



**Caracterización de los bloqueos
atmosféricos en los Océanos Pacífico
Sudeste y Atlántico Sur y su impacto
sobre Uruguay**

Autora: Gianina Giacosa

Tutora: Madeleine Renom

Trabajo Final - Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

Universidad de la República

Facultad de Ciencias - Facultad de Ingeniería

Mayo, 2018

Resumen

Los episodios de bloqueo tienen una fuerte influencia sobre el tiempo en la región, no solamente por la persistencia del sistema de alta presión sino porque a su vez pueden generarse condiciones favorables para la ciclogénesis. Esto trae como consecuencias temperaturas extremas y disminución en la probabilidad de precipitaciones en la región afectada por el anticiclón y precipitaciones abundantes con posibilidad de inundaciones en la zona de influencia del ciclón.

En este trabajo se identifican los patrones de bloqueo en el hemisferio sur entre los años 1980 y 2016 en los Océanos Pacífico Sureste y Atlántico Sur. A partir de una metodología clásica para detectar bloqueos se imponen condiciones de persistencia en el tiempo al gradiente de altura de geopotencial en una banda de al menos 15° de longitud para determinar la ocurrencia de un bloqueo. Se determina la climatología, variabilidad interanual e intra-anual, distribución de ocurrencia espacial y duración típica de bloqueos y se vincula con los eventos Niño/Niña. Se caracterizan bloqueos por región de preferencia de ocurrencia y se les asocia consecuencias en la temperatura y la precipitación en Uruguay. Por último se elige un evento particular para analizar como impactan estos fenómenos en Uruguay sobre las temperaturas máximas y mínimas diarias en superficie y en la precipitación.

Se observa que este tipo de eventos ocurren con más frecuencia en los meses fríos y están caracterizados por una gran variabilidad interanual. Dependiendo de la época del año y de la región de ocurrencia del bloqueo, se encuentra que pueden generar anomalías en las temperaturas de nuestro país de un par de grados durante el evento o modificar la precipitación esperada.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Definición de bloqueo	1
1.2. Metodologías existentes para identificar bloqueos atmosféricos	4
1.3. Estudios en el hemisferio sur	5
1.4. Objetivos del trabajo	9
2. Datos y metodología	10
2.1. Datos utilizados	10
2.1.1. Datos utilizados en la identificación de bloqueos	10
2.1.2. Datos de temperatura y precipitación	11
2.2. Identificación de bloqueos	14
2.2.1. Verificación del índice implementado	16
3. Resultados	18
3.1. Caracterización y variabilidad de bloqueos en los Océanos Pacífico Sureste y Atlántico Sur	18
3.1.1. Distribución longitudinal de bloqueos	22
3.1.2. Variabilidad interanual y vinculación con ENSO	23
3.2. Caracterización climática	29
3.2.1. Campos medios de altura de geopotencial, temperatura y precipitación	29
3.2.2. Autocorrelación en temperatura máxima, mínima y precipitación	32
3.2.3. Porcentaje de días con bloqueos representados con temperatura y precipitación	34
3.3. Bloqueos en la región PSE	35
3.4. Bloqueos en la región PAS	40
3.5. Bloqueos en la región ATS	44
4. Estudio de caso particular	50
4.1. Estructura de bloqueo	50
4.2. Anomalía de temperatura asociada al evento	53
4.3. Anomalía de precipitación asociada al evento	56
5. Conclusiones y trabajo a futuro	59
Bibliografía	61

1. Introducción

1.1. Definición de bloqueo

Los extratropicos se caracterizan por un flujo del oeste, el cual es no estacionario. Uno de los patrones que modifican esta circulación zonal predominante en la región son los bloqueos atmosféricos. Como el nombre indica, esta configuración está asociada a un bloqueo sobre el jet proveniente del oeste y la consecuente formación de un flujo anómalo del este. Así, un bloqueo atmosférico es el fenómeno caracterizado por la falta de movimiento zonal del flujo, patrón que ocurre cuando los sistemas de tiempo no progresan a través del anillo de latitudes por los vientos del oeste. Desde el punto de vista sinóptico, un bloqueo corresponde a una anomalía persistente de alta presión, caracterizada por un desvío medio meridional de las perturbaciones en relación a su trayectoria media zonal en latitudes medias y en los subtrópicos.

Debido a las condiciones locales de persistencia, los bloqueos permiten tener una mejor calidad de la previsión a corto y mediano plazo lo cual representa grandes beneficios para el sector agrícola, industrial, energético, de transporte y otros, cuyo planeamiento y gerencia dependen del tiempo. Durante la ocurrencia de un evento de bloqueo, en la región cercana al anticiclón no se favorece la ocurrencia de perturbaciones atmosféricas transientes. Su impacto sinóptico más relevante es el de actuar como una barrera para los sistemas meteorológicos provenientes de latitudes más altas. La previsibilidad del tiempo en la región afectada por este sistema aumenta durante los períodos de bloqueo, debido a su carácter persistente. Es por esto que el poder entender el proceso de formación, duración y disipación de este tipo de eventos abre la posibilidad de mejorar y extender el plazo de previsión del tiempo en la región (Cavalcanti et al., 2009).

Es sabido que la bifurcación o deformación de la corriente en chorro (jet) favorece la formación de bloqueos. Cuando esto ocurre, se produce transporte de momento y de calor para mantener la estructura de división del jet. Esta deformación de los flujos va a mantener y fortalecer las condiciones de anticiclón que va a persistir en una región donde predomine el viento oeste, esto es, en latitudes significativamente más altas que la equivalente a la posición climatológica de los anticiclones (Marques, 1996). La forma que adopte el bloqueo está sujeta al proceso de formación. Las consecuencias del mismo dependen del patrón espacial que adopte. La Figura 1 muestra una clasificación esquemática de los diferentes patrones de bloqueo atmosférico en el Hemisferio Sur (HS) Básicamente existen 3 tipos de patrones (Marques, 1996).

- a) patrón dipolo: una anomalía de baja presión se posiciona en el lado ecuatorial del anticiclón, caracterizando un dipolo, Figura 1.a
- b) patrón omega: el flujo del oeste en niveles altos puede sufrir un desvío que modifica la forma de la anomalía de alta presión. Posee una configuración orientada zonalmente, constituido por un anticiclón entre dos ciclones, con la forma de omega invertida en el Hemisferio Sur (HS), Figura 1.b
- c) bloqueo formado por una cresta estacionaria de gran amplitud: asociado principalmente a tiempo cálido y seco, Figura 1.c.

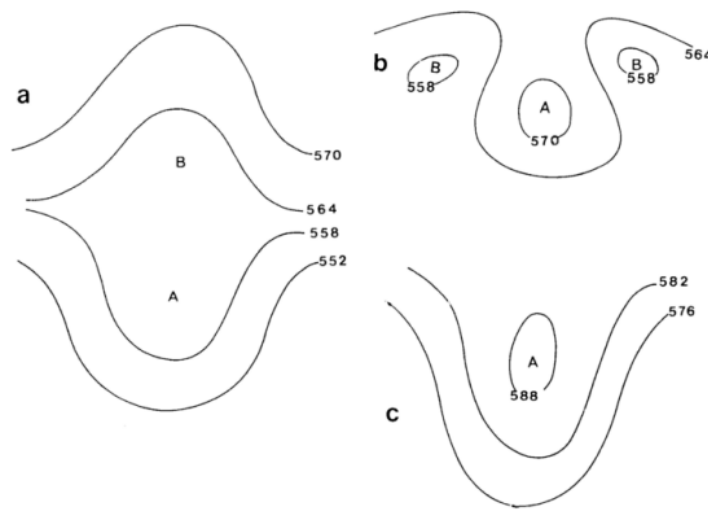


Figura 1: Patrones de bloqueos para el hemisferio sur: a) patrón dipolo; b) patrón omega; c) cresta de gran amplitud. Fuente: Marques (1996)

Los patrones de bloqueo pueden afectar la vida humana ya que aquellos que viven cerca de la región de formación de la baja presión en el caso de un patrón dipolo tienden a experimentar la combinación persistente de precipitaciones y temperaturas relativamente frías debido a la advección de aire polar en el flanco este, y aquellos que viven cerca del anticiclón pueden experimentar condiciones de déficit hídrico y/o sufrir varios días de altas temperaturas. Así, situaciones de bloqueo están frecuentemente acompañadas por eventos meteorológicos extremos (Bluestein, 1993). Un ejemplo de esto son las olas de calor, las cuales son fenómenos extremos de alto impacto socioeconómico ya que están asociadas, entre otros, a descenso de la producción agrícola o el aumento de la demanda energética. A su vez la combinación de varios días consecutivos de altas temperaturas con déficit de precipitación y por lo tanto, escasez de humedad en el suelo generan condiciones altamente favorables

para la ocurrencia de incendios forestales. En el caso de persistencia de temperaturas muy por debajo de lo esperado, principalmente en invierno, puede ocurrir un incremento de la mortalidad (fundamentalmente en la población más vulnerable). Si bien los eventos más extremos han ocurrido en el Hemisferio Norte (HN) estando la población expuesta por más de una semana a temperaturas extremas, y con condiciones anómalas de precipitación, también en nuestro hemisferio se debe prestar atención a este tipo de fenómenos que afectan desde la economía del país hasta el bienestar de la población.

Los episodios de bloqueo tienen una fuerte influencia sobre el tiempo en la región, no solamente por la persistencia de la alta presión en una misma región, sino también por la presencia de condiciones favorables para la ciclogénesis al norte (sur) de la misma en el hemisferio sur (norte) en el caso de un patrón dipolo. Un ejemplo que se destaca por ser reciente y con importantes consecuencias es el bloqueo ocurrido en Rusia en el verano de 2010, el cual provocó una ola de calor sin precedentes de la que se estima que causó alrededor de 10.000 muertes de forma directa e indirecta. Al mismo tiempo, al sur de la región donde ocurrieron estas elevadas temperaturas, un inusual y fuerte flujo monzónico transportó una gran cantidad de humedad hacia Pakistán produciendo inundaciones catastróficas (Henson, 2011).

Si bien la existencia de anomalías positivas persistentes o recurrentes en la circulación atmosférica es un aspecto conocido desde hace un tiempo, Charney and DeVore (1979) aseguran que es un desafío para los meteorólogos encontrar explicación a este fenómeno. Los autores sugieren que los bloqueos atmosféricos podrían estar asociados con un estado de equilibrio oscilatorio para un forzante externo, el cual podría ser la topografía o asimetrías térmicas. El estado de equilibrio para estos patrones es denominado flujo de “bajo índice” con una fuerte componente ondulatoria y con débil componente zonal anclado a una resonancia lineal. El establecimiento de un bloqueo tiende a ser bastante abrupto, pero una vez establecida esta configuración puede durar varios días y en algunos casos semanas antes de decaer para dar lugar nuevamente a los flujos del oeste. Estos episodios tienden a ocurrir en latitudes más bajas en el HS que en el HN. Adicionalmente, están caracterizados por una estructura menos pronunciada y una duración más corta en el HS. Esto es así por la existencia de un flujo zonal del oeste más uniforme e intenso en latitudes altas y medias, lo cual se atribuye a la presencia de oestes generalmente más fuertes en la troposfera alta en latitudes medias y altas del HS que en el HN (Trenberth and Mo, 1985). Otra razón es la existencia de mayor masa continental en el HN princi-

palmente en altas latitudes, además de cadenas montañosas importantes que generan ondas estacionarias en el flujo de los oestes.

1.2. Metodologías existentes para identificar bloqueos atmosféricos

Existen diferentes modos de caracterizar un bloqueo atmosférico. Las características del mismo y sus efectos asociados varían de un hemisferio a otro. Donde sí existe un consenso es respecto a su definición y cabe hacer una distinción entre flujo bloqueado y bloqueo. El primero, está asociado a un patrón de circulación que sigue determinadas condiciones que caracterizan la obstrucción, por un anticiclón, del flujo de oeste en latitudes medias. Mientras que el segundo, caracteriza un patrón de bloqueo que además de satisfacer las condiciones de flujo bloqueado, presenta un carácter persistente en el tiempo.

Los primeros intentos por caracterizar un evento de bloqueo ocurrieron a mitad del siglo pasado, cuando Rex (1949) identificó 5 casos de bloqueos en el HN a partir de campos de altura de geopotencial. Este estudio se implementó manualmente a partir de datos en superficie y datos en 500 hPa, definiendo de manera subjetiva la ocurrencia del episodio ya que no había en el momento una forma automatizada de implementar la identificación. Las características buscadas para esto eran: flujo del oeste separado en dos ramas y que cada rama transportara una masa apreciable; que la doble configuración del jet se extendiera en al menos 45° de longitud; que la transición entre el flujo zonal y una corriente más meridional ocurriera de forma abrupta, y que además este patrón de circulación permaneciera por al menos diez días. Si bien esta definición representa adecuadamente la configuración de un bloqueo, presenta la desventaja de no ser una metodología objetiva ni práctica al momento de querer implementarla para un número mayor de casos.

Unas décadas más tarde Lejenäs and økland (1983) propusieron un índice automatizado para identificar flujo bloqueado. A partir de diferencias de datos de reanálisis de altura de geopotencial en 500 hPa entre 40°N y 60°N e imponiendo condiciones de persistencia en el tiempo y continuidad en la longitud definieron eventos de bloqueo atmosférico. En este trabajo, se presentan las frecuencias de ocurrencia de días bloqueados a lo largo del año para el HN, a partir de 30 años de datos. También analizan la ocurrencia simultánea de bloqueos en diferentes regiones con el fin de evaluar si un evento en una determinada región podría desencadenar un bloqueo en otra determinada región diferente comenzando unos días después. Si bien indican que

podría existir cierta conexión, no logran encontrar una evidencia lo suficientemente fuerte como para afirmar la existencia de ocurrencias simultáneas o con un pequeño desfase temporal y/o espacial.

En un primer trabajo Tibaldi and Molteni (1990) analizan los días con flujo bloqueado y con ocurrencia de bloqueos para los inviernos entre 1980-1987 utilizando también datos de reanálisis de altura de geopotencial de ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting) en 500 hPa, aplicando la metodología de Lejenäs and økland (1983). Denominan flujo bloqueado cuando las condiciones dinámicas y geográficas se satisfacen para un día, y bloqueo cuando un sector mantiene esta configuración durante al menos 5 días. Se propone una restricción a la metodología original de manera que las bajas segregadas, cuando no están asociadas a un patrón de alta presión, no sean erróneamente clasificadas como bloqueos. También en este trabajo evalúan la habilidad de predicción de un bloqueo sin obtener resultados muy satisfactorios.

Prácticamente en simultáneo con esta propuesta Legras and Ghil (1985) proponen una vinculación entre eventos de bloqueos y campos de vorticidad potencial. Estos autores simulan la formación de estos eventos en un escenario de topografía simplificada y un jet forzado. Posteriormente Pelly (2001) adopta esta propuesta de un nuevo índice para identificar bloqueos en el HN basándose en la conservación de la vorticidad potencial. Con este nuevo índice, más dinámico, se permite que ocurran bloqueos en una extensión latitudinal más grande. Por este motivo, los bloqueos encontrados de esta forma no son los mismos a los encontrados con la metodología clásica. Incluso la frecuencia de ocurrencia presenta una gran variabilidad intra-anual y depende de la región considerada; resultando que en la región del Pacífico Norte Central los bloqueos alcanzan su pico de ocurrencias para los meses cálidos, al contrario de lo que sucede con los bloqueos hallados con la metodología de Lejenäs and økland (1983).

1.3. Estudios en el hemisferio sur

A pesar de que el estudio de bloqueos atmosféricos se ha concentrado en el hemisferio norte debido a una mayor densidad tanto en población como en datos disponibles, existen algunos trabajos enfocados en el HS. Los primeros estudios de bloqueos en el HS comenzaron con Trenberth and Mo (1985) cuyo foco fue la frecuencia y la distribución espacial de los mismos. El criterio para identificarlos consistió en selec-

cionar aquellos días en los que la altura de geopotencial en 500 hPa se mantuvo por encima de cierto umbral durante un mínimo de 5 días. Encontraron que el sector de Nueva Zelanda es el que presenta mayor frecuencia de ocurrencia, seguido por la región sudeste de Sudamérica y del Océano Índico Sur.

Como continuación del trabajo previo, Tibaldi et al. (1994) presentan uno de los primeros trabajos para ambos hemisferios donde estudia la frecuencia de bloqueos por estaciones y su predictabilidad. Los autores observan que en el HS los bloqueos son menos frecuentes y con una estacionalidad menos marcada respecto al HN. Implementado en el HN, define las regiones Europa-Océano Atlántico y Pacífico encontrando que en la primer región ocurren mayormente días con flujo bloqueado en primavera (357 días los cuales corresponden a 27 bloqueos), mientras que en la segunda región predominan los días bloqueados en los meses de invierno (285 días bloqueados y 25 bloqueos). Por otro lado, para el HS considera la región Australia - Nueva Zelanda la cual se caracteriza por tener mayor cantidad de días bloqueados en invierno (249 días de flujo bloqueado y 21 bloqueos). Las regiones con mayor ocurrencia de bloqueos son similares a las encontradas por Trenberth and Mo (1985).

En su tesis de doctorado, Marques (1996) realiza un estudio de bloqueos en el HS con datos de reanálisis de ECMWF entre 1980 y 1989 suavizados mediante un filtrado de Fourier combinado con la metodología de Lejenäs and økland (1983). Posteriormente Marques and Rao (1999) analizan un caso en invierno de 1986 ocurrido en el Pacífico sureste que perduró por 17 días, duración poco típica en este hemisferio. A partir de datos de Monthly Climatic Data for the World (MCDW)¹ encontraron que prevalecieron condiciones de anomalías positivas de precipitación al norte de la alta bloqueante y anomalías negativas de precipitación en la región de la alta.

Kayano (1999) estudia episodios de bloqueos entre 1979 y 1995 en la región Pacífico Sureste a partir de datos de reanálisis de NCEP (National Centers for Environmental Prediction). El análisis fue dividido en verano austral, desde noviembre a marzo, e invierno austral, entre mayo y setiembre. En ambos casos se realizaron los composites de agua precipitable (Pw) y anomalías de temperatura en 925 hPa para estudiar los efectos de estos bloqueos en Sudamérica. También estudia los campos de viento en 250 hPa para observar la estructura del jet en los composites y anomalía de

¹MCDW es una publicación mensual de la división National Climatic Data Center (NCDC) perteneciente a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) la cual contiene datos mensuales de aproximadamente 2.000 datos de estaciones en superficie a lo largo del mundo de las variables: temperatura, presión, precipitación, presión de vapor y radiación.

altura de geopotencial en 500 hPa para complementar el composite de la anomalía detectada en superficie. Los patrones dominantes de anomalías de presión media a nivel del mar son determinados con un análisis de función empírica ortogonal (EOF) sobre datos con un tratamiento previo en el cual se filtraron las fluctuaciones de bajas frecuencias. Kayano consideró un mínimo de 7 días para identificar bloqueos, encontrando 39 períodos con bloqueos en invierno y 34 en verano para los 17 años empleados.

Comenzando en 2005 y en sucesivos trabajos, Mendes (2005); Mendes et al. (2008); Mendes (2012), caracterizan los bloqueos en todo el HS dividiendo el dominio en 5 regiones: Pacífico Suroeste, Pacífico Sureste (PAC), Atlántico Sur (ATL) Índico y Oceanía. Comenzaron caracterizando bloqueos entre los años 1960 y 2000 usando datos de reanálisis de NCEP/NCAR (National Center for Atmospheric Research) siguiendo la metodología de Tibaldi et al. (1994). Asimismo, evaluaron el impacto en los campos de temperatura y precipitación, también a partir de datos de NCEP/NCAR. En estos estudios, observaron que los meses de invierno son aquellos donde predominan los bloqueos, y también encontraron una variabilidad interanual muy grande. Posteriormente realizaron una comparación entre los bloqueos obtenidos con los datos de NCEP/NCAR y con los datos de ECMWF centrandose en el HS. Los autores muestran que ambos reanálisis detectan los bloqueos de manera similar. Sin embargo, encontraron ciertas discrepancias en cuanto a la duración particular de cada evento y en el número total de eventos, probablemente debido al esquema de asimilación para producir el reanálisis y a la resolución de cada conjunto de datos (Mendes, 2012).

Un estudio con datos recientes desde 1960 hasta el 2011 fue realizado por Alessandro (2014), quien centró su análisis en la región PAC-ATL utilizando una metodología diferente. Los bloqueos fueron identificados a partir de la componente zonal del viento a las 12Z en 500 hPa. Este índice se basa en el comportamiento anormal de viento zonal débil y persistente durante la ocurrencia de un bloqueo. Si bien los eventos de bloqueo son más frecuentes en primavera e invierno, encontró que los bloqueos en estos meses presentan una tendencia a disminuir en frecuencia de ocurrencia. Por otro lado, los eventos en los meses de verano y otoño presentan tendencia a aumentar. También estudia el efecto de los bloqueos sobre Argentina, evidenciando influencias en la precipitación y la temperatura, dependiendo el valor de la anomalía de la época del año y de la ubicación (longitud) del bloqueo.

Con la misma metodología aplicada por Pelly (2001), en el HS Rodriguez and Woolings (2017) identifican bloqueos cuya climatología indica que ocurren más frecuentemente en los meses cálidos. Al igual que para el HN, estos tipos de bloqueos tampoco son encontrados por los índices con la metodología de Lejenäs and økland (1983) por estar localizados en latitudes más bajas que los que busca este índice; por lo que representan una configuración del flujo bloqueado distinta a la que se encuentra en los trabajos comentados anteriormente, y distinta a su vez a los resultados que se presentan en este trabajo. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo no van a ser comparados con aquellos trabajos basados en el índice de conservación potencial, debido a que este enfoque es bien distinto al seguido por la metodología clásica, y los resultados en ambos casos provienen de distintas caracterizaciones.

Los trabajos enfocados a la predicción de este tipo de fenómenos en el HS son escasos. Por un lado, Anderson (1993) lo atribuye a que los bloqueos en el HS son menos frecuentes y de menor duración que en el HN. Por otro lado, Tibaldi et al. (1994) atribuyó la falta de acierto en predecir el desarrollo de un bloqueo en el HS a la notoria escasez de datos disponibles respecto a la disponibilidad de datos en el HN. En ambos casos, los estudios realizados terminaron en resultados menos satisfactorios para el HS en comparación al HN. A través del modelo ECMWF EPS (Ensemble Prediction System) el cual consiste en 50 pronósticos con condiciones iniciales perturbadas, Pelly (2001) demuestra (para el HN) que el establecimiento de un episodio de bloqueo es más difícil de predecir que su debilitamiento, porque el inicio de un bloqueo es más espontáneo que su decaimiento. Esto es esperable ya que el inicio de un bloqueo depende de una inestabilidad del flujo, lo cual es complicado de predecir. Como los bloqueos atmosféricos tienen una duración característica de 5 a 15 días y una escala espacial de miles de kilómetros, su escala temporal se encuentra en el límite entre interacción a escala sinóptica producida por transientes y patrones de baja frecuencia como pueden ser las ondas estacionarias.

En resumen, numerosos estudios muestran que los bloqueos en el HS son más frecuentes en los meses fríos (Mendes et al (2012, 2008, 2005), Marques et al (1996), Alessandro (2014, 2005), Kayano (1999), Tibaldi et al (1994)). Este resultado se asocia a un gradiente térmico meridional más intenso en esta época del año, y al desplazamiento hacia el ecuador de los jets polares y subtropicales, alcanzando este último su intensidad máxima en invierno y afectando Sudamérica. Por otro lado, como en los meses cálidos el jet subtropical prácticamente desaparece sobre América del Sur y el jet polar prevalece en altas latitudes, disminuye la frecuencia de

bloqueos en la región. Además, estas autoras encuentran que los bloqueos que duran 5 o 6 días son los más frecuentes en el Océano Pacífico Sudeste y en el Océano Atlántico Sur. Si bien ocurren con más frecuencia en Oceanía y en el Océano Pacífico Suroeste, no muestran impactos significativos en la temperatura y la precipitación sobre Sudamérica. Como ejemplo, en invierno y otoño se encontraron precipitaciones por encima de la climatología para la región sudeste-centro de Sudamérica durante eventos de bloqueos en ATL (Mendes et al., 2008). También encuentran una gran variabilidad interanual para los bloqueos en el HS.

1.4. Objetivos del trabajo

Los objetivos generales de este trabajo son identificar y estudiar la variabilidad interanual de los patrones de bloqueo atmosférico en el HS, en particular en los Océanos Pacífico Sureste y Atlántico Sur por ser aquellas configuraciones que tienen impactos sobre nuestro país.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Implementar un índice que identifique los bloqueos atmosféricos ocurridos entre 1980 y 2016 en los Océanos PSE y ATS.
- Construir la climatología de los eventos de bloqueo, estudiando la variabilidad interanual e intra-anual, distribución meridional de días bloqueados, frecuencia estacional de ocurrencia de bloqueos, duración típica de bloqueos en el HS.
- Clasificar eventos de bloqueos según su estructura y su región de ocurrencia para identificar los impactos de gran escala sobre nuestra región.
- Elegir un caso de estudio para estudiar los impactos que tuvo sobre nuestro país.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. Los datos usados y la metodología aplicada para caracterizar los bloqueos atmosféricos se introducen en el capítulo 2. En el capítulo 3 se describen las principales características de los bloqueos en las regiones definidas, su distribución en el año y variabilidad interanual de ocurrencias durante el período en estudio, y su impacto general en las temperaturas y la precipitación. En el capítulo 4 se describe con detalle un episodio de bloqueo asociado a un evento con temperaturas por debajo de la media en la región, la evolución en las temperaturas y precipitación durante el mismo. Finalmente, se presentan las conclusiones y comentarios generales en el capítulo 5.

2. Datos y metodología

En este capítulo se realiza una descripción de los datos utilizados en el trabajo para la identificación de bloqueos. Luego se explica la metodología empleada, con las modificaciones implementadas de acuerdo a la región de interés. Para ser consistente con la literatura a comparar más adelante, se clasifican los 365 días del año de la siguiente forma: verano desde el primero de diciembre hasta el 28 de febrero² del año inmediatamente consecutivo; otoño entre el primero de marzo y el 31 de mayo; invierno desde el primero de junio al 31 de agosto y primavera los meses de setiembre, octubre y noviembre.

2.1. Datos utilizados

2.1.1. Datos utilizados en la identificación de bloqueos

Existe una gran deficiencia de cobertura de datos en el HS. Esto se debe principalmente a las grandes áreas oceánicas y a la precariedad de la red de superficie y de radiosondeos sobre los continentes en este hemisferio. Sin embargo, desde 1980 este problema se ha amortiguado con la información satelital y los análisis globales de los centros de pronóstico una vez que se generan datos en puntos de grilla (Marques, 1996). Por este motivo, para realizar este estudio no es posible contar con datos de medida si se busca realizar un estudio en una gran extensión espacial contando con una estadística de temporal de décadas. Se utilizarán datos diarios de reanálisis de NCEP/NCAR para la variable altura de geopotencial en el nivel de 500 hPa (z500), los cuales están distribuidos espacialmente en una grilla de 2.5° de latitud por 2.5° de longitud. El período a estudiar comprende los años 1980 hasta 2016 y el dominio es el comprendido entre las latitudes 35° S - 65° S y las longitudes 120° W - 0° E. El dominio elegido para identificar bloqueos se basa en las regiones PAC y ATL propuestas por Mendes et al (2005) mostradas en la Figura 2, donde los bloqueos atmosféricos encontrados evidenciaron influencia sobre Uruguay.

Los datos de reanálisis de NCEP/NCAR se derivaron de una asimilación y un proceso de modelado que incorporan todas las observaciones disponibles obtenidas por mediciones convencionales (medidas en tierra, en barcos, desde aviones, radiosondeos, entre otros) junto con información satelital. Este sistema de asimilación de datos cuenta con un avanzado control de calidad, clasificando las variables de salida en cuatro clases, dependiendo del grado de influencia que posean del modelo o de

²Para simplificar los cálculos se trabaja con febreros de 28 días todos los años.

las observaciones. La altura de geopotencial es clasificada en la categoría A, la cual indica que esta variable es fuertemente influenciada por los datos observados y por lo tanto, constituye la clase más confiable (Kalnay et al., 1996). Como además la mayor parte del análisis realizado es a partir de composites de anomalías (restando la media), se filtra el impacto del bias sistemático del modelo en estos resultados (Trigo et al., 2004).

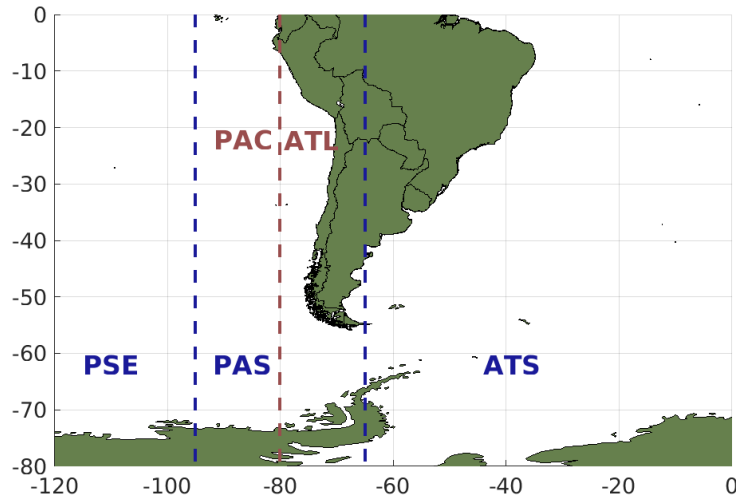


Figura 2: Regiones iniciales elegidas para identificar bloqueos en el HS, PAC y ATL. Regiones para caracterización de bloqueos: PSE centrada en 110°W, región PAS centrada en 80°W y ATS centrada en 30°W.

2.1.2. Datos de temperatura y precipitación

Los datos a utilizar en la segunda etapa provienen de series de temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima diaria (Tn) de diez estaciones meteorológicas del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) y una estación del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). En la Tabla 1 se describen las características de las estaciones. La Figura 3 muestra la ubicación de las mismas. Si bien todas estas estaciones inician sus mediciones en la primer mitad del siglo XX, solo se utilizan para este trabajo los registros desde enero de 1980 para ser consistente con la detección de bloqueos. Se trabaja con datos de temperatura hasta octubre de 2014 ya que es el período disponible con un análisis de calidad previo el cual se encuentra descrito en la tesis de grado de De Mello (2013) y de doctorado de Renom (2009). Los datos de temperatura máxima son obtenidos con mediciones de termómetro de máxima ubicado en la casilla meteorológica y el dato diario corresponde a la máxima temperatura registrada a las 21 horas (local) comprendiendo las 24 horas previas a

la medición. Por su parte la temperatura mínima es registrada con un termómetro de mínima también ubicado en el abrigo meteorológico y la observación es realizada a las 9 horas (local) abarcando las 24 horas previas a la medición.

Estación	Código OMM	Latitud(°)	Longitud(°)	Altitud (m)	Datos Tx faltantes (%)	Datos Tn faltantes (%)
Rivera (RI)	83953	-30,90	-55,54	241,9	15,14	15,09
Artigas (AR)	86330	-30,40	-56,51	120,4	0,19	0,15
Salto (SA)	86360	-31,44	-57,98	41,0	0,15	0,08
Paysandu (PA)	86430	-32,38	-58,03	61,1	0,10	0,07
Paso de los Toros (PT)	86460	-32,80	-56,53	75,5	0,67	0,05
Melo (ME)	86440	-32,37	-54,19	100,4	3,05	0,10
Mercedes (ME)	86490	-33,25	-58,07	17,0	0,06	1,12
Estanzuela (ES)	NC	-34,45	-57,84	80,0	0,01	0,01
Prado (PR)	86585	-34,86	-56,21	16,3	3,63	3,60
Carrasco (CA)	86580	-34,83	-56,01	32,9	0,25	1,31
Rocha (RO)	86565	-34,49	-54,31	18,2	0,61	0,18

Tabla 1: Ubicación y características de las estaciones meteorológicas utilizadas. El porcentaje de datos faltantes está expresado en base al período 1980-2014.

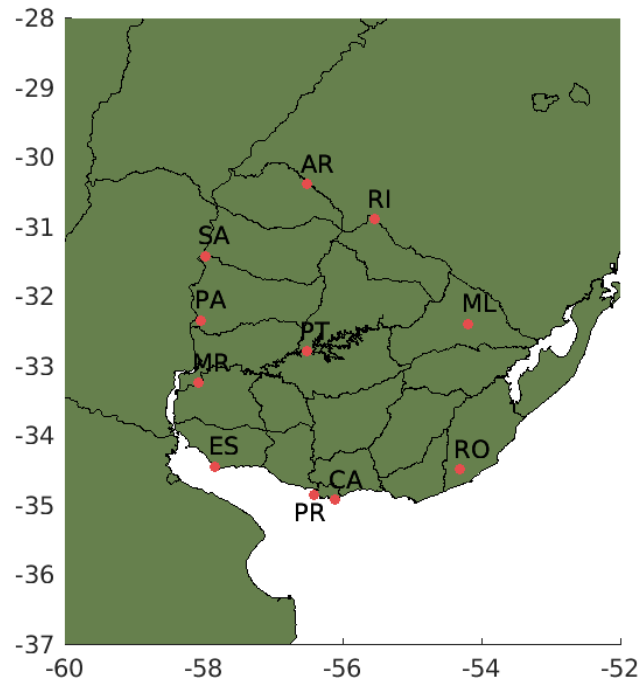


Figura 3: Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas.

Sobre la completitud de la serie es necesario realizar algunos comentarios. Primero, la estación ubicada en el Prado se mantuvo cerrada entre 1975 y 1980, por lo que en

este trabajo se disponen datos de esta estación a partir de febrero de 1981. Por otro lado, la estación ubicada en Rivera se mantuvo cerrada entre 1985 a 1989, por lo que hay casi 5 años de datos faltantes para esta estación. Como el período a estudiar en el caso de temperatura comprende 34 años, desde 1980 a 2013, se dispone con más de 30 años en el caso de la serie correspondiente a Prado y casi 30 años para aquella en Rivera, siendo una base robusta para establecer las relaciones que se buscan con este trabajo. Por último, la estación ubicada en La Estanzuela perteneciente a INIA, si bien es la única que no forma parte de la red de estaciones meteorológicas de INUMET es la que menor porcentaje de datos faltantes tiene.

Los valores de anomalías obtenidos para la variable temperatura son respecto a una media móvil de 5 días tanto para temperatura máxima como para temperatura mínima diaria para el período 1980-2014. Para la interpolación de las observaciones en las estaciones meteorológicas en todo el territorio uruguayo se utiliza la técnica de kriging. Este método de interpolación es muy utilizado en aplicaciones geostatísticas, basándose en la minimización de la varianza del error. Para este trabajo la técnica se implementó a través de funciones preexistentes para MatLab.

Para complementar el análisis con datos de temperatura se evalúa también el efecto en la precipitación en nuestro país. Los datos utilizados corresponden a estimaciones de Tropical Rainfall Measure Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) que surgen de un proyecto entre National Aeronautics and Space Administration (NASA) de Estados Unidos y National Space Development Agency (NASDA) de Japón diseñado para estimar lluvia en los trópicos y extratropicos. Se realizaron mediciones entre 1998-2015 con un dominio espacial abarcando desde 50°S hasta 50°N latitudinalmente y cubre toda la extensión longitudinal. Cuenta con una resolución horizontal de 0.25° x 0.25° y el producto primario se obtiene con una frecuencia de 3 horas. Para este trabajo se utiliza todo el período de datos disponible en la base TRMM a escala diaria. El dominio espacial abarca la región 65°W a 45°W en la longitud y 45°S a 20°S latitudinalmente.

Precipitación es una variable compleja de medir adecuadamente con instrumentos desde la superficie terrestre debido a su gran variabilidad de pequeña escala en el espacio y el tiempo. Es por esto que los sensores a bordo de satélites juegan un rol fundamental en la estimación de precipitación. Los objetivos de esta misión consistieron en medir precipitación e intercambios de energía (por ejemplo, calor latente de condensación) en regiones tropicales y subtropicales en el mundo. TMPA

depende de dos sensores diferentes, de microonda e infrarrojo. A escala mensual TMPA mostró una performance razonable (Huffman et al., 2007). En cuanto a la pequeña escala, si bien los errores inherentes a la estimación son grandes, se puede utilizar esta información para aplicaciones donde los promedios sean la principal aplicación (Gebremichael and Hossain, 2010). Como este es el caso parece adecuado utilizar esta base de datos para estimación de precipitación.

2.2. Identificación de bloqueos

Si bien no existe una definición única y objetiva para identificar los bloqueos, las condiciones básicas que se requieren son:

- existencia de un gradiente de altura de geopotencial meridional, para alguna latitud fija (condición de longitud bloqueada)
- al menos 3 datos consecutivos longitudinalmente en la grilla de reanálisis con condición de bloqueo
- persistencia en el tiempo en días de esta configuración

Se define la altura de geopotencial Z como:

$$Z = \frac{1}{g_0} \int_0^z g dz \quad (1)$$

donde g_0 es la aceleración media promedio debido a la gravedad en la superficie terrestre y z representa la altura de la atmósfera considerada desde la superficie. Anomalías de altura de geopotencial consisten en desviaciones en el campo de altura de geopotencial respecto a sus valores medios. Los mapas de anomalías de altura de geopotencial indican que valores positivos se corresponden con campos de presión por encima del valor medio esperado, mientras que valores negativos en anomalía de altura de geopotencial se asocian a campos de baja presión. Las anomalías de altura de geopotencial utilizadas en este trabajo son calculadas respecto a una media móvil para una ventana de 5 días.

En este trabajo se siguió la metodología clásica propuesta originalmente por Lejenäs and økland (1983) y modificada posteriormente por Tibaldi et al. (1994), combinado con una adaptación implementada por Mendes (2005) para identificar específicamente los bloqueos en la región elegida. Con esta metodología los índices para identificar patrones de bloqueo se calculan a partir de las series de altura de geopotencial en las regiones comprendidas por los Océanos Pacífico Sureste y Atlántico Sur y se detalla

a continuación.

Para considerar la diferencia entre los valores de altura de geopotencial a lo largo de cierta longitud, se definen dos gradientes meridionales de altura de geopotencial, Gradiente Sur de Altura de Geopotencial (GHGS) y Gradiente Norte de Altura de Geopotencial (GHGN), según la ecuación 2

$$GHGS = \frac{Z(\lambda, \phi_S) - Z(\lambda, \phi_0)}{\phi_S - \phi_0}, \quad (2)$$

$$GHGN = \frac{Z(\lambda, \phi_0) - Z(\lambda, \phi_N)}{\phi_0 - \phi_N}$$

donde ϕ es la latitud a la cual se busca el bloqueo y se inicializa con los valores:

$$\phi_S = 65^\circ + \Delta, \quad \phi_0 = 50^\circ + \Delta, \quad \phi_N = 35^\circ + \Delta,$$

siendo $\Delta = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$.

El valor de longitud corresponde a λ y para el dominio elegido varía entre 120°W y 0°E .

Para identificar primero una longitud bloqueada para cierto día, se buscan las fechas que cumplen simultáneamente las condiciones:

$$GHGS < -10m/deg.lat \quad (3)$$

$$GHGN > 0 \quad (4)$$

De estas configuraciones, se eligen aquellas que cumplen la condición (3) al menos en 3 puntos de grilla en la longitud consecutiva (que corresponden a 15° de longitud de acuerdo a la resolución de los datos NCEP/NCAR y a que se utilizó un intervalo Δ de 5° para identificar eventos de gran extensión espacial). Por último, se seleccionan como episodios de bloqueos estas configuraciones cuando se mantienen durante al menos 5 días consecutivos para asegurar que el flujo tenga carácter de bloqueo y no de flujo bloqueado. Cabe destacar dos aspectos en el cálculo del índice. Si bien la condición 4 se satisface con frecuencia, es agregada por Tibaldi and Molteni (1990) respecto a la condición 3 propuesta originalmente por Lejenäs and økland (1983) para no considerar como bloqueos aquellos casos en que un ciclón se posiciona anómalamente hacia el sur. Por otro lado, solo se permite que un úni-

co día intermedio durante el episodio de bloqueo no cumpla con las condiciones 3 y 4.

La elección de 5 días como mínimo está basada en el criterio de Tibaldi et al. (1994) y Mendes et al. (2008), donde si bien se afirma que no hay una duración mínima globalmente aceptada para definir eventos de bloqueo, fijan el valor de 5 días para el HS. De esta manera, quedan definidos los eventos de bloqueos atmosféricos como aquellos que tienen una duración mínima de 5 días, ocurriendo en al menos una banda mínima de longitud y con cierto gradiente meridional de altura de geopotencial.

En la construcción de nuestro índice, los valores iniciales ϕ_S , ϕ_N , ϕ_0 son los propuestos por Tibaldi et al. (1994), quienes además utilizaron valores de $\Delta = -3,75^\circ; 0^\circ; 3,75^\circ$. Como los resultados obtenidos con este rango de intervalos de latitud subrepresentaba la ocurrencia de bloqueos al comparar con un trabajo más reciente (Mendes et al., 2008), decidimos extender el intervalo para poder capturar más eventos. Tampoco el índice implementado es idéntico a este trabajo ya que la definición de la ecuación 2 consideran bloqueos algo más al sur.

La implementación de este índice se realiza mediante el software MatLab. Una vez identificados los eventos, se presenta su distribución de ocurrencia a lo largo de las estaciones, la distribución en los años de estudio y en la longitud. A partir de tablas de contingencia y test chi-cuadrado con confianza al 95 % se estudia el vínculo entre los bloqueos identificados y los eventos Niña y Niño. Luego, para cada estación del año y para cada sector de ocurrencia se realiza un test de medias para estudiar la significancia estadística de cada evento sobre los composites. La prueba realizada consiste en un test de student de un extremo al 5 %.

2.2.1. Verificación del índice implementado

Como forma de comprobar que la metodología funciona, se buscaron bloqueos previamente estudiados por otros autores de los cuales se conoce la fecha de identificación con exactitud. En la Tabla 2 se muestra esta comparación, donde se indica la duración de casos de estudio identificados por varios autores junto con la duración que nuestro índice le asocia al mismo evento. Ya que la duración no es la misma para los bloqueos identificados con ambas metodologías en comparación, se indica en la última columna de dicha tabla la duración del bloqueo de referencia (BR) menos la duración del bloqueo identificado por nuestra metodología (BT).

Referencia	Duración BR	Duración BT	Diferencias en días entre BR - BT
Marques and Rao (1999)	29 julio- 14 agosto de 1986	24 de julio- 14 agosto 1986	-5
Nascimento and Ambrizzi (2002)	21-26 agosto 1995	19-26 agosto 1995	-2
Mendes et al. (2008)	4-8 junio 1997	5-13 junio 1997	-4
Alessandro (2005)	1-7 setiembre 1996	2-7 setiembre 1996	+1

Tabla 2: Comparación entre ocurrencia de bloqueos de referencia (BR) y bloqueos identificados en este trabajo (BT).

Los bloqueos encontrados en este trabajo son en su mayoría de mayor duración en comparación a los mismos eventos encontrados por diferentes autores. Cabe destacar que no todos trabajaron con la misma metodología, con las mismas latitudes en la identificación o con la misma base de datos. La metodología más similar a la nuestra es la de Mendes et al. (2008), con la diferencia de que ellos buscan bloqueos más al sur. En Nascimento and Ambrizzi (2002) se trabaja con la metodología de Tibaldi et al. (1994) pero su dominio latitudinal es menor. Alessandro (2005) emplea un índice basado en el viento zonal y Marques and Rao (1999) identifica bloqueos con datos ECMWF. Tal como había mostrado Mendes (2012), la identificación de los bloqueos es consistente aunque con pequeñas diferencias de duración, lo que nos habilita a suponer que nuestra metodología se puede aplicar para la región de estudio elegida.

Excepto por el evento de junio de 1997, los tres tienen la misma fecha de finalización con nuestra metodología y con la encontrada en la literatura. Esto sugiere que la detección del comienzo de un bloqueo es más sensible a la técnica y datos utilizados en el estudio.

3. Resultados

En este capítulo se muestra la caracterización de bloqueos con el índice implementado según la región de ocurrencia y de acuerdo a las cuatro estaciones del año. En la sección 3.1 se presenta la climatología de los bloqueos para la región de estudio. En la sección 3.2 se presentan los campos medios de las variables a estudiar y en las últimas tres secciones la caracterización de bloqueos para las diferentes regiones elegidas.

3.1. Caracterización y variabilidad de bloqueos en los Océanos Pacífico Sureste y Atlántico Sur

La duración y distribución temporal de los eventos identificados se muestra en la Figura 4 donde el eje horizontal corresponde a los años de estudio y el eje vertical representa los 365 días del año. Los días sin evento corresponden a los períodos en color blanco y la escala de colores indica la duración en días de cada evento. Se observa que entre mayo y setiembre ocurren la mayoría de estos eventos, distinguiéndose varios meses de diciembre sin bloqueos y únicamente en dos de los treinta y siete enero se detectó ocurrencia de bloqueo. Se puede observar que la duración típica comprende de cinco a ocho días, y se ven algunos eventos que duran alrededor de 12 días en los meses más fríos. Por último se distinguen 2 eventos de gran duración, uno de 17 días y otro de 23 que también ocurrieron en los meses fríos.

La frecuencia de ocurrencia de bloqueos de acuerdo a su duración se muestra en la Tabla 3 y se complementa en la Figura 5 donde se distingue por estación del año. Como se observaba en la Figura 4, los dos eventos de mayor duración ocurren en los meses de invierno. Otoño es la época donde mayor cantidad de eventos de 5 días de duración se registró, mientras que los bloqueos de invierno perduran típicamente por 5 y 6 días. Durante los meses de verano, ningún evento perduró por más de 10 días en todas las longitudes. La mayoría de los eventos duran entre 5 y 6 días para todas las estaciones del año, como fue mencionado por varios autores para el HS.

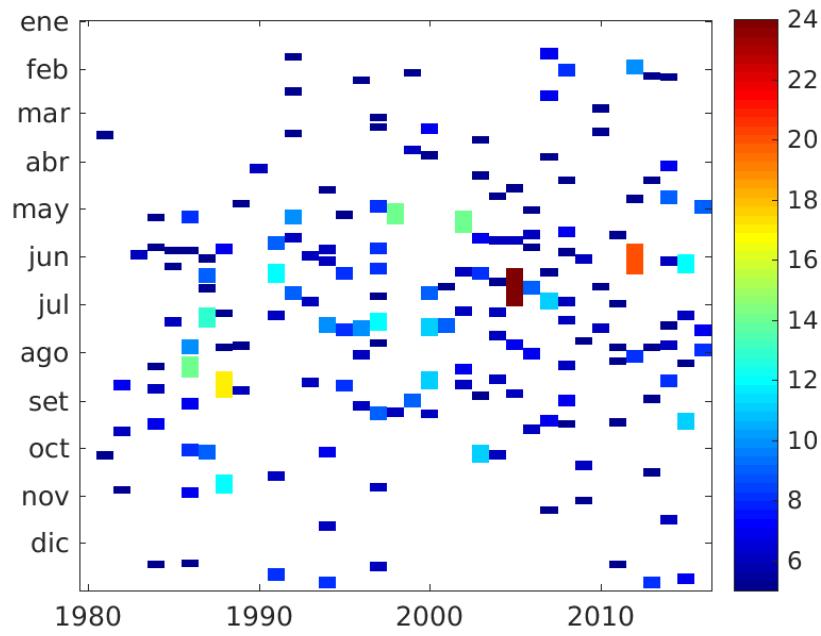


Figura 4: Clasificación de eventos en todo el dominio de acuerdo a su duración en días.

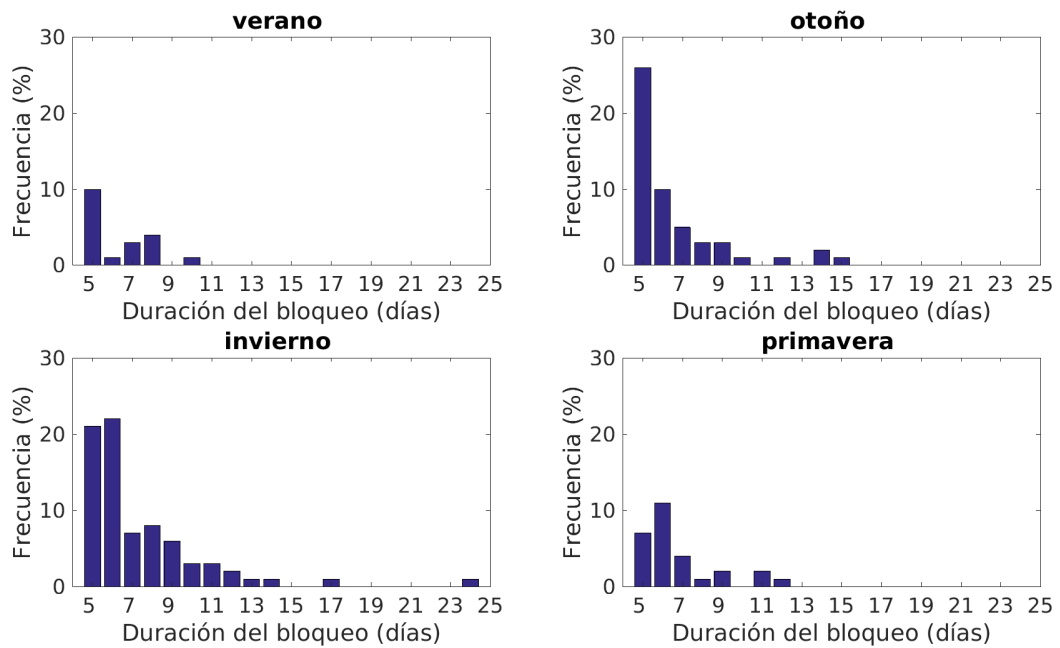


Figura 5: Frecuencia de ocurrencia de eventos de bloqueo según su duración en días para verano, otoño, invierno y primavera.

días	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ver	10	1	3	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
oto	26	10	5	3	3	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
inv	21	22	7	8	6	3	3	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
pri	7	11	4	1	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3: Frecuencia de ocurrencia de eventos por estación según su duración.

En la Figura 6 se muestra el acumulado de días con bloqueo para cada año entre 1980 y 2016. En concordancia con lo encontrado por (Marques, 1996), (Mendes, 2005), se observa que la variabilidad interanual es grande. En particular los pocos eventos encontrados a principios de las décadas del 80 y 90 y la gran cantidad de días con eventos alrededor de 1985 es consistente con la frecuencia de eventos obtenidos por Marques (1996). Alessandro (2014) muestra que la variabilidad interanual es grande y que además la tendencia de ocurrencia de bloqueos es variable según la estación. Por ejemplo, encontró que la frecuencia de ocurrencia de bloqueos en los meses más cálidos ha ido en aumento de manera significativa.

La distribución de días con ocurrencia de bloqueo entre el 1 de enero y el 31 de diciembre para todos los años del período se muestra en la Figura 7. En ella se evidencia que los meses cálidos son los que menos eventos registran. En particular, se observa que entre el 1 y 10 de enero y del 20 de noviembre al 10 de diciembre no se identificaron bloqueos para ninguno de los 37 años en estudio. Por otro lado, es interesante notar que en los últimos 20 días del año, los días inmediatamente posteriores a este período con ausencia de eventos han ocurrido 8 eventos. Dentro de los meses con mayor ocurrencia de bloqueos, se observa que a fines de mayo y a principios de julio hay mayor probabilidad que ocurra un bloqueo que durante el resto de los días de los meses fríos.

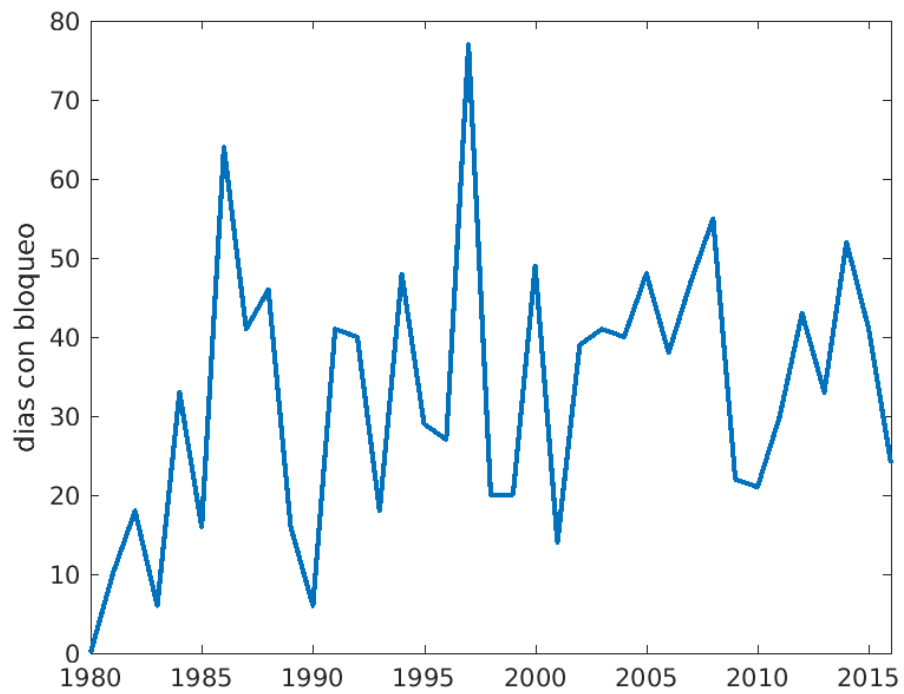


Figura 6: Variabilidad interanual de bloqueos.

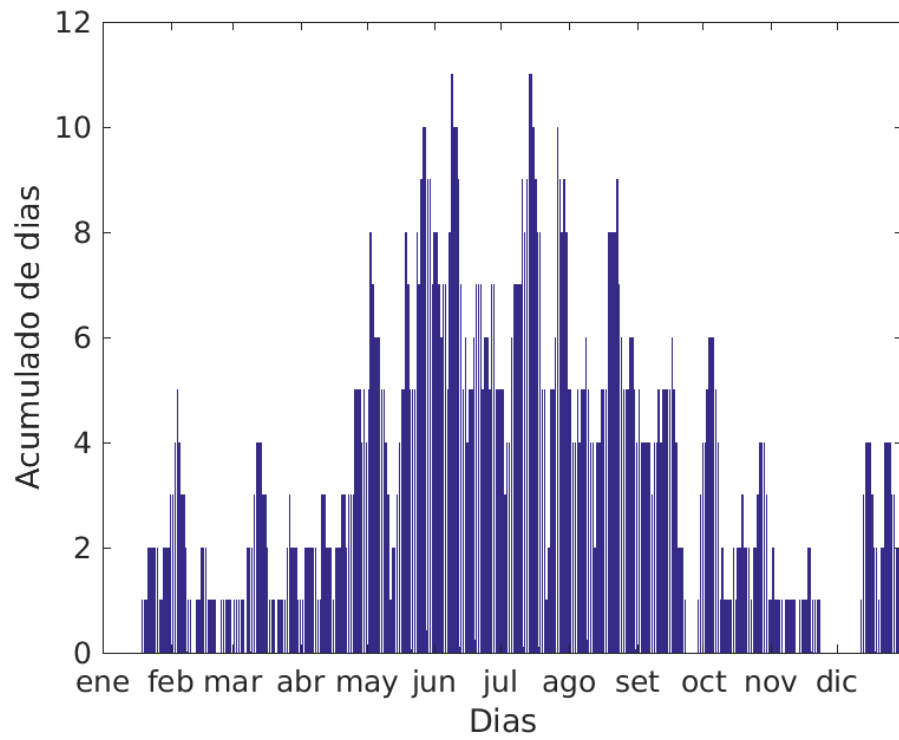


Figura 7: Variabilidad intra-anual de bloqueos.

3.1.1. Distribución longitudinal de bloqueos

La distribución de los bloqueos identificados con el índice implementado a lo largo de la longitud trabajada se muestra en la Figura 8. Se observa el predominio de estos eventos durante invierno y entre las longitudes comprendidas entre 120°W y 85°W . Inicialmente el estudio se había enfocado para las regiones PAC y ATL, dos regiones propuestas por Mendes et al. (2008) que habían mostrado impactos significativos en Sudamérica. A través de la observación individual de casos y comparando con resultados obtenidos por Alessandro (2014), quien definió tres regiones para un dominio similar, resolvimos clasificar los bloqueos en 3 categorías según su ubicación. Este nuevo criterio se basó en la observación de la estructura en el campo de anomalía de $z500$ y está centrando en las siguientes longitudes:

- Pacífico Sureste - PSE: 120°W - 100°W
- Pacífico Atlántico Sur - PAS: 95°W - 65°W
- Atlántico Sur - ATS: 60°W - 0°W

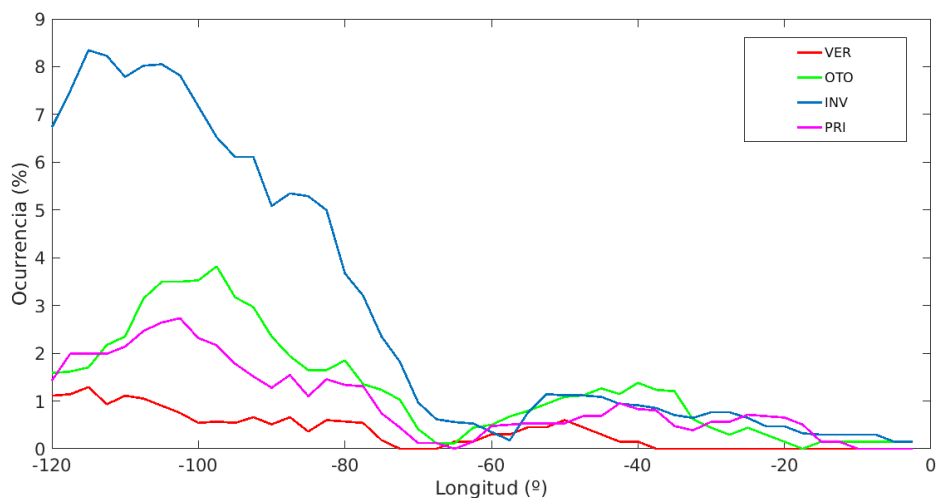


Figura 8: Distribución de días con bloqueos a lo largo de las longitudes 120°W - 0°W clasificados por estación del año.

La distribución de ocurrencias según la longitud es similar a la obtenida por Tibaldi et al. (1994), con baja frecuencia de ocurrencia entre 60°W y 0°W . Alrededor de 100°W en este trabajo la frecuencia de ocurrencia se encuentra entre 6 y 9% (para JJA y SON) y se asemeja bastante al 8% mostrado en la Figura 8. También en Marques (1996) se encuentra esta misma frecuencia de ocurrencia clasificando por

longitud. La ocurrencia de eventos identificados por región y por estación se describen en la Tabla 4, donde se indica la cantidad total de días en los que se identificó bloqueo. En términos geográficos en la región PSE es en donde predominan estos eventos en comparación a las demás regiones, siendo ATS la región donde menos días con bloqueo se identifican. En términos estacionales, los bloqueos identificados tienen un máximo de ocurrencias en invierno y un segundo máximo en otoño, siendo verano la estación con menor cantidad de eventos identificados para todas las regiones. En la Tabla 5 se indica el porcentaje de días con bloqueos respecto a la cantidad de días de dicha estación en el total de los años en estudio. Al igual que encuentran en Mendes et al. (2008), Marques (1996), en la región ATS entre noviembre y febrero el porcentaje de ocurrencia de bloqueos es de 1%. Por otro lado, en las regiones PSE y PAS, los meses con mayor porcentaje de días bloqueados son desde mayo hasta agosto con alrededor de 10% y 6% respectivamente.

	verano	otoño	invierno	primavera
PSE	68	149	409	138
PAS	35	101	239	66
ATS	20	94	87	54

Tabla 4: Cantidad de días identificados con bloqueo por estación y por sector de días con bloqueo entre 1980 y 2016.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
PSE	0.5	2.5	1.3	2.8	8.5	13.3	10.7	9.1	5.0	4.6	1.6	3.1
PAS	0.9	1.4	1.8	1.1	5.9	5.9	6.5	6.2	3.3	1.5	0.0	0.9
ATS	0.4	0.5	1.9	2.8	3.1	1.5	3.7	1.5	2.1	1.6	0.5	0.9
TOTAL	1.8	4.4	5.0	6.7	17.5	20.7	20.9	16.8	10.4	7.7	2.1	4.9

Tabla 5: Porcentaje mensual de días identificados con bloqueo según el sector respecto al total de días para cada mes entre los años 1980 y 2016.

3.1.2. Variabilidad interanual y vinculación con ENSO

En esta sección se analiza la variabilidad interanual mostrada en la Figura 6, estudiando cada sector de ocurrencia según la estación del año. Para estudiar la influencia de los eventos Niño o Niña en la ocurrencia y variabilidad de los bloqueos se clasifica cada bloqueo según si durante su ocurrencia se estaba en presencia de un evento Niño, Niña, o si consistía en un mes sin evento (neutro). La clasificación de bloqueo según evento Niño o Niña está basado en los valores publicados por la NOAA (NOAA, 2017). Para realizar esta clasificación se considera el Índice del Niño ONI

(por sus siglas en inglés Oceanic Niño Index) el cual se mide en el Océano Pacífico Central Tropical entre las latitudes 5°N y 5°S y las longitudes 120°W a 170°W y es una medida de la variabilidad en las anomalías de la temperatura en superficie del mar en el Pacífico ecuatorial, llamado variabilidad del fenómeno El Niño-Oscilación Sur. Cuando por un mínimo de tres meses consecutivos se mantiene una anomalía de 0,5°C positiva (negativa) se asocia ese trimestre con temperaturas cálidas (frías) en la superficie del mar en la región del Niño 3.4, y a su vez si esta anomalía persiste por 5 meses consecutivos se define la ocurrencia de un evento Niño (Niña) (Lindsey, 2013).

Entre los años 1980 y 2016 ocurrieron 10 eventos Niño cuya duración osciló desde 5 meses (a fines de 2006) hasta 19 meses consecutivos (desde finales de 2014 a principio de 2016). En cuanto a la Niña se registraron 11 eventos, con duración mínima de 5 meses (fines de 2016) y máxima de 32 meses (desde mediados de 1998 y principios de 2001) (NOAA, 2017). Dada la duración tan variable de estos eventos, sólo se identificaron 5 años completos neutros en el período en estudio.

La Figura 9 presenta la misma información que la Figura 4 cambiando la escala, que en este caso indica si ese bloqueo ocurrió durante un evento del Niño (eventos en color rojo), Niña (eventos en color azul) o durante mes neutro (eventos en color verde). El color claro en el fondo indica si se está en presencia de un año Niña, Niño o neutro, independientemente de identificación de un bloqueo atmosférico. Se observa que los eventos ocurridos entre noviembre y diciembre ocurren principalmente durante evento Niño. También se pueden ver años puntuales, por ejemplo 1997 y 2015 que corresponden a años Niño y durante los cuales ocurrieron varios bloqueos desde junio a diciembre, o 1988 y 2000 que corresponden a años Niña y que ocurrieron 4 bloqueos entre invierno y primavera en cada caso.

Se complementa esta figura con la clasificación de los eventos por región y por estación del año en las Figuras 10.a y 10.b para los eventos ocurridos en verano y otoño y en las Figuras 11.a y 11.b para eventos en invierno y en primavera, respectivamente. Los colores claros de fondo indican si el año corresponde a año Niña (azul), Niño (rojo) o neutro (verde). Estos resultados se resumen en la Tabla 6, de donde surge que el total de bloqueos ocurridos durante meses Niño es de 407, en meses Niña son 295 y en meses neutros 758. Como complemento, en la Tabla 7 se muestran estos valores en porcentual, normalizando respecto al total de eventos Niño, Niña y neutros para visualizar mejor el efecto de cada uno de estos tres períodos sobre cada región de estudio y cada época del año.

	Evento Niño				Evento Niña				Neutro			
	ver	oto	inv	pri	ver	oto	inv	pri	ver	oto	inv	pri
PSE	19	32	133	74	15	22	56	28	34	95	220	36
PAS	12	19	41	32	13	11	43	19	10	71	155	15
ATS	5	0	16	24	15	17	31	25	0	77	40	5
TOTAL	36	51	190	130	43	50	130	72	44	243	415	56

Tabla 6: Cantidad de días con ocurrencia de bloqueo para las regiones PSE, PAS y ATS clasificados según presencia de evento Niño o Niña y por trimestre.

	Evento Niño				Evento Niña				Neutro			
	ver	oto	inv	pri	ver	oto	inv	pri	ver	oto	inv	pri
PSE	4.7	7.9	32.7	18.2	5.1	7.4	19.0	9.5	4.5	12.5	29.0	4.7
PAS	2.9	4.6	10.1	7.9	4.4	3.7	14.6	6.4	1.3	9.4	20.4	2.0
ATS	1.2	0.0	3.9	5.9	5.1	5.8	10.5	8.5	0.0	10.2	5.3	0.7
TOTAL	8.8	12.5	46.7	32.0	14.6	16.9	44.1	24.4	5.8	32.1	54.7	7.4

Tabla 7: Frecuencia de ocurrencia de bloqueo para las regiones PSE, PAS y ATS clasificados según presencia de evento Niño o Niña y por trimestre. Valores porcentuales expresados respecto al total de cada evento. Total de bloqueos con Niño 407, total de bloqueos con Niña 295 y total en meses neutros 758.

Se distingue una clara preferencia a la ocurrencia de bloqueo durante otoño e invierno en períodos neutros en todas las regiones. Durante eventos Niño, los bloqueos favorecidos parecen ser los ocurridos en los meses de primavera habiendo casi el doble de bloqueos en primavera respecto a meses Niña y neutros (y predomina la ocurrencia de meses neutros) como se observa en la Tabla 6, y en la Tabla 7 en términos porcentuales. En cuanto a meses Niña, la época de verano es la favorecida para la ocurrencia de bloqueos, fundamentalmente en ATS y en menor magnitud en PAS. Estas últimas dos observaciones surgen de considerar que los meses con evento Niño o Niña son muchos menos en comparación a los meses neutros y se refuerzan al observar las ocurrencias en términos porcentuales. En particular en la región ATS no se identificó ningún día con bloqueo en veranos neutros y en otoños con Niño. De acuerdo a Marques (1996) en la región próxima a la costa oeste de América del Sur no se encuentran cambios significativos en la frecuencia de ocurrencia entre períodos Niño/Niña.

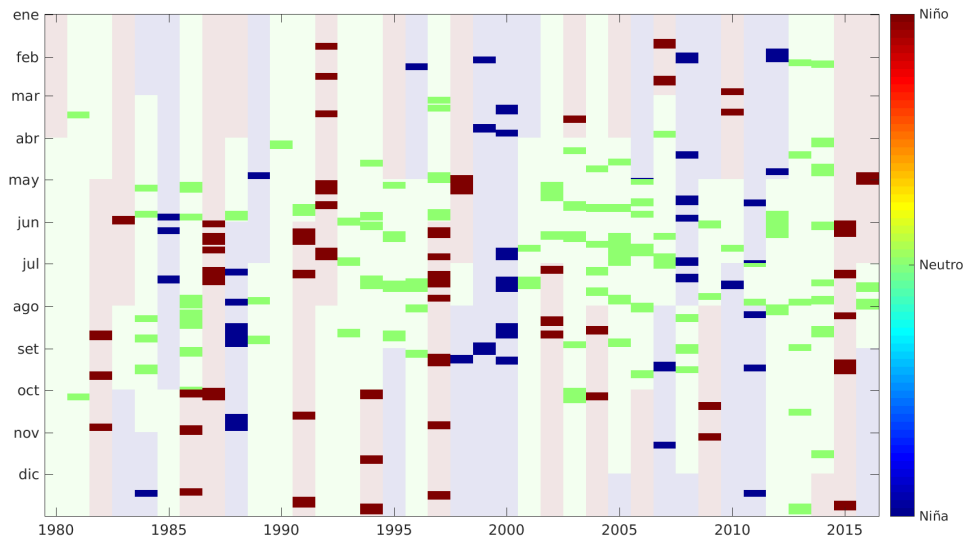
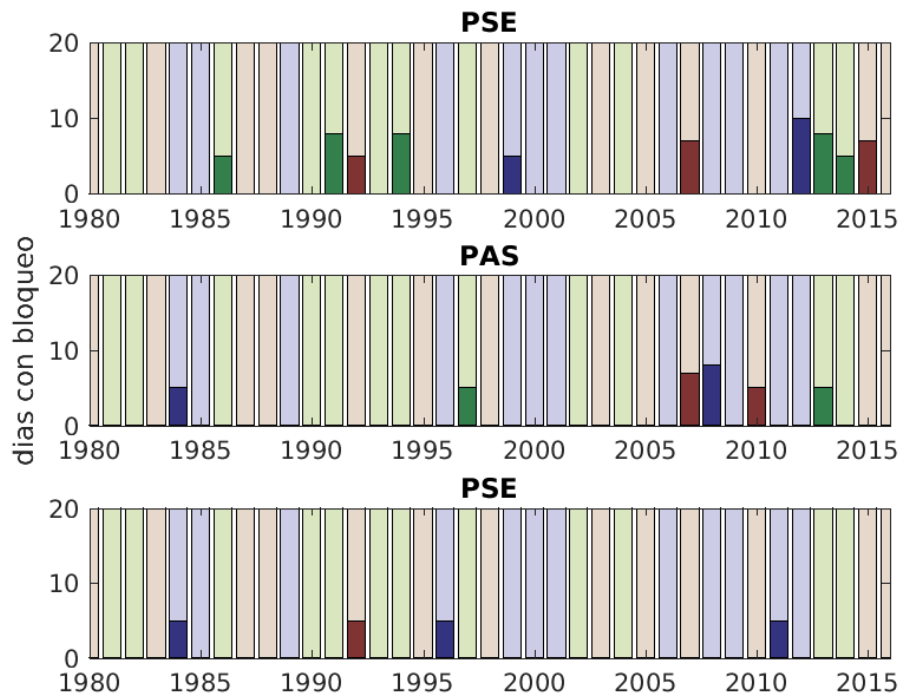
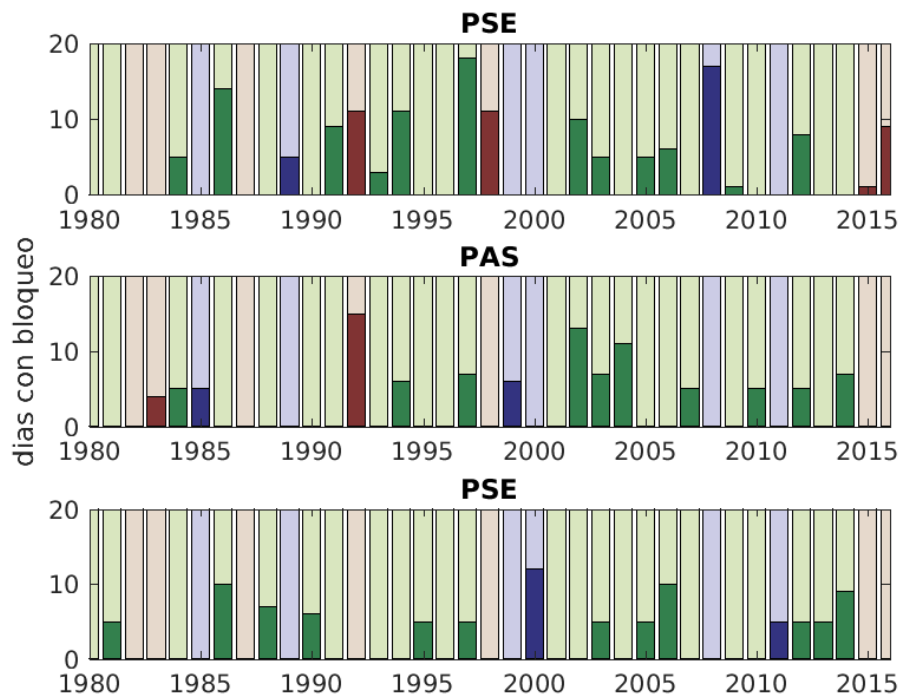


Figura 9: Clasificación de eventos según si ocurrió en período de trimestre Niño (color rojo), trimestre Niña (color azul) o trimestre neutro (color verde).

Mediante un test chi-cuadrado se estudió la hipótesis nula de que los eventos de bloqueos en cada región fueran independientes a los eventos Niña/Niño. Se estudia cada región por separado aplicando el test a cada una. El valor crítico del estadístico de prueba que determina la región de rechazo de la hipótesis nula depende por un lado de los grados de libertad del sistema y por otro de la probabilidad de aceptación que elegimos como 95%. De acuerdo a la tabla de la distribución chi-cuadrado, este valor crítico corresponde a 7,81.

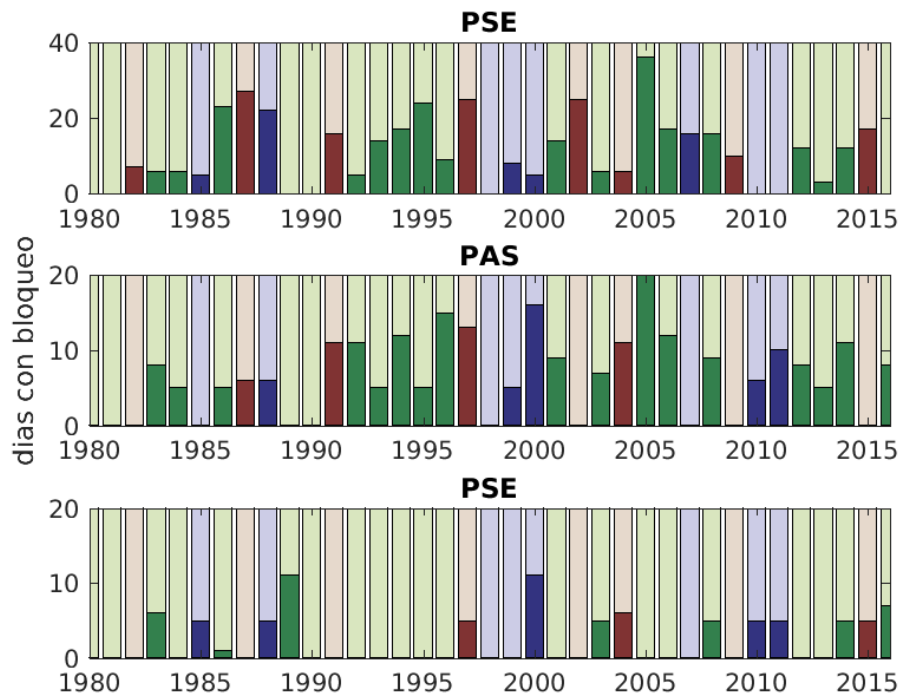


(a) verano

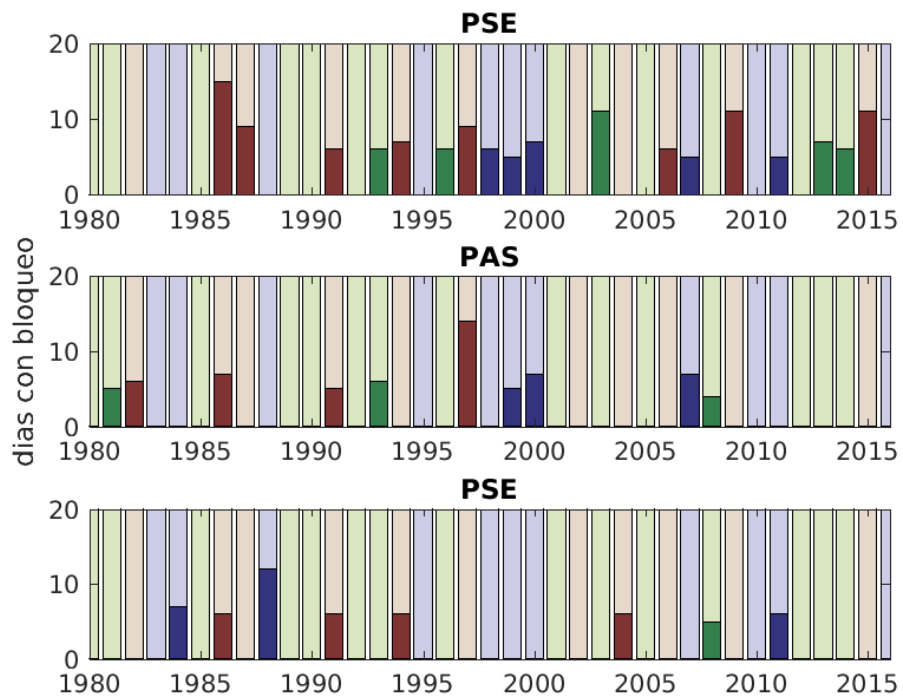


(b) otoño

Figura 10: Días con bloqueos por año según índice ONI para (a) DEF y (b) MAM. Verde: neutro. Rojo: año Niño. Azul: año Niña.



(a) invierno



(b) primavera

Figura 11: Días con bloqueos por año según índice ONI para (a) JJA y (b) SON. Verde: neutro. Rojo: año Niño. Azul: año Niña.

El valor del estadístico de prueba de chi-cuadrado para las tres regiones se presenta en la Tabla 8. El test para las regiones PSE y PAS es igual a 5,65 y 3,86 respectivamente. Como estos valores se encuentran en la región de no rechazo de la hipótesis nula, no se puede descartar que haya independencia con las ocurrencias. Por otro lado, para la región ATS el estadístico toma el valor de 14,41 que es mayor que 7,81 el valor crítico del estadístico de la prueba chi-cuadrado, por lo cual aceptamos la hipótesis alternativa de que la ocurrencia de bloqueos está influenciada por los eventos Niño o Niña en la región ATS. Por lo tanto, podemos afirmar que en la región ATS durante años Niña ocurren más bloqueos.

Valor crítico	PSE	PAS	ATS
7,81	5,65	3,86	14,41

Tabla 8: Valores de la prueba estadística chi-cuadrado para testar independencia con años Niña y Niño.

3.2. Caracterización climática

Previo a presentar la estructura típica de bloqueos atmosféricos se muestra el valor medio de los campos para tener referencia base al momento de analizar las anomalías. Se estudia también la autocorrelación de cada variable (temperatura y precipitación) para considerar en el test estadístico a utilizar.

3.2.1. Campos medios de altura de geopotencial, temperatura y precipitación

Se muestra el campo medio de z500 para conocer su distribución promedio clasificado por estación del año en la Figura 12. Por ser un promedio global climático, y depender la altura de geopotencial directamente de la temperatura, es de esperar que la altura de geopotencial decrezca hacia latitudes más altas en términos geográficos y desde el punto de vista estacional que decrezca en un mismo sitio para los meses más fríos.

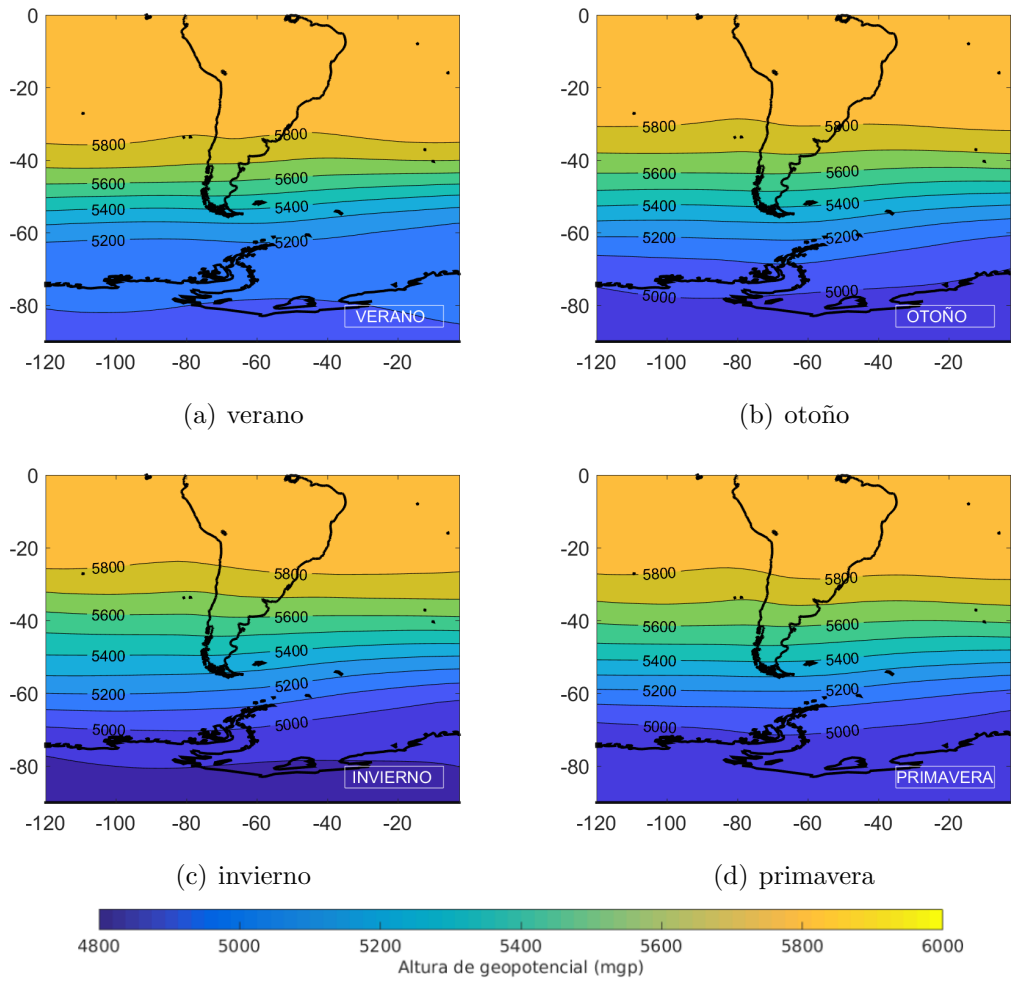


Figura 12: Altura de geopotencial media para el período 1980-2016. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Para poder interpretar los composites de anomalías para la ocurrencia de los eventos en las distintas estaciones del año se muestran los valores medios que caracterizan T_x , T_n y la precipitación. Para el caso de la temperatura las Figuras 13 y 14 muestran las temperaturas máximas y mínimas promediadas por estación durante el período (1980-2014). Para la temperatura máxima estacional se obtiene un crecimiento en el sentido noroeste en las cuatro estaciones, mientras que la temperatura mínima muestra crecimiento hacia el norte. Ambas variables reflejan que el norte del país posee temperaturas más elevadas durante todo el año en comparación a la región costera.

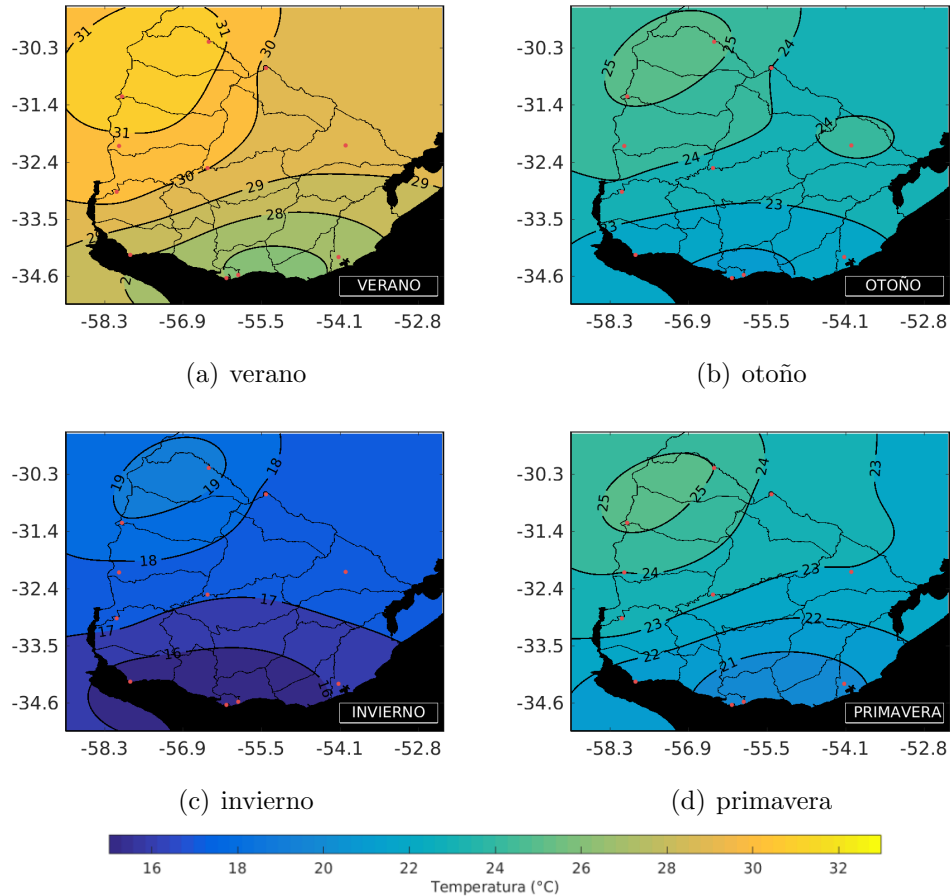


Figura 13: Temperatura máxima diaria durante el período 1980-2014. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

La precipitación media acumulada por trimestre en mm se muestra en la Figura 15, donde los valores medios son obtenidos en base al período 1998-2015. Durante los meses de primavera, verano y otoño se observa que la distribución de precipitación acumulada al norte y al sur del país es desigual, disminuyendo la cantidad acumulada hacia el sur de Uruguay. Por otro lado, durante los meses de invierno máximos (mínimos) de precipitación tienen lugar al este (oeste) de nuestro país. El promedio trimestral de precipitación acumulada es de 350 mm, aproximadamente, con valores algo por encima de los 400 mm desde setiembre a mayo en el norte de Uruguay y por debajo de los 300 mm en el litoral oeste del país entre junio, julio y agosto.

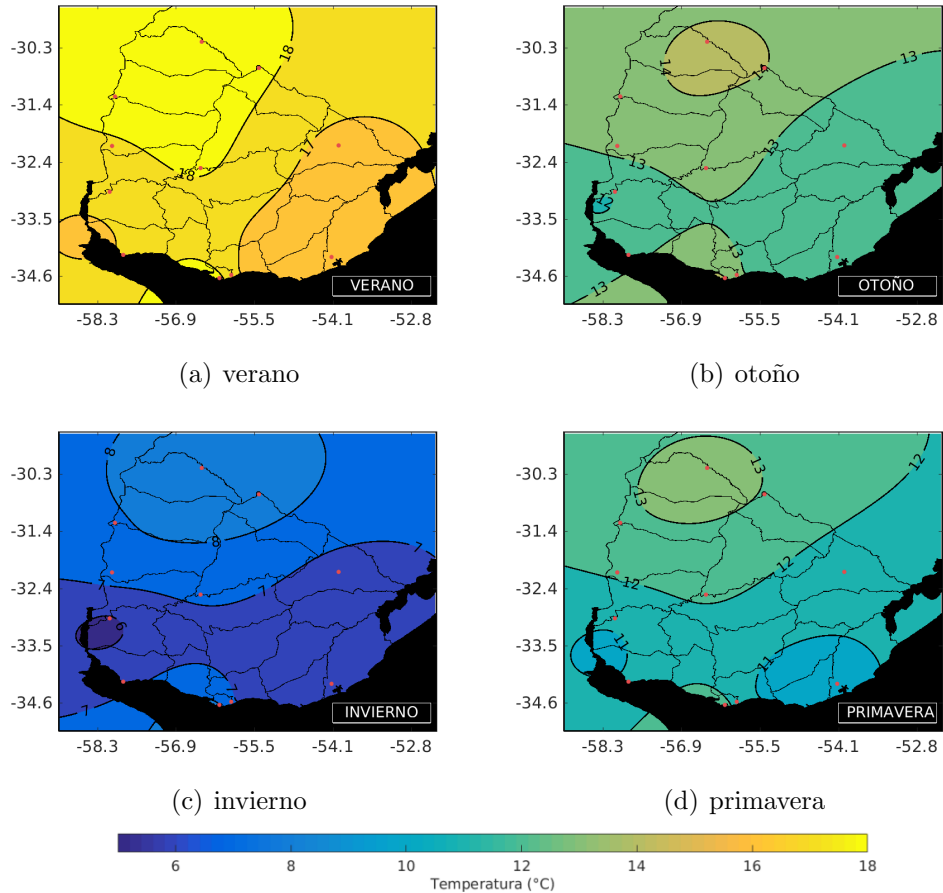


Figura 14: Temperatura mínima diaria durante el período 1980-2014. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

3.2.2. Autocorrelación en temperatura máxima, mínima y precipitación

Para evaluar la significancia estadística de las anomalías para cada variable durante los días con bloqueos se aplicó el test de medias de Student con un nivel de significancia de 95 % tanto para temperatura como para precipitación. La correlación para la temperatura entre un día y el día siguiente se muestra en la Tabla 9. Los valores de autocorrelación son altos, manteniéndose mayores a 0.5 en todas las estaciones en T_x y T_n . Por lo tanto, la temperatura máxima (mínima) diaria entre un día y el siguiente está relacionada y el test de Student que se aplica para T_x (T_n) es el test para muestras dependientes.

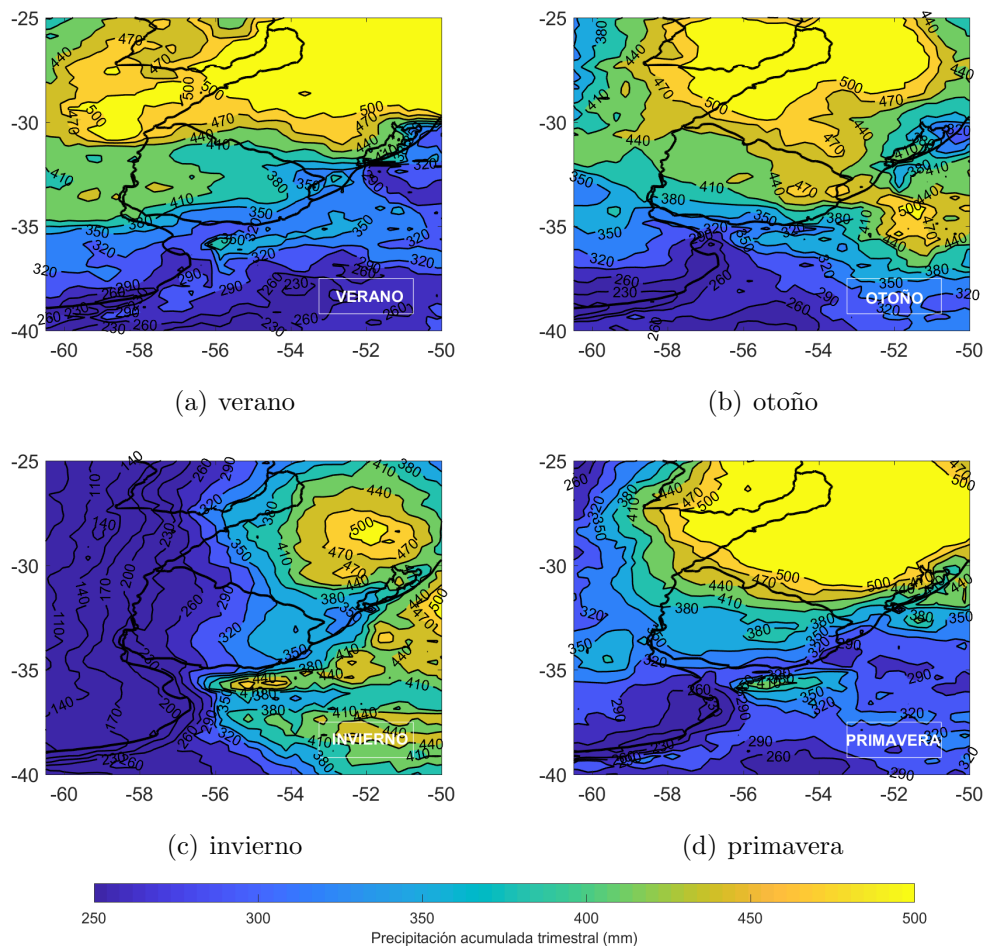


Figura 15: Precipitación diaria media durante el período 1998-20154. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

EST	RIV	ART	SAL	PAY	PDT	MEL	MER	EST	PRA	CAR	ROC
TX	0.59	0.62	0.60	0.60	0.59	0.58	0.61	0.58	0.56	0.52	0.53
TN	0.66	0.69	0.67	0.66	0.65	0.63	0.63	0.66	0.54	0.56	0.53

Tabla 9: Autocorrelación a un día para temperatura máxima y mínima.

Para el caso de precipitación, el mapa de correlación entre un día y el siguiente en la Figura 16 muestra que la autocorrelación a un día se encuentra alrededor de 0,1, siendo despreciable. Por lo tanto, el test de student para la precipitación se realiza para muestras independientes.

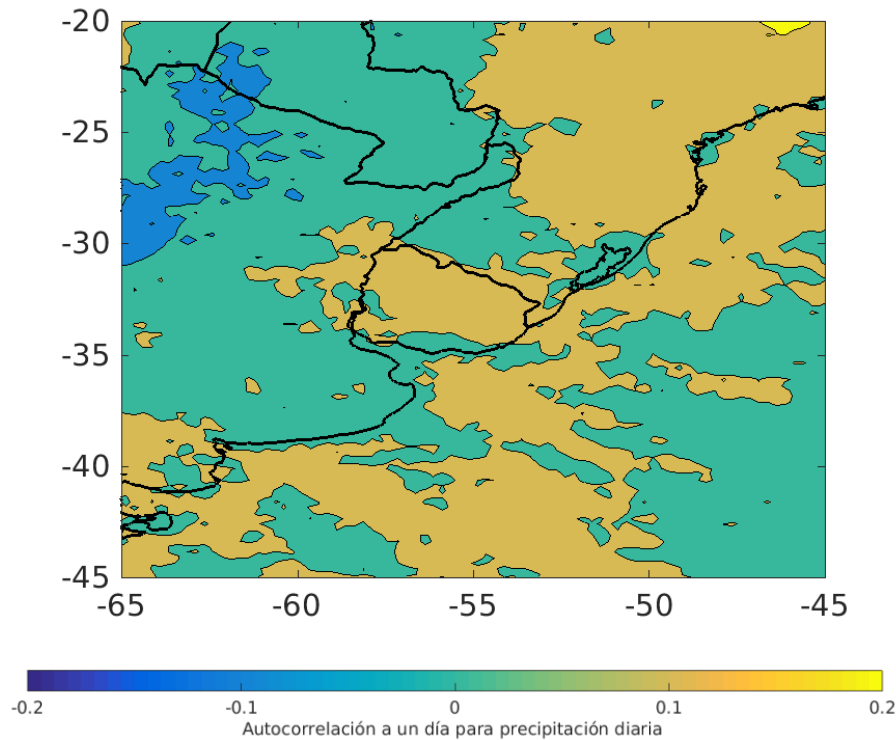


Figura 16: Autocorrelación a un día para la precipitación.

3.2.3. Porcentaje de días con bloqueos representados con temperatura y precipitación

Dado que los datos de precipitación y de temperatura máxima y mínima utilizados en este trabajo no abarcan el total del período utilizado para identificar bloqueos, los composites mostrados en las siguientes subsecciones no van a representar la totalidad de los eventos. En la tabla 10 se presentan estos porcentajes respecto al total de los días identificados por sector y por estación para cada variable. Como los datos TRMM están disponibles a partir de 1998, la influencia de los bloqueos en la precipitación solo va a estar representado por aproximadamente la segunda mitad de los eventos identificados.

	Temperatura (%)				Precipitación (%)			
	ver	oto	inv	pri	ver	oto	inv	pri
PSE	89.7	93.3	95.8	92.0	51.5	42.3	45.5	50.0
PAS	100	100	96.7	100	71.4	58.4	54.0	34.8
ATS	100	100	86.2	100	25.0	59.6	48.3	31.5

Tabla 10: Proporción de días total identificados con bloqueos representados en los composites de temperatura (máxima y mínima) y precipitación.

3.3. Bloqueos en la región PSE

En esta sección y las dos próximas se presentan los composites por sector y por estación del año de anomalías de altura de geopotencial mostrando la estructura media de los bloqueos según su región de ocurrencia. Se presentan además los composites de anomalías de temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y precipitación para los días identificados con eventos de bloqueo. En estas figuras se presentan los composites de anomalías en contornos y los valores donde dichas anomalías son estadísticamente significativas se muestran en colores.

Los composites de z_{500} para los bloqueos ocurridos en la región PSE se muestran en la Figura 17, donde se observa una clara deformación de las isocintas de z_{500} respecto a su valor promedio mostrado en 12.

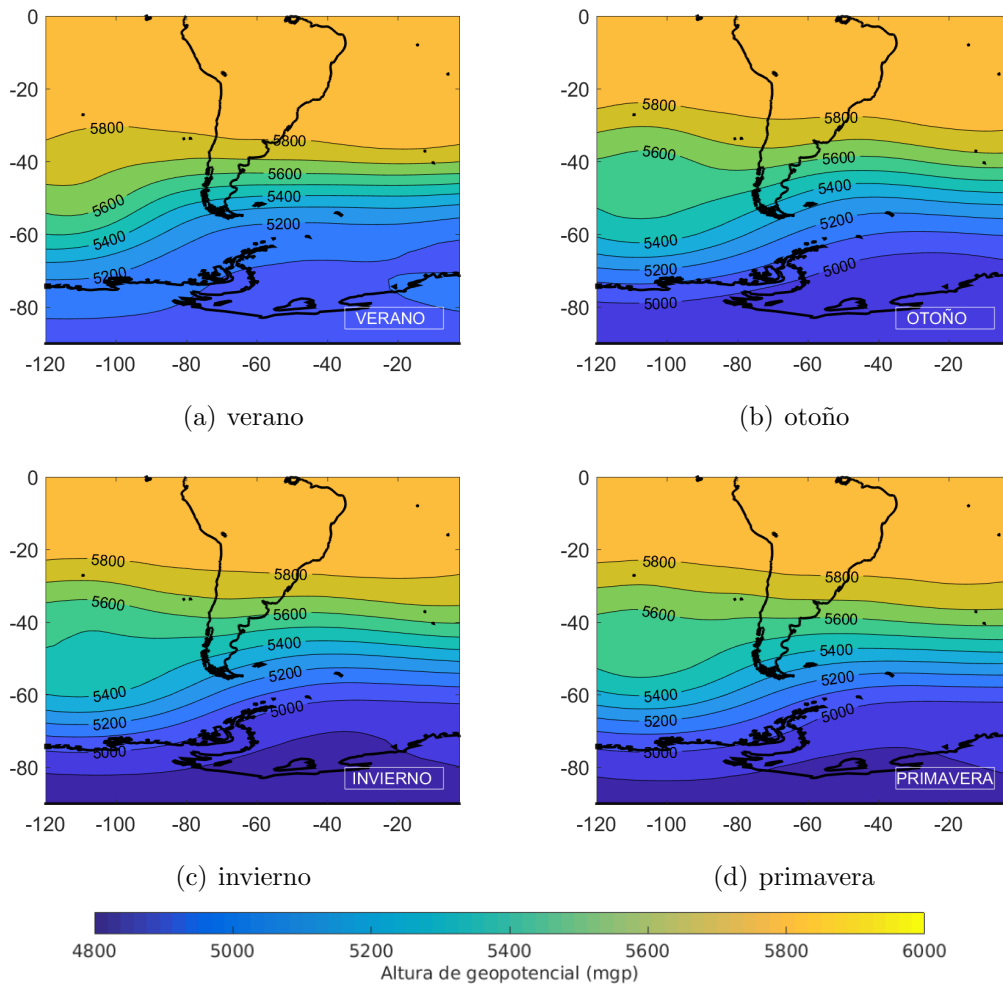


Figura 17: Composite de altura de geopotencial en 500 mb para bloqueos en la región PSE. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

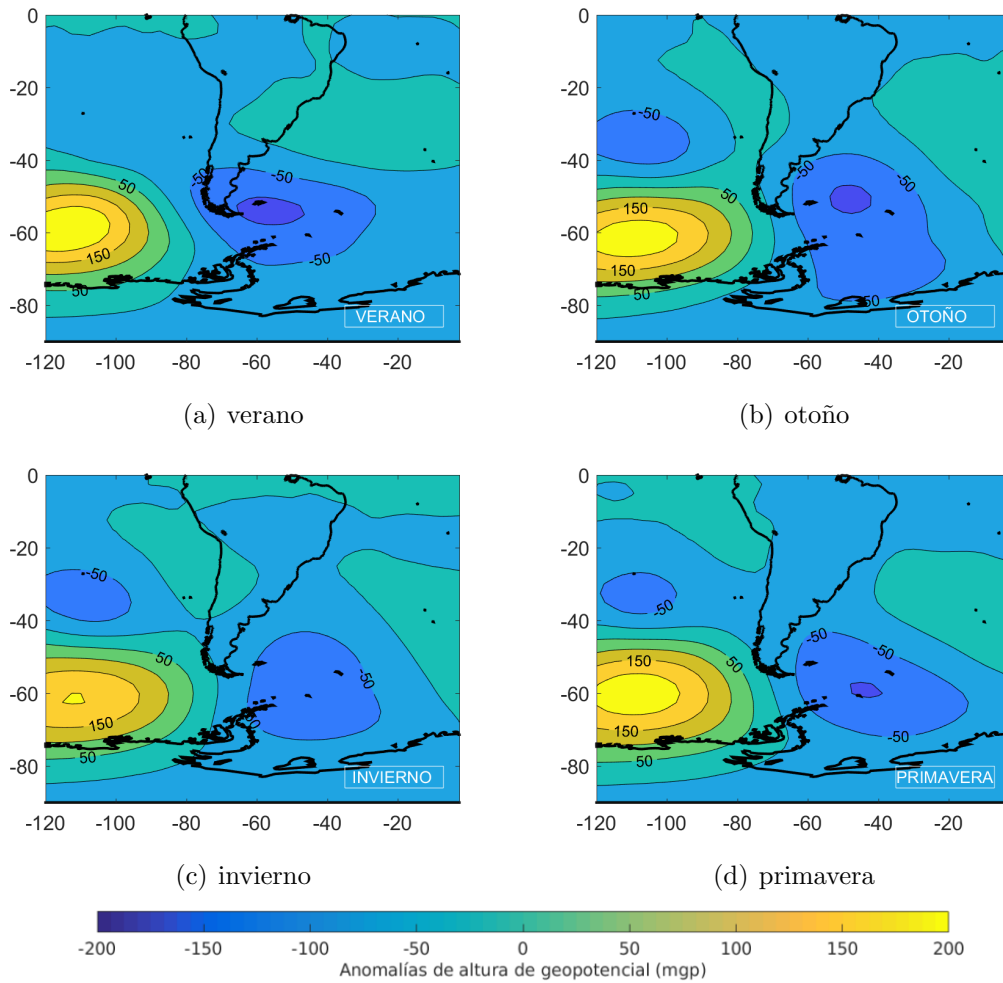


Figura 18: Composite de anomalía de altura de geopotencial en 500 mb para bloqueos en la región PSE. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

En la Figura 18 las anomalías de z_{500} , donde se destaca la presencia bien marcada del centro de circulación anticiclónica acompañada de al menos una región de circulación ciclónica. En particular para los eventos ocurridos en la región PSE se observa que la anomalía de alta presión está acompañada por una baja presión posicionada en el flanco ecuatorial y por otra baja situada al este de ella, que parece más intensa que la primera excepto en verano. Además, a lo largo del año prácticamente no hay variaciones en la posición de este sistema, aunque se observa un pequeño corrimiento de toda la configuración hacia el oeste durante el verano.

Las anomalías estacionales en los campos de precipitación y temperatura (máxima y mínima) durante los eventos de bloqueo en la región PSE aparecen representados en las Figuras 21, 19 y 20 respectivamente.

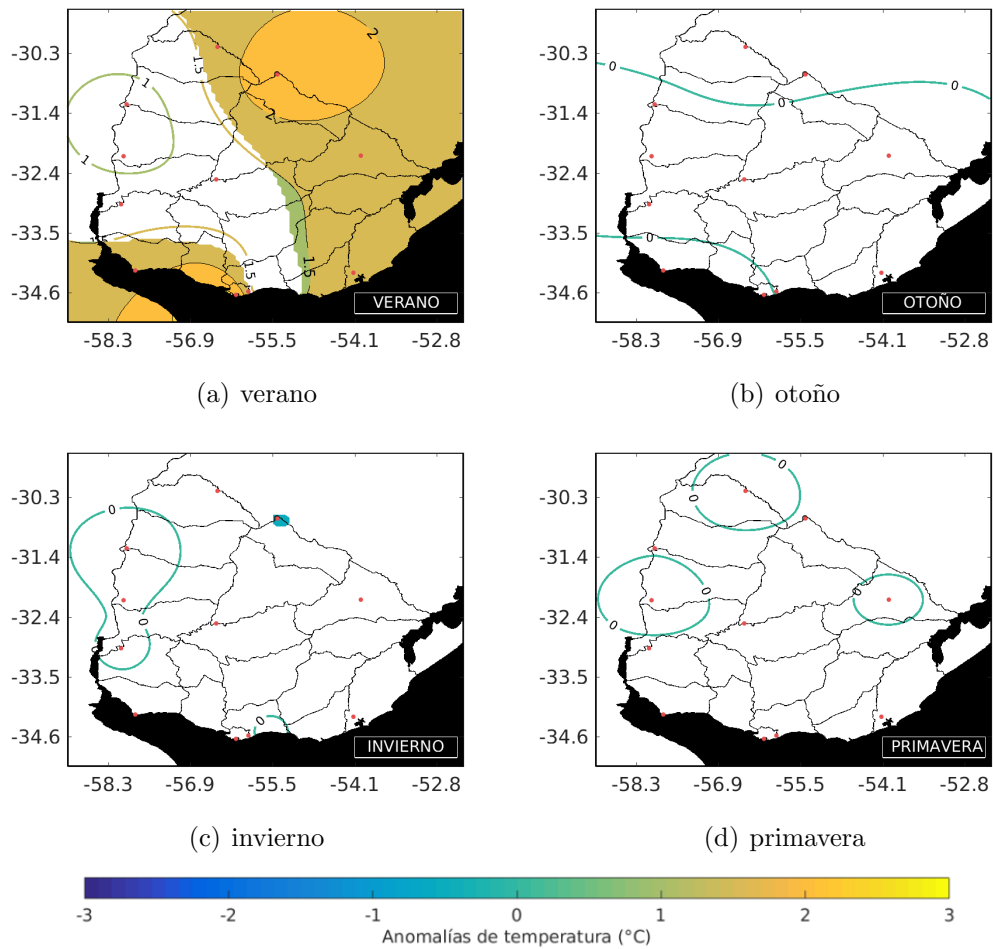


Figura 19: Composites de anomalía de temperatura máxima para bloqueos en la región PSE. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

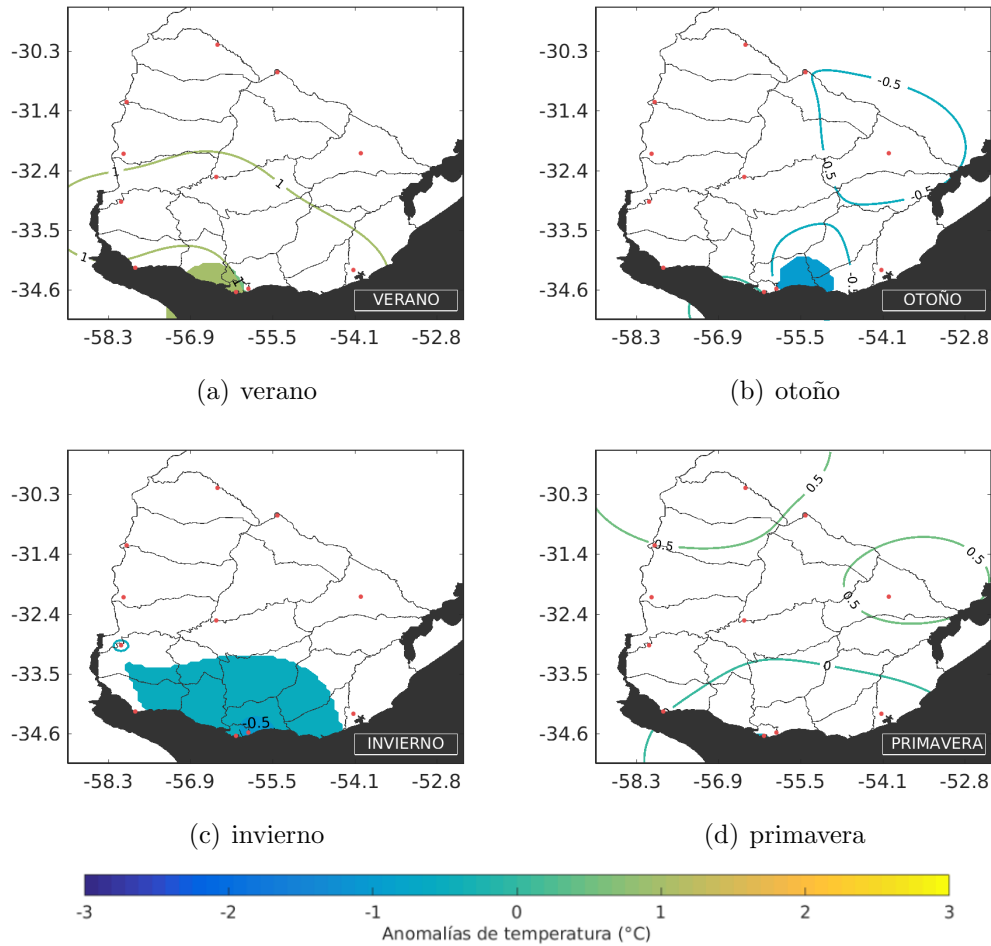


Figura 20: Composites de anomalía de temperatura mínima para bloqueos en la región PSE. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Como se puede ver, en verano, las T_x presentan anomalías estadísticamente significativas y de hasta $+2^\circ\text{C}$ en el litoral con Brasil y la costa Suroeste. Durante el invierno, por su parte, las T_n muestran anomalías estadísticamente significativas en la región su costera de Uruguay, llegando a ser de hasta $-0,5^\circ\text{C}$. Para el resto de las estaciones, las anomalías en T_x y T_n son casi despreciables y no estadísticamente significativo. Respecto a la precipitación, di bien presenta anomalías son muy pequeñas, no se encuentran valores estadísticamente significativos en ninguna estación del año para Uruguay.

La poca influencia que los bloqueos en PSE presentan sobre Uruguay podría explicarse, quizás, por la lejanía que, tanto el anticiclón anómalo del Pacífico Sur como la baja anómala del Atlántico Sur, presentan con respecto a nuestro país. Estos resultados se encuentran en acuerdo con Mendes et al. (2008) y Kayano (1999). Por su parte, Alessandro (2014) mostró la existencia de anomalías estadísticamente significativas al sur de los -38° de latitud y sobre Argentina.

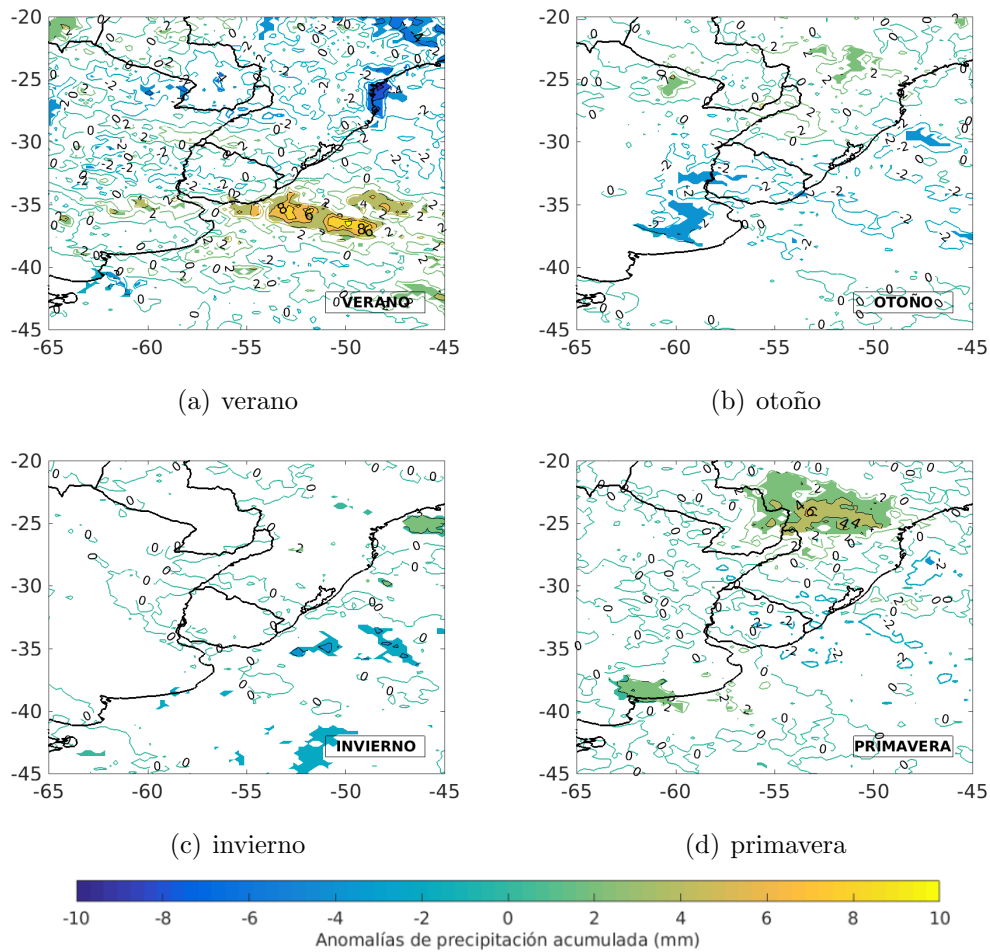


Figura 21: Composite de anomalía de precipitación para bloqueos en la región PSE. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

3.4. Bloqueos en la región PAS

Los composites de $z500$ y anomalías para los bloqueos ocurridos en la region PAS se muestran en la Figuras 22 y 23, respectivamente. Los eventos identificados en esta región muestran menor intensidad y extensión espacial durante el verano que durante la primavera. Al comparar las Figuras 19(a) con 19(c), lo que correspondería a invierno y primavera, el patrón espacial de $z500$ es muy similar. En ellos, la anomalía positiva de altura de geopotencial es acompañada al norte y al este por anomalías negativas de altura de geopotencial, siendo esta última de mayor extensión espacial. En verano y otoño la anomalía negativa situada al norte es inexistente.

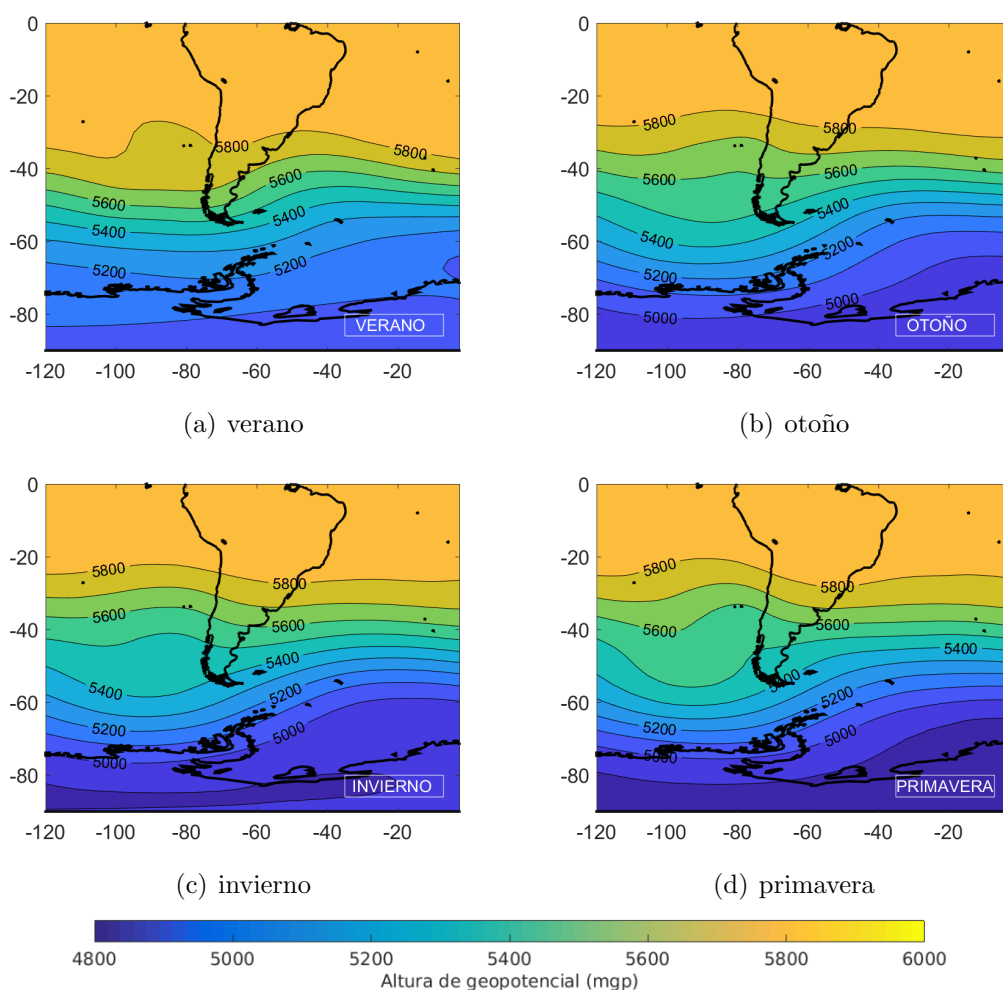


Figura 22: Composite de altura de geopotencial para bloqueos en la región PAS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

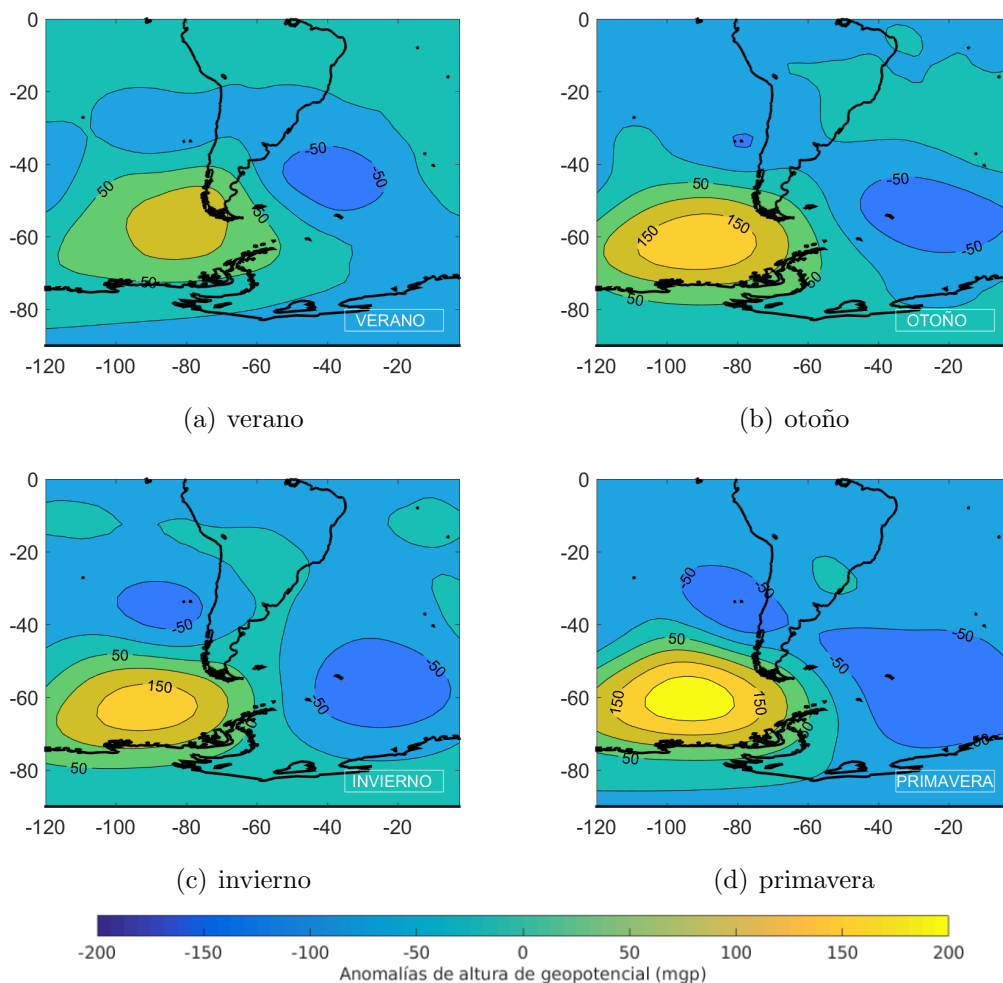


Figura 23: Composite de anomalía de altura de geopotencial para bloqueos en la región PAS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Las anomalías respecto a la media estacional en temperatura máxima, mínima y precipitación asociados a estos eventos de bloqueos se muestran en las Figuras 24, 25 y 26, respectivamente. Los bloqueos ocurridos muestran impactos opuestos en verano e invierno, tanto en temperatura como en precipitación, como se observa al comparar los paneles (a) y (c) de las Figuras 24, 25 y 26. Por un lado en verano parece ocurrir un déficit en la precipitación sobre Uruguay, siendo estadísticamente significativo en gran parte del territorio. Las temperaturas máximas y mínimas son significativas en casi todo el territorio y se encuentran -2.5°C por debajo de la media en todo el país. Por otro lado, durante el invierno se observan anomalías estadísticamente significativas y positivas de hasta 2°C en todo el país. Las mismas se observan tanto en temperatura máxima como mínima. Sobre la costa sureste uruguaya, la precipitación es por encima de lo normal y estadísticamente significativa. Durante

otoño ocurre precipitación estadísticamente significativa por encima de la media entre la banda de latitudes 30°S a 40°S, donde se estiman anomalías de hasta 8 mm diarios en el suroeste de nuestro país y temperatura mínima de hasta 2.5°C por encima de lo normal. En primavera en Uruguay, si bien las temperaturas máximas son entre 1.5 y 2°C por encima de lo normal no son significativas, las temperaturas mínimas son apenas negativas siendo únicamente significativas en la costa sureste. La precipitación no parece verse afectada por bloqueos ocurridos en primavera en la región PAS.

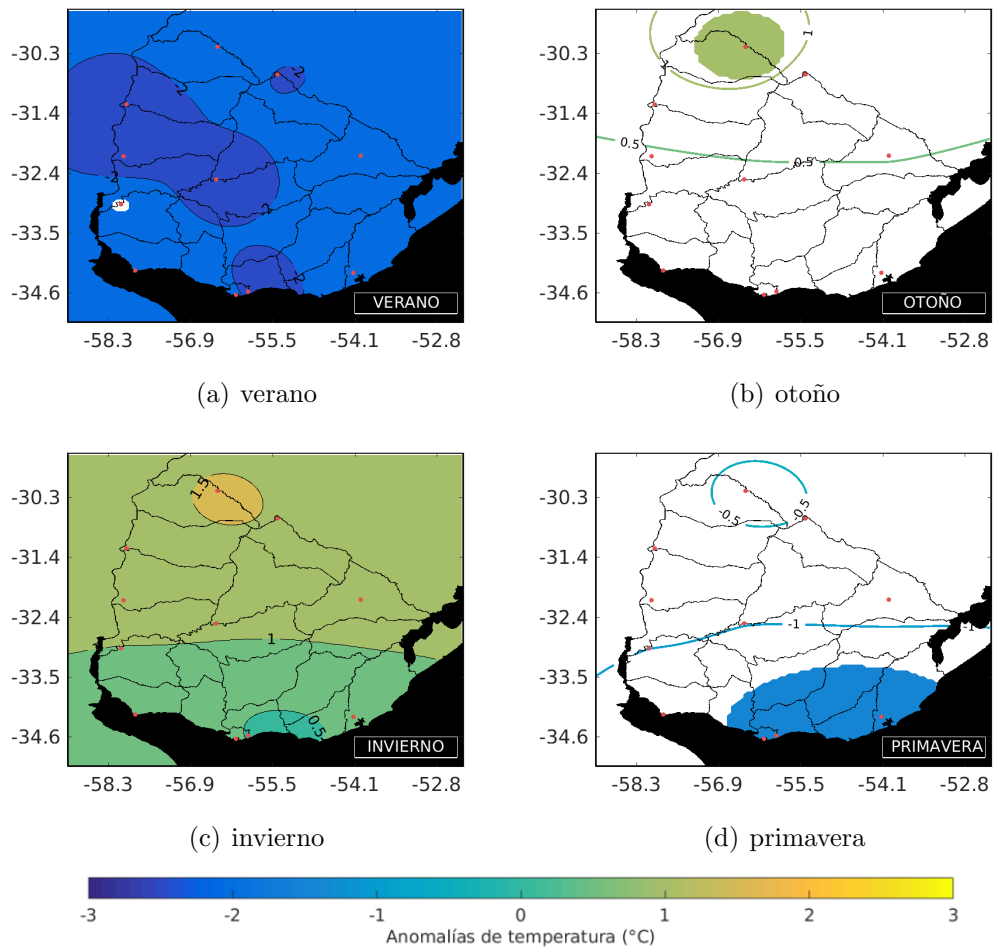


Figura 24: Composites de anomalía de temperatura máxima para bloqueos en la región PAS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

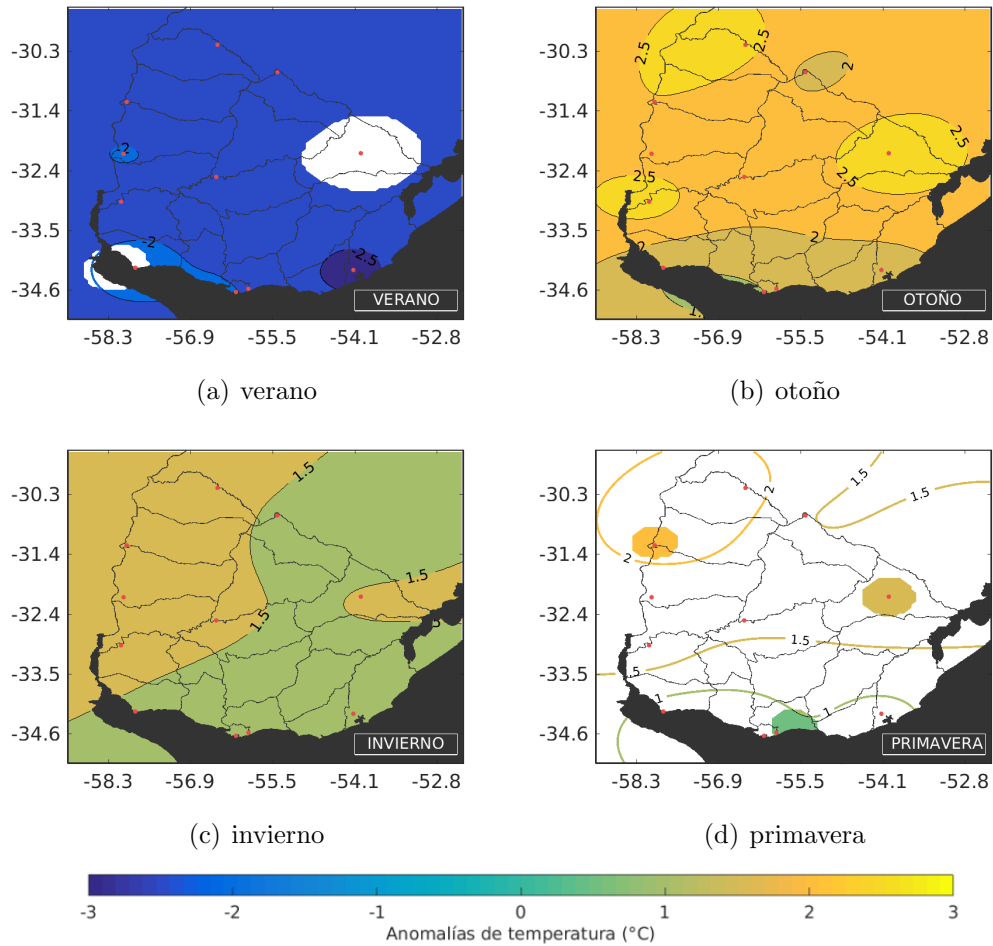


Figura 25: Composites de anomalía de temperatura mínima para bloqueos en la región PAS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Según Mendes et al. (2008), la ocurrencia de anomalías positivas de temperatura en meses fríos podría explicarse por la situación estacionaria de la alta (baja) presión al oeste (este) del continente sudamericano, que advectan aire frío al sur del continente (al sur de 55°S) impidiendo el desplazamiento de frentes fríos hacia nuestras latitudes, lo cual favorece la ocurrencia de anomalías positivas de temperaturas. Los mismos autores también sugieren que las anomalías negativas observadas en verano podrían deberse a condiciones de cobertura nubosa.

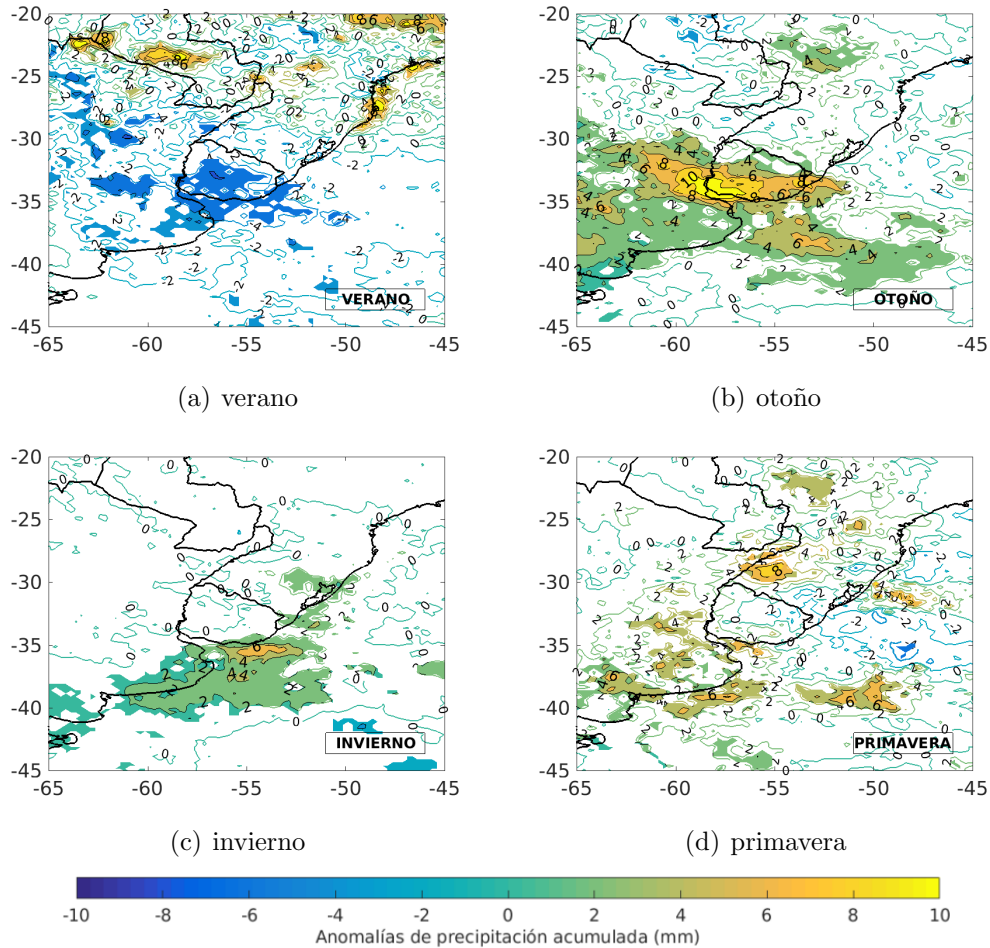


Figura 26: Composite de anomalía de precipitación para bloqueos en la región PAS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

3.5. Bloqueos en la región ATS

Los composites de $z500$ y de anomalía de $z500$ para los bloqueos ocurridos en la región ATS se muestran en la Figuras 27 y 28, respectivamente. En todas las estaciones se identifica la alta presión al sureste del continente. De manera similar a los eventos de verano en la región PSE, en ATS se encuentran desplazados un poco más hacia el oeste en comparación a las demás épocas del año. Por otro lado, las anomalías negativas de altura de geopotencial asociadas al patrón dipolo no están tan definidas en esta región en comparación a las anteriores. El patrón dipolo durante los meses de verano e invierno presenta una estructura similar donde se observa una pequeña anomalía negativa de altura de geopotencial situada sobre Uruguay. Esta anomalía se observa sobre la costa uruguaya durante otoño, época en la cual los eventos parecen tener una mayor extensión espacial abarcando toda la región ATS

y parte de PAS. En general, los bloqueos atmosféricos ocurridos en la región ATS se caracterizan por un patrón espacial de z_{500} que presenta una mayor variabilidad interestacional. Del mismo modo, en comparación con los bloqueos en PSE y PAS, el anticiclón extratropical (en este caso) ubicado al sureste de Sudamérica parece tener una mayor extensión espacial. Este resultado podría estar relacionado con el hecho de que en la región ATS el anticiclón dispone de una mayor extensión longitudinal donde poder desenvolverse.

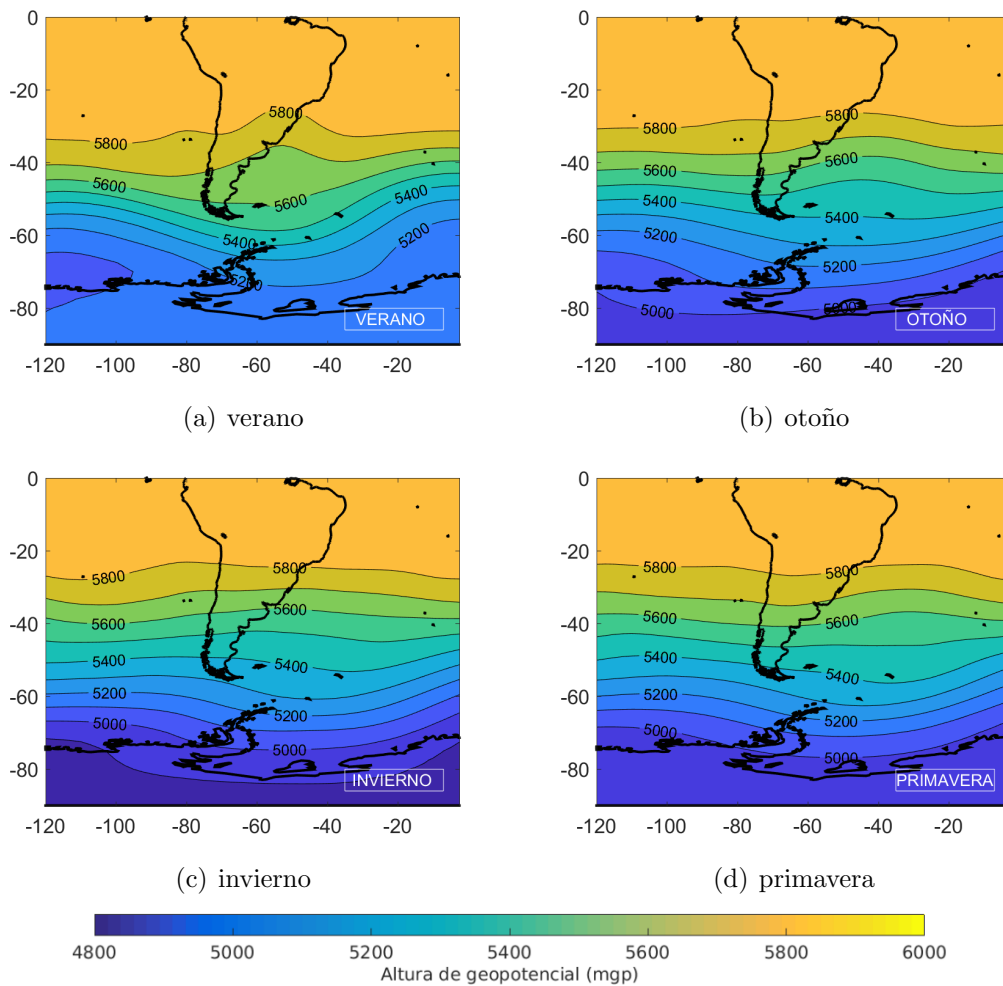


Figura 27: Composite de altura de geopotencial para bloqueos en la región ATS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

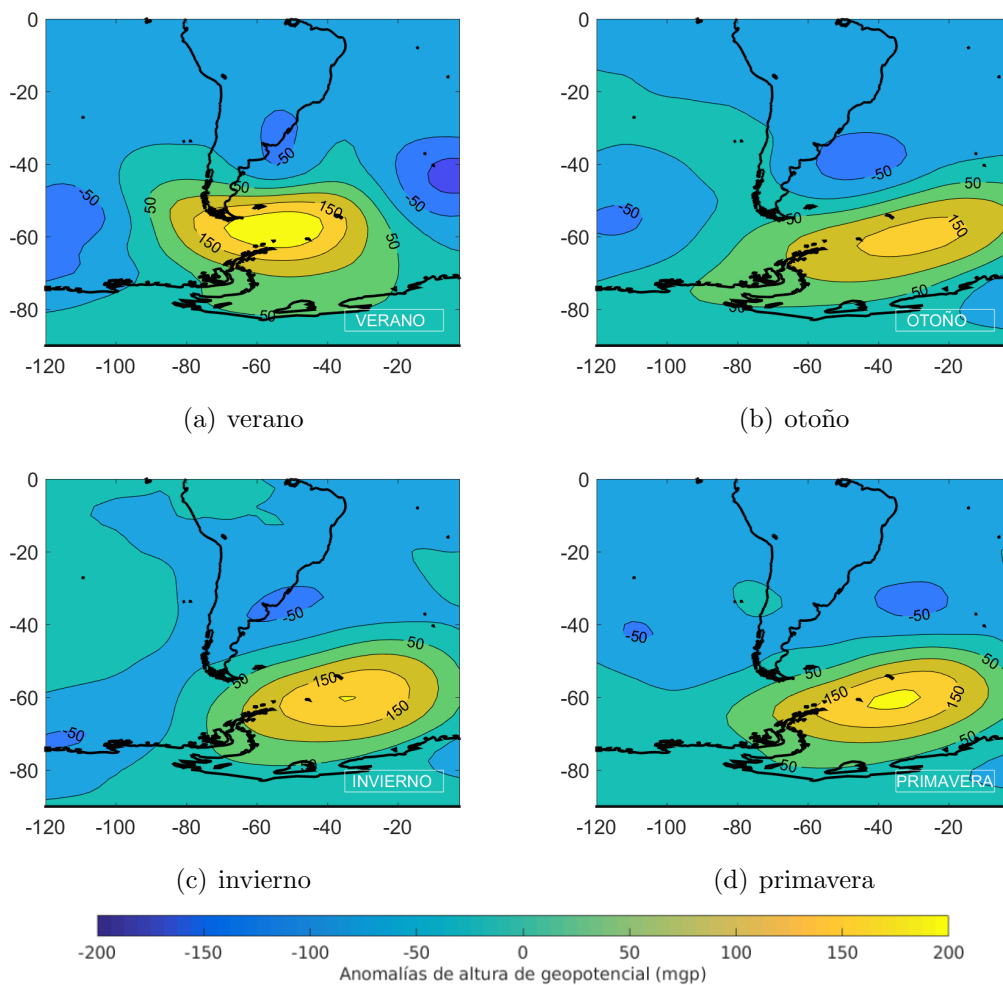


Figura 28: Composite de anomalía de altura de geopotencial para bloqueos en la región ATS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

Las anomalías respecto a la media estacional en temperatura máxima y mínima y precipitación durante eventos de bloqueos en la región ATS se muestran en las Figuras 29, 30 y 31, respectivamente. Estos bloqueos producen una caída en la temperatura para todo el país de al menos 1°C y durante todo el año. En particular, durante los meses de otoño, estos valores medios de $-2,5^{\circ}\text{C}$ son estadísticamente significativos para todo el país en la mínima y la máxima. En otoño la circulación ciclónica está ubicada de tal forma que genera vientos del sur anómalos sobre Uruguay, lo cual parece ser la causa del enfriamiento observado ya que esto no ocurre en los otros meses. A su vez durante otoño se registra un déficit en las precipitaciones sobre Uruguay.

El resto del año no ocurren impactos significativos en la precipitación sobre nuestro país, aunque en verano al este de Uruguay sobre el Océano Atlántico se observa un acumulado de precipitación significativo y en primavera anomalías negativas al noreste sobre el estado brasilero de Río Grande do Sul.

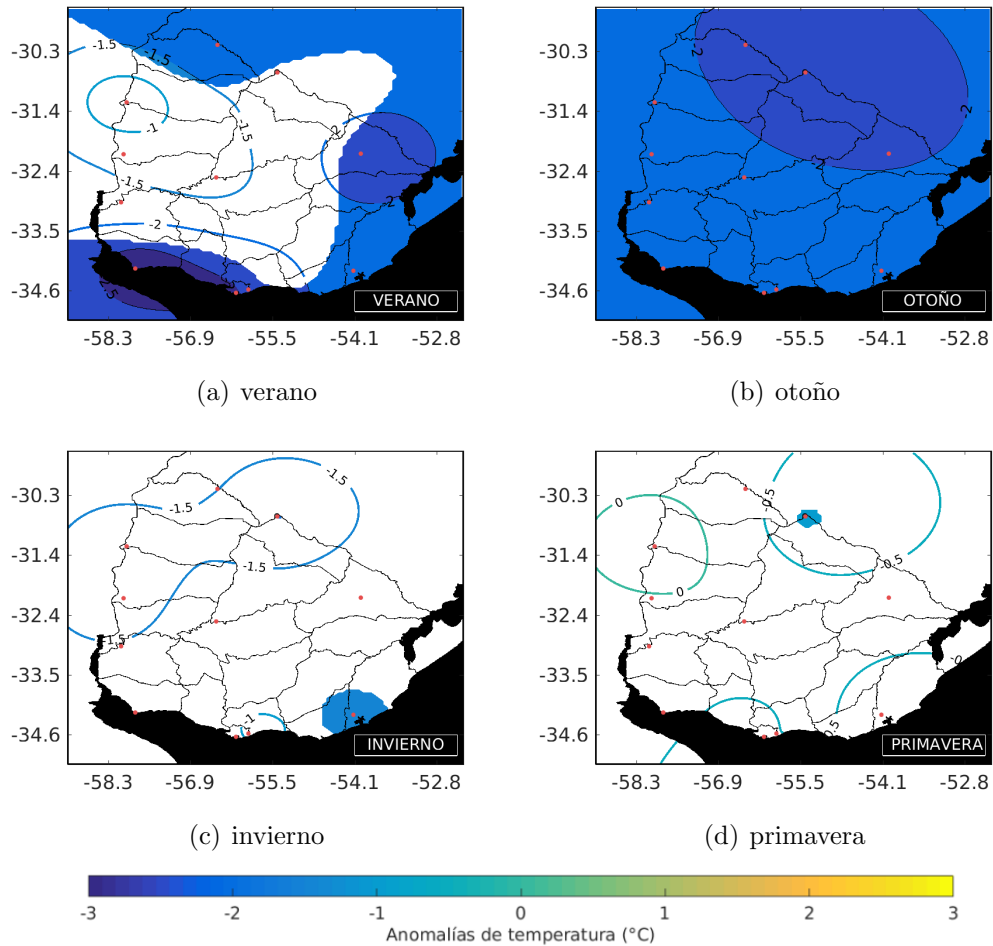


Figura 29: Composites de anomalía de temperatura máxima para bloqueos en la región ATS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

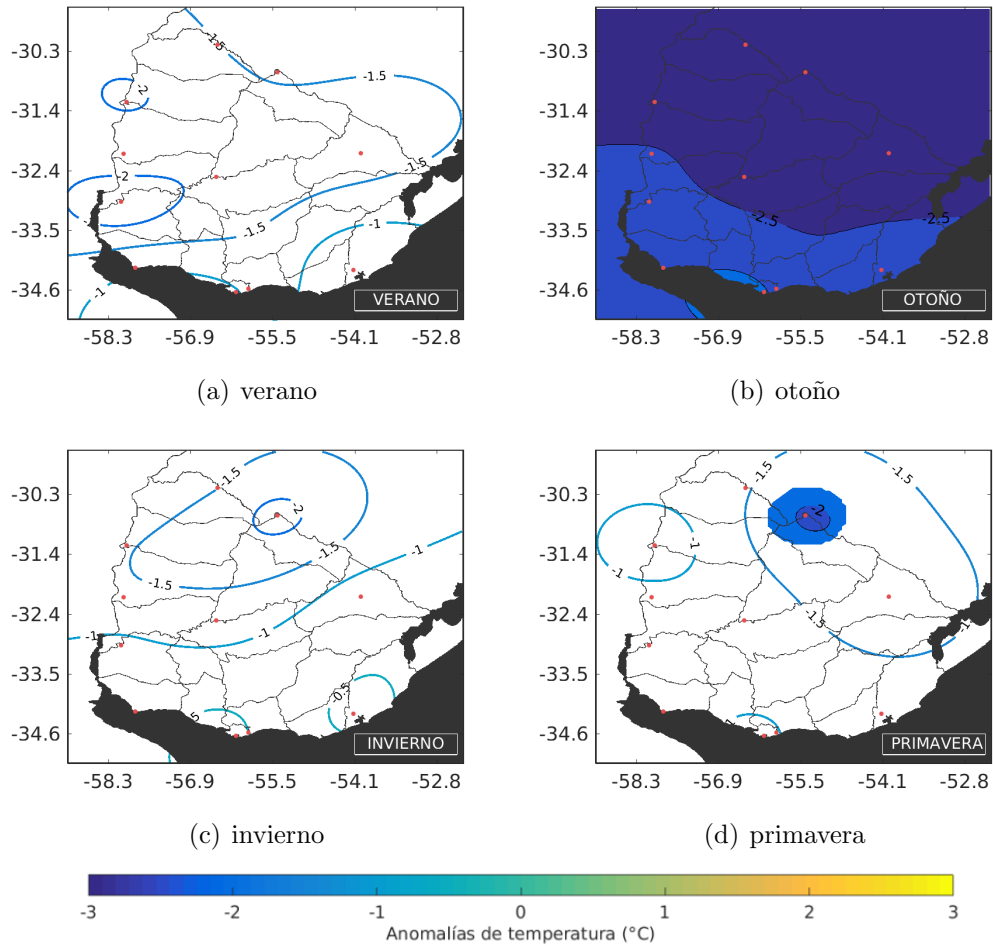


Figura 30: Composites de anomalía de temperatura mínima para bloqueos en la región ATS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

En Mendes et al. (2008), donde también se obtuvieron anomalías negativas de temperatura para la región ATS para otoño, invierno y primavera se sugirió que su causa es la posición de la baja presión asociada al patrón dipolo. Esta circulación ciclónica podría estar advectando aire frío a nuestra región para los meses de otoño por ser cuando las anomalías son estadísticamente significativas.

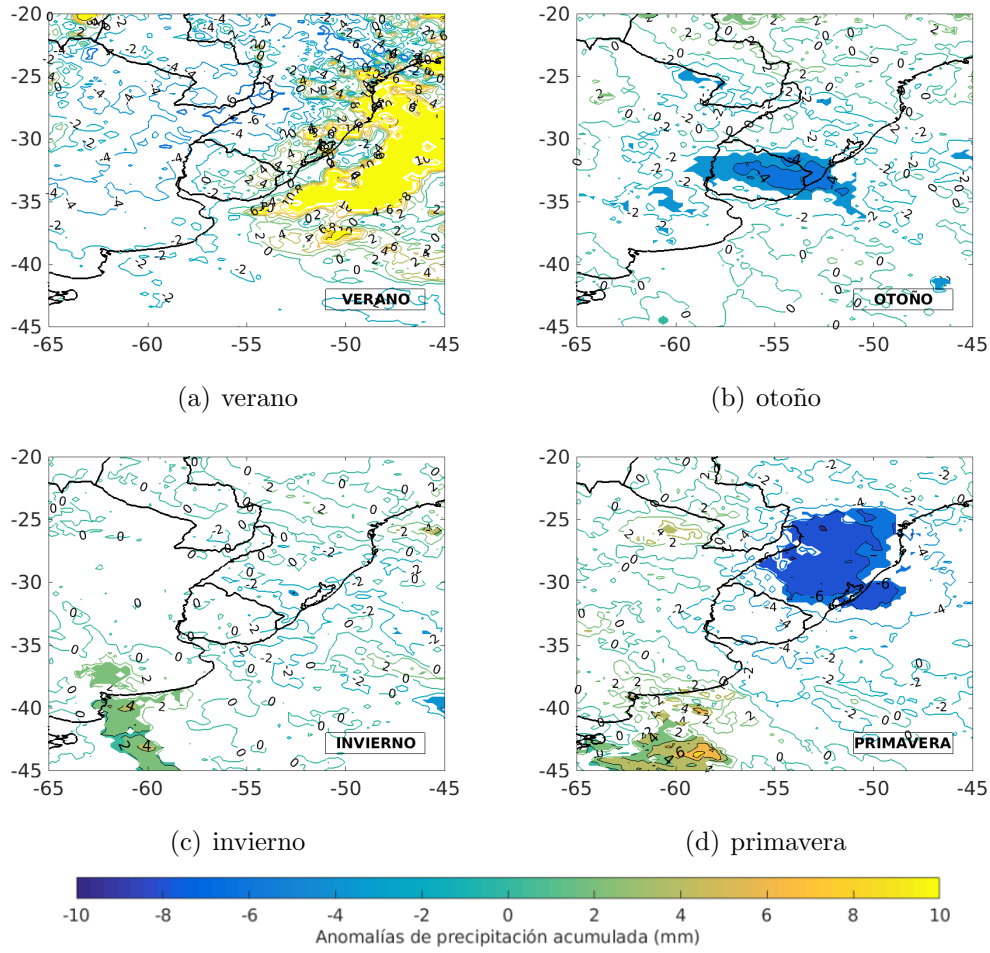


Figura 31: Composite de anomalía de precipitación para bloqueos en la región ATS. (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

4. Estudio de caso particular

Este capítulo presenta el análisis para un evento puntual ocurrido entre el 23 y el 27 de abril de 2012 en la región ATS. Este bloqueo corresponde a un evento de 5 días de duración ocurrido en la estación de otoño. De acuerdo a la caracterización descrita en el capítulo anterior, este tipo de eventos provocan un descenso de las temperaturas mínimas y máximas así como una disminución de las precipitaciones. En este caso particular se va a analizar el patrón de bloqueo desde dos días previo a su formación hasta dos días posteriores a su dispersión, así como la evolución en las temperaturas máximas y mínimas y su impacto en la precipitación.

4.1. Estructura de bloqueo

En las Figuras 32 y 33 se muestra el composite durante los 5 días de duración del evento para altura de geopotencial y anomalía de $z500$ respectivamente. Este evento, caracterizado como tipo dipolo, presenta la alta presión al sur del continente sudamericano y la baja presión al sureste de la costa uruguaya, como se observa de la Figura 32. La anomalía positiva de altura de geopotencial alcanza los $+250$ mgp, indicando un gran desvío respecto al valor medio para esa latitud en esa época del año (tal como se caracteriza en la Figura 12). Su extensión longitudinal va desde 80°W hasta 0°W , el límite del dominio. A su vez, se distingue la presencia de una anomalía negativa de altura de geopotencial al sureste de la costa uruguaya (con la que conforma el patrón dipolo), y otra (anomalía negativa) al oeste de la alta presión situada en altas latitudes. Este evento es algo más intenso en comparación a los eventos que caracterizan los bloqueos durante otoño en la región ATS.

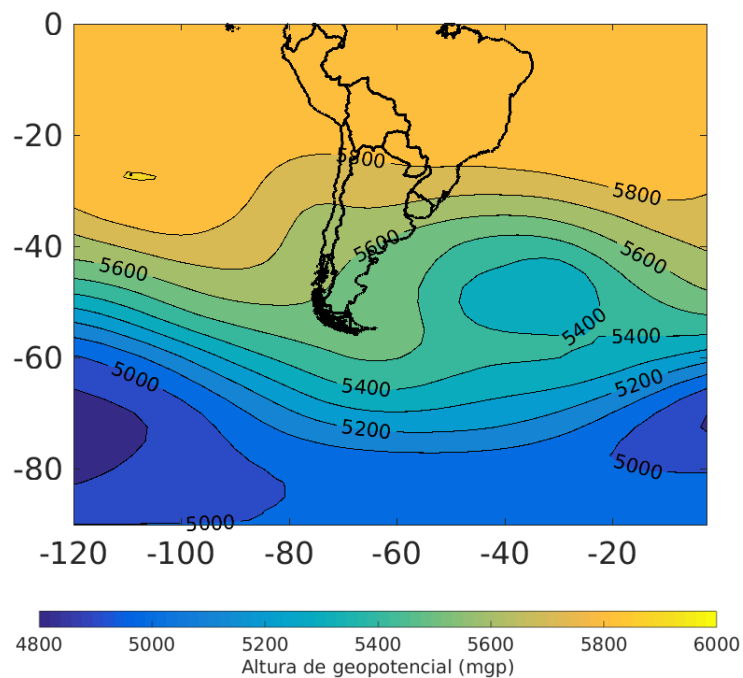


Figura 32: Composite de altura de geopotencial en 500 hPa durante evento de bloqueo en ATS

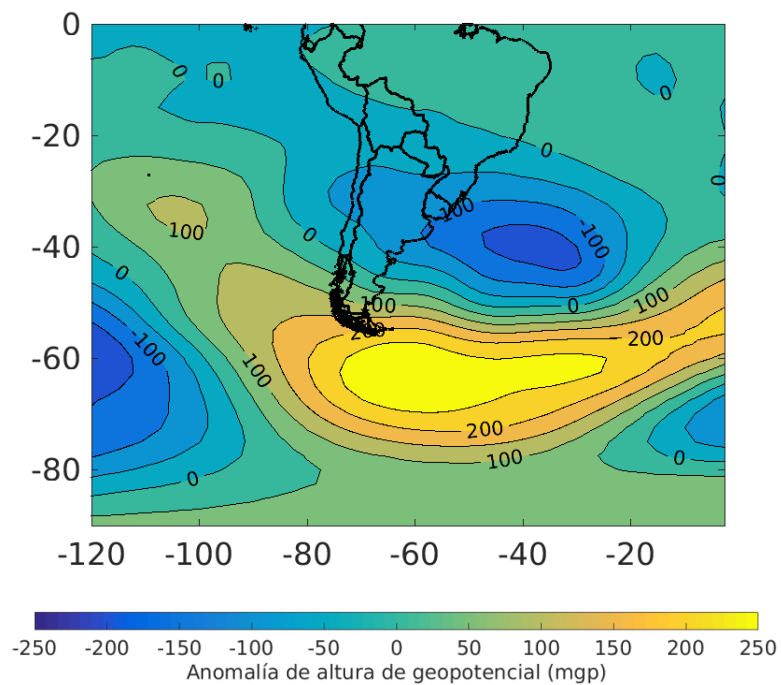


Figura 33: Composite de anomalía de altura de geopotencial en 500 hPa durante evento de bloqueo en ATS

La evolución del bloqueo se observa en la Figura 34, desde el 21 de abril (dos días antes al comienzo del evento detectado por nuestro índice) hasta el 29 de abril (dos días luego de finalizado el evento). Si bien durante los dos primeros días previos, (paneles (a) y (b)), se comienza a observar el patrón dipolo al sur del continente, el índice identifica el 23 de abril como comienzo de bloqueo probablemente por la restricción que impone el cálculo de que exista un gradiente de altura de geopotencial latitudinalmente, cosa que no sucede durante el 21 y 22 de abril ya que la baja presión asociada al patrón dipolo se encuentra desplazada hacia el este en lugar de situarse al norte de la alta presión. De manera similar, el día siguiente a la finalización del evento la anomalía de alta presión sigue presente aunque ya más débil, y la baja presión que se posicionaba al norte perdió intensidad.

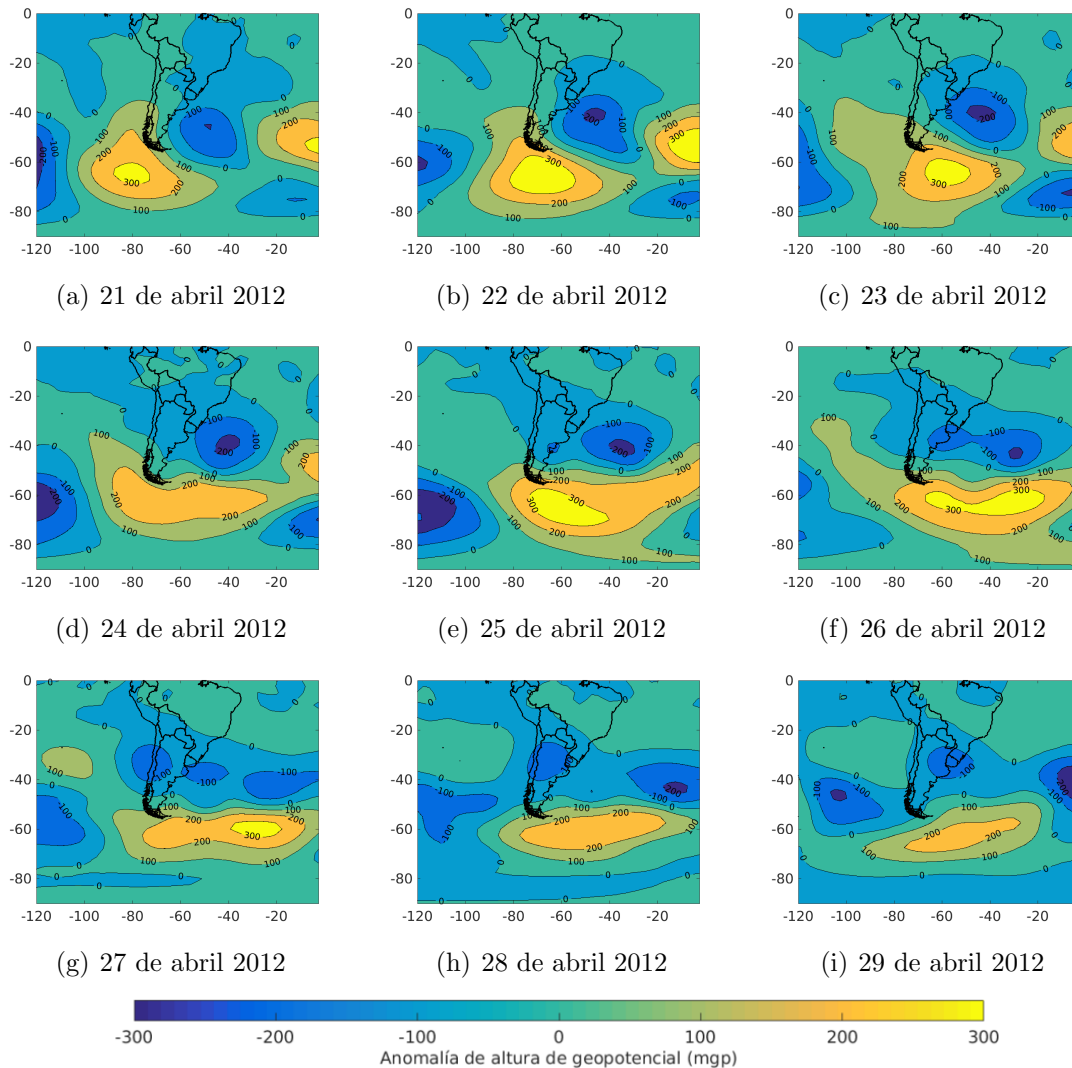


Figura 34: Anomalia de altura de geopotencial desde dos días previos al inicio del bloqueo en ATS hasta dos días posteriores a su finalización.

4.2. Anomalía de temperatura asociada al evento

El composite de anomalía en temperatura máxima y mínima durante todo el evento se muestra en la Figura 35 y para los valores absolutos de temperatura en la Figura 36. Se observa que en promedio las temperaturas registradas se encontraron siempre por debajo del valor esperado en todo el país como caracteriza a los bloqueos en esta región, alcanzando los -6°C las anomalías promedio.

Las anomalías de temperaturas diarias registradas desde dos días previos al comienzo del evento hasta dos días posterior se muestran en las Figuras 37 para las máximas y 38 para las mínimas. Practicamente durante los nueve días se observaron temperaturas por debajo de la media. Para TX el único registro por encima de la media ocurrió en la estación de la Estanzuela dos días previos al inicio del bloqueo. El resto de los días y en el resto del país las temperaturas máximas registradas se mantuvieron desde -4°C hasta -8°C . No se observa una evolución espacial dominante para las anomalías de temperatura máxima.

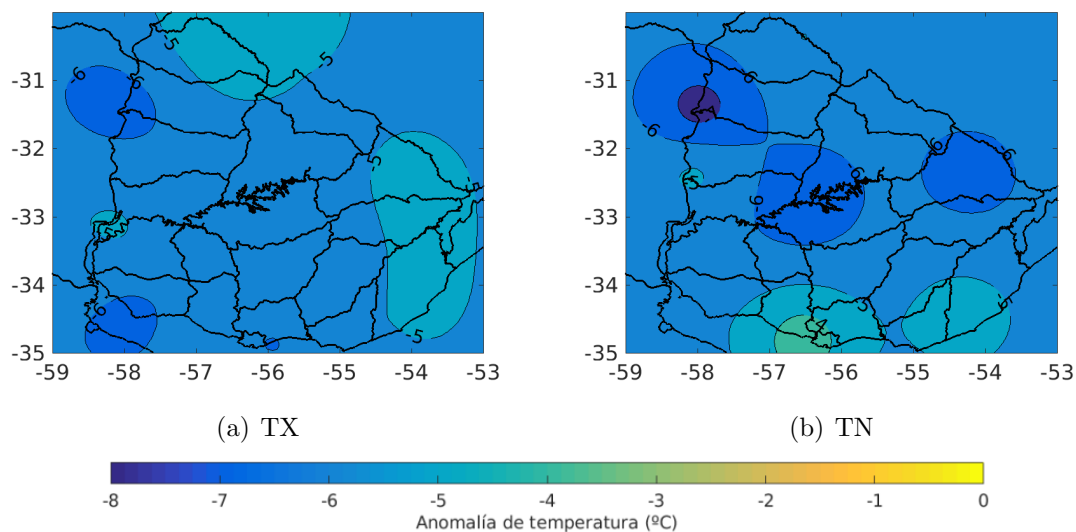


Figura 35: Composite de anomalía de temperatura durante evento de bloqueo en ATS. (a) temperatura máxima y (b) temperatura mínima.

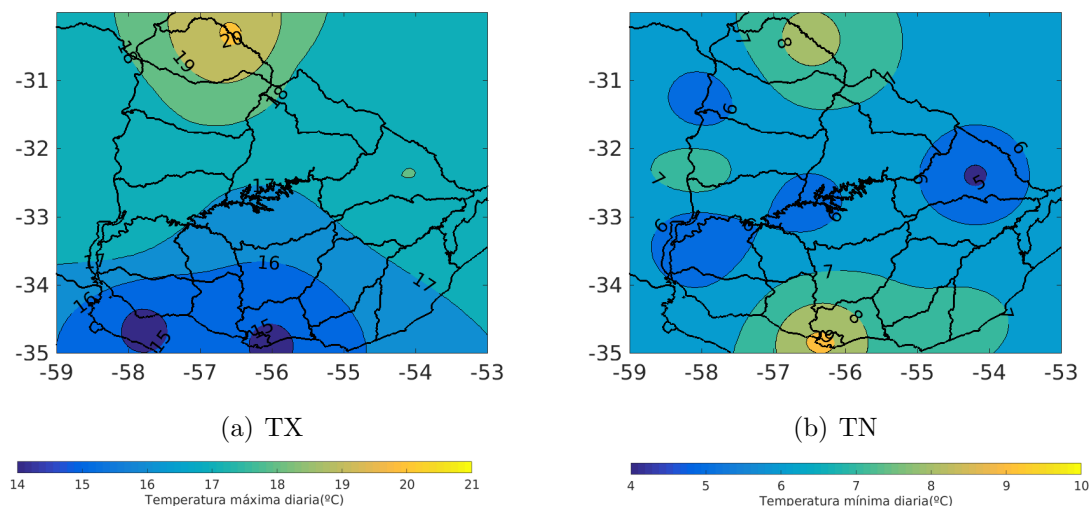


Figura 36: Composite de temperatura durante evento de bloqueo en ATS. (a) temperatura máxima y (b) temperatura mínima.

En el caso de la temperatura mínima diaria también se observan anomalías positivas dos días previos a la identificación del evento, aunque en este caso este comportamiento es generalizado en todo el país con valor medio de $+3^{\circ}\text{C}$. Los restantes ocho días, las anomalías son siempre negativas alcanzando hasta -10°C el segundo, tercer y quinto día del bloqueo en algunas estaciones de la zona centro y norte del país. A diferencia de Tx, donde los dos días posteriores al evento las anomalías registradas se encuentran entre 6 y 8 $^{\circ}\text{C}$ por debajo de la media, en Tn estos dos días las anomalías si bien siguen siendo negativas se encuentran entre 2 y 4 $^{\circ}\text{C}$ por debajo de lo esperado.

Si bien el bloqueo ocurrió en abril, a mediados de otoño, las temperaturas registradas en esos días fueron características del invierno. Como se mencionó en la sección 3.2.5, este evento de anomalías negativas de temperatura puede deberse a la circulación ciclónica del sistema de baja presión ubicado sobre la costa uruguaya. Podría suponerse que la rama oeste de esta circulación induce una entrada de aire frío desde altas latitudes.

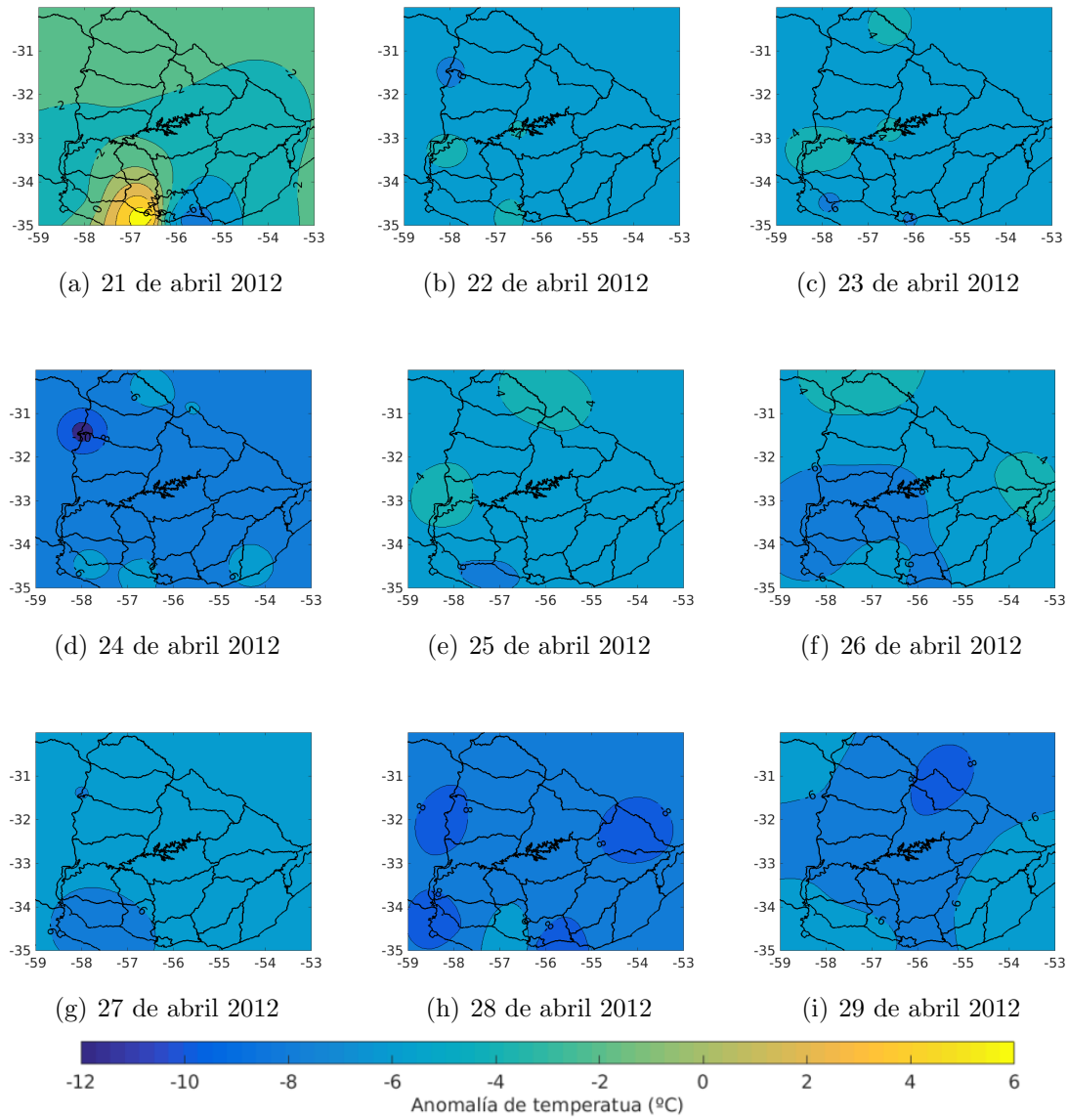


Figura 37: Anomalía de temperatura máxima desde dos días previos al inicio del bloqueo en ATS hasta dos días posteriores a su finalización.

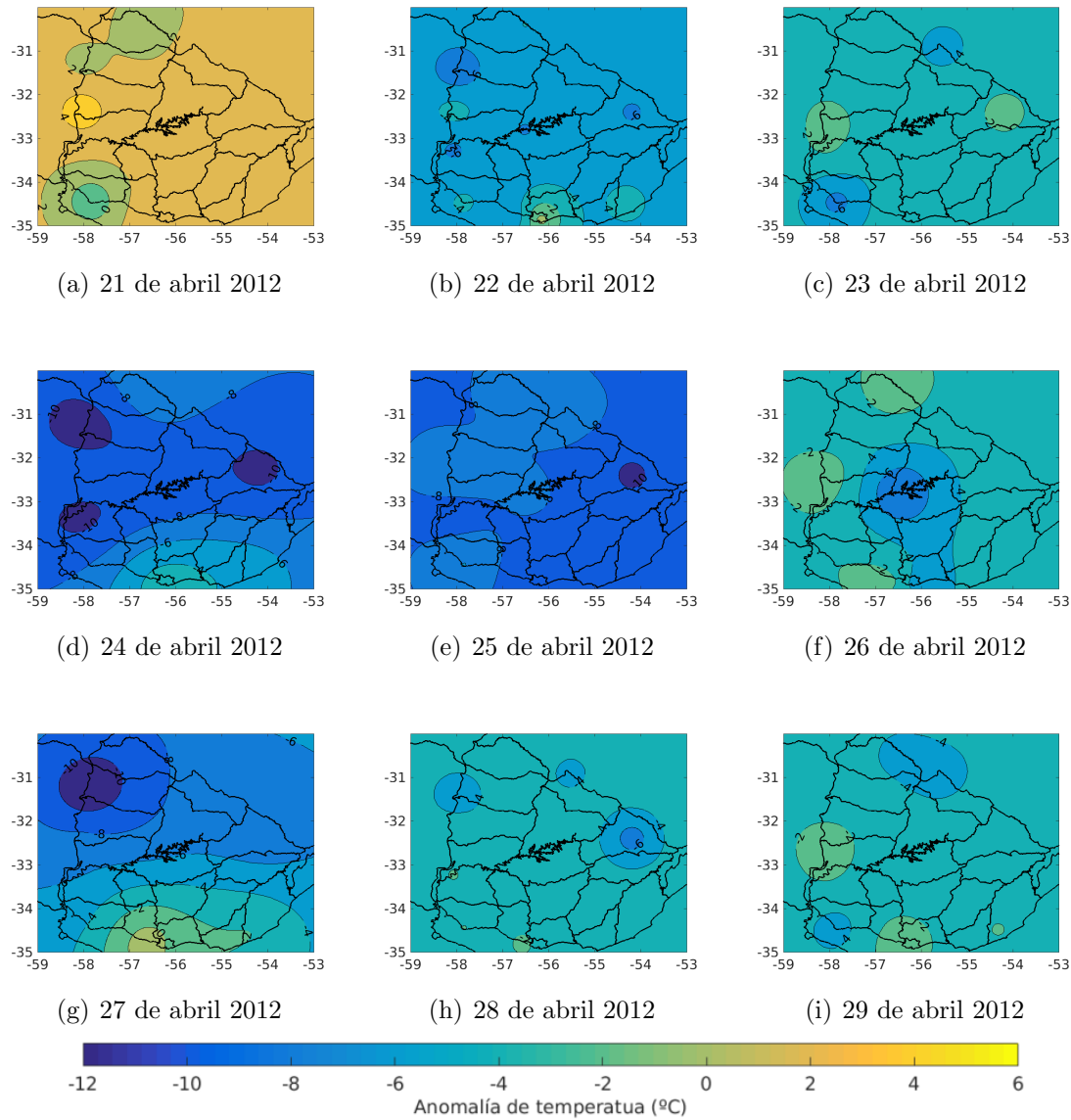


Figura 38: Anomalía de temperatura mínima desde dos días previos al inicio del bloqueo en ATS hasta dos días posteriores a su finalización.

4.3. Anomalía de precipitación asociada al evento

El acumulado de precipitación diaria durante bloqueo de abril del 2012 se muestra en la Figura 39, donde se observa que durante estos días no ocurrió precipitación sobre el territorio uruguayo. Por otro lado, sí aparecen lluvias al nor-noreste de Uruguay. El déficit de precipitación registrado durante estos días refleja el comportamiento general que se identificó para los bloqueos de otoño en ATS.

El acumulado de precipitación que diariamente se observó entre el 21 y el 29 de abril se muestra en la Figura 40, donde se observa la información resumida en el composite anterior. Durante los nueve días no hubo precipitaciones sobre nuestro país, incluso el día previo al inicio del bloqueo y los dos primeros días de evento no se registró precipitación en el dominio en estudio. En este dominio en la única región que se registra precipitación es entre el norte y el este de Uruguay.

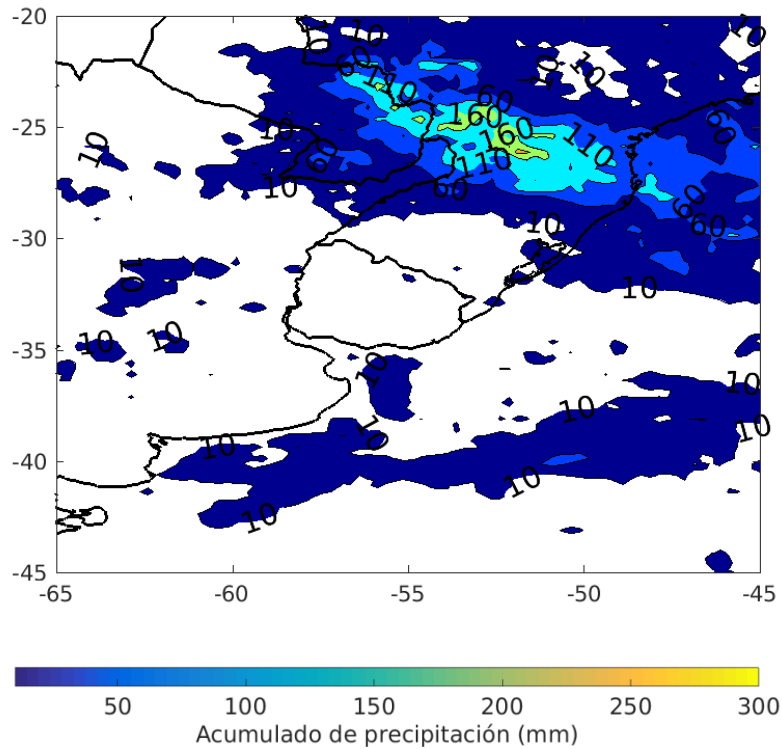


Figura 39: Acumulado de precipitación en mm entre el 21 y el 29 de abril de 2012, período con bloqueo en región ATS.

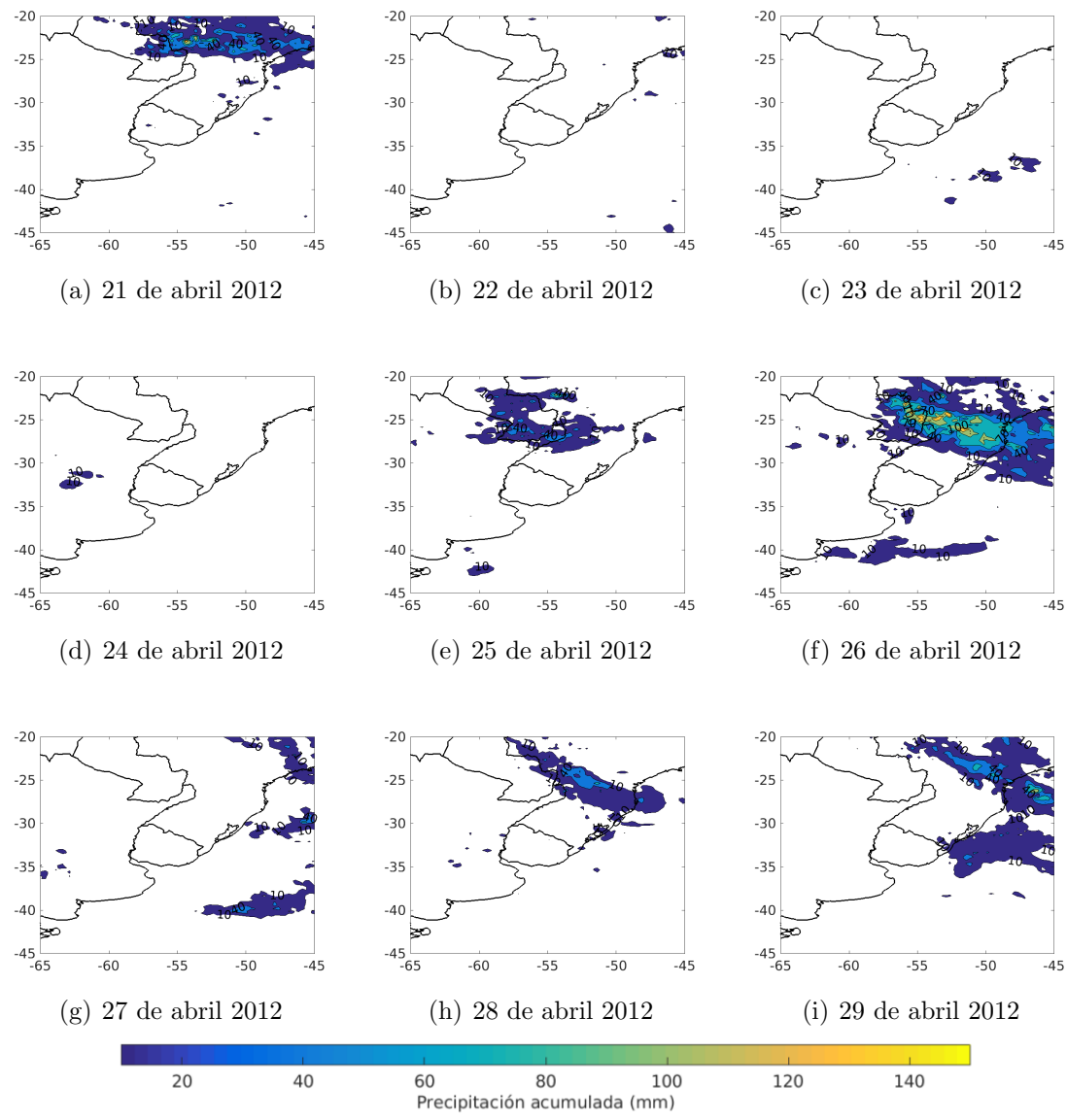


Figura 40: Acumulado de precipitación diaria desde dos días previos al inicio del bloqueo en ATS hasta dos días posteriores a su finalización.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se implementó un índice clásico para la identificación de bloqueos atmosféricos en medias y altas latitudes para el HS, en particular para las regiones Océano Pacífico Sureste y Océano Atlántico Sur. Para esto se trabajó con datos de reanálisis de z500 para el período comprendido entre 1980 hasta 2016. Al realizar la climatología se observó que estos eventos ocurren con mayor frecuencia en los meses fríos y al oeste de la costa del continente sudamericano. Esta región constituye la segunda zona con máximos de ocurrencia de bloqueos en el HS siendo la principal región la de Australia y Nueva Zelanda. A partir de las estructuras de bloqueo identificadas con los campos de altura de geopotencial se determinaron tres regiones características para la ocurrencia de bloqueos: la región Pacífico Sur centrada en 100°W ; la región Pacífico-Atlántico Sur que comprende longitudinalmente las dos costas oceánicas sur del continente sudamericano; y finalmente la región Atlántico Sur que abarca desde 60°W hasta el meridiano de Greenwich.

Se observa que la variabilidad intra-anual de estos eventos es muy grande. Se buscó relacionar con los eventos Niño/Niña sin encontrar una señal clara para la preferencia de bloqueos atmosféricos en condiciones Niño o Niña en las regiones PSE y PAS. Por el contrario para la región ATS parece existir preferencia de ocurrencia de bloqueos durante meses con Niña, como se evidenció con el test de chi-cuadrado. Los eventos característicos en toda la región de estudio poseen una duración típica de entre 5 y 6 días, aunque se identificaron eventos puntuales entre 17 y 23 días, los cuales ocurrieron en la temporada fría. La variabilidad interanual muestra que los bloqueos en verano son los menos frecuentes ocurriendo en promedio 2% con bloqueo en los meses cálidos en todas las longitudes, mientras que en los meses fríos en la región PSE, la de mayor frecuencia de ocurrencia, esta cantidad asciende a 8% aproximadamente que representa cuatro veces más.

Se evaluó el impacto de los bloqueos atmosféricos en las temperaturas máximas, mínimas y en la precipitación sobre Uruguay. Los eventos identificados en la región PSE no mostraron impactos significativos en ninguna de las tres variables. Los bloqueos que ocurrieron en la región PAS tuvieron efectos opuestos en los meses cálidos y fríos en nuestro país, provocando anomalías negativas significativas de temperatura y de precipitación durante el verano y anomalías positivas en las temperaturas y en la precipitación en la costa uruguaya durante otoño e invierno. La región ATS se caracterizó por ser la de menor frecuencia de ocurrencia de bloqueos generando durante todo el año temperaturas por debajo de la media, significativas principalmente

en otoño, período durante el cual también la precipitación se mostró significativamente por debajo de lo normal.

Por último, se eligió un caso particular de cinco días de duración, ocurrido durante abril de 2012 en la región ATS. Como caracteriza a los bloqueos en esa zona, las temperaturas se encontraron por debajo de lo normal durante todos los días que persistió el evento, y también el día previo y los dos días posteriores. Las anomalías negativas de temperatura alcanzaron en algunas estaciones meteorológicas del país los 10°C y en promedio las temperaturas se mantuvieron 4°C por debajo de la media climatológica. En cuanto a precipitación, no ocurrió en todo Uruguay desde los dos días previos al inicio del evento y hasta dos días posteriores.

Para este caso de estudio elegido se podría haber mirado otros campos que aportaran más información sobre que sucedió durante este período, como viento en 850 hPa para poder detectar donde se encontraban corrientes de aire húmedo o seco durante estos días. Varios autores complementan el estudio de bloqueos con análisis de vientos en 500 hPa, lo que brinda más herramientas para entender la dinámica de los eventos estudiados y viento en 250 hPa para observar el jet en casos de bloqueos. También se podría haber utilizado datos de precipitación medidas en estaciones meteorológicas o automáticas que aportaran información local sobre que sucedió con la precipitación en lugar de trabajar con estimaciones satelitales, aunque para trabajar con promedios las caracterizaciones por región constituyen una buena fuente de información.

Por lo tanto, un próximo paso en la continuación de este trabajo podría ser la incorporación de más variables como viento en diferentes niveles que ayuden a la comprensión del fenómeno identificado, así como de vorticidad en el mismo nivel que también es una variable utilizada en algunos trabajos. Recientemente se incorporó un nuevo índice en la identificación de bloqueos que se separa un poco de método clásico implementado en este trabajo y que se basa en la conservación de la vorticidad de altura de geopotencial. Otra línea de continuación de este trabajo podría ser evaluar como varían los bloqueos identificados con ambos índices, si se considera el mismo período de tiempo y dominio espacial para su identificación.

Bibliografía

- Alessandro, A. P. (2005). Bloqueos Simultaneos En El Atlantico Y Pacifico Sur Y Sus Influencias Sobre La República Argentina. (1991):277–300.
- Alessandro, A. P. (2014). Incidence and trend of blocking action situations on the temperature and precipitation in Argentina. *Atmosfera*, 27(2):141–163.
- Anderson, J. L. (1993). The Climatology of Blocking in a Numerical Forecast Model.pdf.
- Bluestein, H. B. (1993). *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems*. New York, Oxford University Press.
- Cavalcanti, I., Ferreira, N., Da Silva, A., and Justi, G. (2009). *Tempo e Clima no Brasil*. Sao Pablo, Brasil, 1 edition.
- Charney, J. G. and DeVore, J. G. (1979). Multiple Flow Equilibria in the Atmosphere and Blocking.
- De Mello, S. (2013). *Estudio climatológico y regionalización de heladas meteorológicas en Uruguay*. Degree, Universidad de la República.
- Gebremichael, M. and Hossain, F. (2010). *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer Science, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, springer s edition.
- Henson, B. U. C. f. A. R. (2011). Blocking the way.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., and Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorol.*, 8(1):38–55.
- 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., and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77(3):437–471.

- Kayano, M. (1999). Meteorology and Atmospheric Physics Southeastern Pacific Blocking Episodes and their Effects on the South American Weather. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 155:145–155.
- Legras, B. and Ghil, M. (1985). Persistent Anomalies, Blocking and Variations in Atmospheric Predictability. *J. Atmos. Sci.*, 42(April 1985):433–471.
- Lejenäs, H. and økland, H. (1983). Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. *Tellus A*, 35 A(5):350–362.
- Lindsey, R. (2013). In Watching for El Niño and La Niña, NOAA Adapts to Global Warming.
- Marques, R. d. F. C. (1996). *Bloqueios Atmosféricos no Hemisfério Sul*. Phd thesis, Sao Jose dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil.
- Marques, R. F. C. and Rao, V. B. (1999). A Diagnosis of a Long-Lasting Blocking Event over the Southeast Pacific Ocean. *Mon. Weather Rev.*, 127(1981):1761–1776.
- Mendes, M. (2012). Southern Hemisphere Atmospheric Blocking Diagnostic By Ecmwf and Ncep/Ncar Data. *Rev. Bras. Meteorol.*, 27(3):263–271.
- Mendes, M. C. D., Trigo, R. M., Cavalcanti, I. F. A., and DaCamara, C. C. (2008). Blocking episodes in the Southern Hemisphere: Impact on the climate of adjacent continental areas. *Pure Appl. Geophys.*, 165(9-10):1941–1962.
- Mendes, Monica C D Trigo, R. M. C. I. F. A. D. C. C. (2005). Bloqueios Atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o Oceano Pacífico Sul: Impactos Climáticos e Mecanismos Físicos Associados. *Rev. Bras. Meteorol.*, 20(2):175–190.
- Nascimento, E. D. L. and Ambrizzi, T. (2002). The Influence of Atmospheric Blocking on the Rossby Wave Propagation in Southern Hemisphere Winter Flows. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 80(2):139–159.
- NOAA (2017). Cold & Warm Episodes by Season.
- Pelly, J. L. (2001). *The predictability of atmospheric blocking*. Phd thesis, Department of Meteorology, University of Reading, United Kindom.
- Renom, M. (2009). *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos Madeleine Renom Molina*. Phd thesis, Facultad de Ciencias Exactas.

- Rex, D. F. (1949). Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. I . An Aerological Study of Blocking Action. *Tellus*, 2, 196-211, 1945.
- Rodriguez, R. R. and Woolings, T. (2017). Impact of Atmospheric Blocking on South America in Austral Summer. pages 1821–1837.
- Tibaldi, S. and Molteni, F. (1990). On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, 42(3):343–365.
- Tibaldi, S., Tosi, E., Navarra, A., and Pedulli, L. (1994). Northern and Southern Hemisphere Seasonal Variability of Blocking Frequency and Predictability. *Mon. Weather Rev.*, 122(9):1971–2003.
- Trenberth, K. F. and Mo, K. C. (1985). Blocking in the Southern Hemisphere. *Mon. Weather Rev.*, 113(1):3–21.
- Trigo, R. M., Trigo, I. F., DaCamara, C. C., and Osborn, T. J. (2004). Climate impact of the European winter blocking episodes from the NCEP/NCAR reanalyses. *Clim. Dyn.*, 23(1):17–28.