10/2016	3	1,1	1,3	2,7	K

Anexo III. Eventos Cálidos Extremos (ECE)

La siguiente tabla muestra todos los eventos cálidos extremos (ECE) que fueron registrados en BCAA. Se detalla la fecha de inicio del evento, la duración en días, la temperatura media y máxima del evento, su anomalía y las estaciones en las que fue también registrado (además de BCAA).

Nº evento	Fecha de inicio	Duración (días)	Temp. Media (°C)	Temp. Máx. (°C)	Anomalía (°C)	Estaciones
1	17/04/1998	3	2,4	2,6	4,4	F
2	18/06/1998	4	1,1	1,8	6,5	F, K
3	08/07/1999	3	0,0	0,7	5,4	-
4	15/05/2000	4	1,5	1,6	3,4	F
5	18/05/2001	3	1,6	1,9	3,8	-
6	07/08/2003	3	0,3	0,9	4,1	F, K
7	21/03/2006	3	3,2	3,3	3,4	F
8	19/10/2006	3	0,9	1,4	3,5	K
9	19/08/2007	3	-0,1	0	5,8	K
10	25/07/2008	4	0,2	0,5	6,3	K

11	15/09/2008	3	0,7	0,9	4,5	K
12	29/10/2008	3	0,7	0,8	2,2	-
13	18/12/2008	3	2,8	3	2,0	-
14	26/05/2011	3	1,4	1,9	4,8	-
15	02/03/2012	3	5,0	5,6	3,6	F
16	27/08/2012	3	0,3	0,8	5,2	K
17	18/07/2016	3	0,0	0,1	4,8	K
18	04/09/2016	4	0,5	1,4	5,8	F
19	29/10/2016	3	1,1	1,3	2,7	-

Anexo IV. Distribución anual de todos los Eventos Cálidos y Cálidos Extremos

Las siguientes figuras muestran la distribución anual de todos los eventos ocurridos en BCAA. En rosado se visualizan los Eventos Cálidos (EC) y en rojo los Eventos Cálidos Extremos (ECE). Los eventos delimitados por un contorno negro corresponden a todos aquellos que fueron compartidos por las 3 estaciones (BCAA, FREI, KOREA). Cada figura corresponde a un año, donde las columnas representan los días del mes y las filas los meses del año. En negrita se detalla la anomalía de cada evento. Se omite el año 2015 por no presentar ningún evento.

