



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE GRAN ESCALA CONDUCENTES A LA
FORMACIÓN DE CONDICIONES DE RÍO ATMOSFÉRICO EN CHILE CONTINENTAL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

TOMÁS IGNACIO GÓMEZ ZAVALA

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO RONDANELLI ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RENÉ GARREAUD SALAZAR
MARK FALVEY
JUAN PABLO BOISIER ECHEÑIQUE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por ANID mediante la beca de magíster nacional 2018.

SANTIAGO DE CHILE
2022

Resumen

Los Ríos Atmosféricos (RAs) son fenómenos que describen el transporte de grandes cantidades de vapor de agua desde los trópicos hacia latitudes extratropicales a través de canales atmosféricos angostos y de gran extensión. Por efectos orográficos, los RAs al hacer contacto con masas de tierra pueden generar eventos de precipitación intensos. En Chile, por su ubicación y sus características geográficas propicias a la interacción con RA, estos juegan un rol preponderante en la meteorología, la climatología y la hidrología de gran parte del territorio continental. Los RA pueden ser beneficiosos, al ser responsables de gran parte de la acumulación de nieve durante el periodo invernal, como peligrosos, al estar asociados a eventos extremos tales como aluviones e inundaciones.

A pesar de su importancia, solo recientemente se ha impulsado su estudio, concentrándose este en eventos del hemisferio norte. En Chile existen precedentes principalmente descriptivos de RA, como su caracterización climatológica y su relación con eventos extremos de precipitación. Sin embargo, existen lagunas de conocimiento respecto de los patrones atmosféricos de gran escala precursores de eventos de RA en Chile, tema abordado en este trabajo de tesis.

Debido a esta falta de antecedentes sobre los procesos que forman los RA, se propone resolver este problema usando un algoritmo de clasificación probabilístico, llamado modelos de mezclas gaussianas. Este algoritmo realiza una clasificación no supervisada, que permite identificar mecanismos subyacentes, al agrupar elementos similares. Esta metodología presenta la ventaja de no requerir información a priori, pero requiere de información representativa del fenómeno estudiado. Para esto, se seleccionan las fechas donde un RA hizo contacto con Chile continental en el periodo 1980-2018 - utilizando los campos de transporte de vapor de agua (IVT) que definen al RA, previamente procesados con un análisis de componentes principales (PCA).

El algoritmo de clasificación requiere predefinir el número de categorías que se obtienen. Dado que este número de categorías se asocia a los mecanismos que se busca identificar, se aplica el método sucesivamente hasta que se identifican compuestos similares – generados en base a la clasificación del algoritmo - usando distintas configuraciones espaciales de clasificación. Se identifican así 6 patrones de gran escala distintivos conducentes a la formación de RAs que hacen contacto con Chile continental. Algunos de estos son patrones conocidos de regulación de la meteorología en Chile, como las ondas de Rossby de distintas longitudes de onda (principalmente con números de onda 3 y 4). Sin embargo, se identifican mecanismos adicionales que, en el contexto de este trabajo, son denominados Onda estacionaria del Pacífico, Baja Polar y Engranaje Atmosférico.

Se identifican elementos comunes entre distintos mecanismos, como la influencia de teleconexiones con forzantes tropicales, lo que influye en su estacionalidad, así como también las diferencias en intensidad de los eventos que componen cada mecanismo. Así mismo, se identifican eventos que comparten características comunes tales como zona de impacto y estacionalidad. Adicionalmente, se caracteriza las contribuciones de cada mecanismo a las precipitaciones medias anuales (que llegan a ser de incluso un 60% en algunas zonas) y a los eventos extremos de precipitación, con los cuales están estrechamente ligados, siendo los mecanismos identificados responsables de un alto porcentaje de ellos (>80% del 1% de los eventos más grandes en la mayor parte de Chile continental).

Dedicatoria

*A mi abuelita Clemencia,
que tanto le gustaba que estudiara.*

Agradecimientos

El desarrollo de esta tesis, y en general de este magíster, es un proceso que no podría haberse concluido sin el apoyo de múltiples personas.

En primer lugar, agradecerles a mis compañeros de magíster – José, Pao, Nati en particular – por todo el apañe, entre trasnoches y tareas. A mis profesores del magíster, de quienes aprendimos tantas cosas. En particular a mi profesor guía Roberto Rondanelli, por su confianza y la libertad que me dio para hacer una tesis en base a mis ideas.

A mis jefes y colegas de trabajo que he tenido durante el magíster, en especial a Ximena Vargas y Mark Falvey por dejarme hacer compatible el poder trabajar y estudiar.

A big thanks to all the people at CW3E, Scripps Institution of Oceanography, for the support and chance to attend the Atmospheric Rivers Colloquium Summer School – thanks to Anna Wilson & Marty Ralph for that incredible opportunity. A big shout-out to all the people I met there and inspired me. A special note goes out to Pedro Sousa and Sol Kim, for helping me out with sorting this thing out.

Un gran agradecimiento a ANID, por su apoyo económico, que facilitó todo bastante.

A mis padres, por siempre estar ahí.

A mi perrita Almendra, que me acompañó en tantas, tantas, tantas noches de trasnoche que probablemente podría graduarse sin problemas.

A Gonzalo, por darme el empujón final para terminar esta tesis.

A todos los que formaron parte de este proceso.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Enfoques metodológicos.....	6
1.2	Objetivos	9
1.2.1	General	9
1.2.2	Específicos.....	9
2	Datos y procedimientos	10
2.1	Catálogo de ríos atmosféricos.....	10
2.1.1	Información disponible en el catálogo	10
2.1.2	Procesamiento del catálogo	12
2.2	Campos atmosféricos.....	13
2.3	Precipitaciones en Chile continental – CR2MET.....	14
2.4	Modos de variabilidad climática global.....	14
2.4.1	Oscilación de Maden-Julian (MJO)	15
2.4.2	Oscilación del Sur de El Niño (ENSO)	15
2.4.3	Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).....	16
2.5	Cálculo de climatologías y anomalías.....	16
2.6	Traza de IVT.....	17
2.7	Análisis de componentes dominantes en un RA.....	18
3	Metodología de clasificación.....	20
3.1	Algoritmo de clasificación: GMM - Modelos de Mezcla Gaussiana.....	21
3.2	Aplicación de GMM al problema de clasificación de RA	23
3.3	Análisis de Sensibilidad.....	26
3.3.1	Sensibilidad a la variable de análisis	26
3.3.2	Sensibilidad a la selección geográfica de elementos	27
3.3.3	Sensibilidad a la región de análisis.....	30
3.4	Resumen del capítulo	36
4	Resultados.....	37
4.1	Onda estacionaria del Pacífico (OEP)	43
4.1.1	Descripción del mecanismo	44
4.1.2	Caracterización de sus elementos.....	48
4.1.3	Evolución del clúster.....	50
4.2	Baja polar (BP).....	52

4.2.1	Descripción del mecanismo	52
4.2.2	Caracterización de sus elementos.....	56
4.2.3	Evolución del clúster.....	58
4.3	Engranaje (En).....	60
4.3.1	Descripción del mecanismo	60
4.3.2	Caracterización de sus elementos.....	65
4.3.3	Evolución del clúster.....	67
4.4	Ondas de Rossby n=3 (OR3)	69
4.4.1	Descripción del mecanismo	69
4.4.2	Caracterización de sus elementos.....	73
4.4.3	Evolución del clúster.....	74
4.5	Ondas de Rossby n=4 (OR4n y OR4s)	76
4.5.1	Descripción del mecanismo	76
4.5.2	Caracterización de sus elementos.....	84
4.5.3	Evolución del clúster.....	87
5	Análisis de precipitaciones	89
5.1	Relación con la precipitación media anual	89
5.2	Variación estacional de contribución a las precipitaciones	97
5.3	Relación con eventos extremos de precipitación	99
6	Conclusiones	103
6.1	Comentarios generales	103
6.2	Trabajos Futuros.....	108
6.2.1	Aplicación de la metodología sobre zonas más acotadas	108
6.2.2	Evaluación de la correcta representación de estos mecanismos en modelos de circulación general.....	109
6.2.3	Sensibilización de resultados en función de otros catálogos	109
6.2.4	Identificación de patrones de eventos de precipitación extremos.....	109
7	Bibliografía.....	110
	Anexos	116
A.1	Porcentaje de eventos relacionados a RA con respecto a la climatología de frecuencia anual.....	116
A.2	Contribuciones estacionales distribuidas espacialmente de cada mecanismo a la precipitación media anual	117

1 INTRODUCCIÓN

Los ríos atmosféricos (RA) son bandas de vapor de agua, delgadas, angostas y extensas de escala sinóptica que juegan un papel fundamental en el ciclo del agua a nivel global, así como también en la meteorología regional e hidrología de Chile. La primera aproximación a una definición de este fenómeno meteorológico fue realizada en 1992 por Newell et al, donde fueron inicialmente descritos como *ríos troposféricos*, plumas de altos valores de transporte de vapor de agua, que se desplazaban a través de la atmósfera. Sin embargo, no sería hasta Zhu & Newell (1998) que el término río atmosférico fue acuñado. Fue en este estudio donde se describe por primera vez algunas de las características fundamentales de los RA: son responsables de al menos un 90% del transporte de vapor de agua hacia los polos en latitudes medias, aunque solo ocupan un 10% de la circunferencia global.

La identificación de estos eventos de RA se realizó usando valores de IVT (transporte de vapor de agua integrado en la vertical, por sus siglas en inglés) en cada punto de grilla de un reanálisis global de 2° de resolución en un periodo de tres años. El mismo estudio concluyó que, para un instante cualquiera, es probable que se encuentren ocurriendo simultáneamente de tres a cinco eventos de RA a nivel global.

Una consecuencia importante de los RA es que, al interactuar y hacer contacto con territorio continental, pueden provocar eventos de precipitación aumentados respecto a aquellos que no involucran un RA, cuando las grandes cantidades de vapor de agua desplazadas por ellos interactúan con la orografía local (R. D. Garreaud, 2013). Esta situación ocurre muy frecuentemente a lo largo de las costas oeste de América del Norte y América del Sur, y Europa (Kingston et al, 2016; Ralph et al., 2006; Valenzuela & Garreaud, 2019). Construyendo sobre el método de detección planteado en Zhu & Newell (1998), se han desarrollado múltiples esfuerzos en identificar, catalogar y caracterizar la ocurrencia de los RA, tanto de forma global (Guan & Waliser, 2015; O'Brien et al., 2020), como local, donde se hacen análisis regionales (Gorodetskaya et al. 2014 en el territorio Antártico, Lavers et al. 2012 en Reino Unido, Payne & Magnusdottir 2015 en la costa oeste de Estados Unidos). Para el territorio nacional, un algoritmo específico y un análisis regional fue realizado por Viale et al. (2018).

El panel a de la Figura 1.1, adaptada de Guan & Waliser (2015), muestra la frecuencia de ocurrencia en que un RA hace contacto con una masa terrestre significativa. Los RA se caracterizan por ocurrir más frecuentemente en latitudes medias, concentrándose adicionalmente a las regiones descritas previamente, en otros sectores como Groenlandia, el continente Antártico, el Sudeste Asiático, Australia, Nueva Zelanda y el sector suroeste de África. Sin embargo, dicha figura muestra que la mayor frecuencia de eventos de RA a nivel diario ocurre en el sector de la Patagonia chilena, donde hay sectores que llegan incluso a tener 16 eventos al año, siendo el punto con mayor frecuencia a nivel global. Dentro del mismo estudio, usando como información base los campos atmosféricos del reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011), se realizan caracterizaciones de los perfiles verticales agrupando los eventos de regiones con una alta frecuencia de eventos de RA. Los eventos de RA que hacen contacto en territorio chileno destacan por poseer, en promedio, el flujo de vapor de agua más alto en comparación con otras regiones de características similares, como Gran Bretaña o el estado de California, según lo que se

muestra en el panel (b) de la Figura 1.1, así como también los que presentan un mayor valor de IVT promedio (panel (c) de la misma figura).

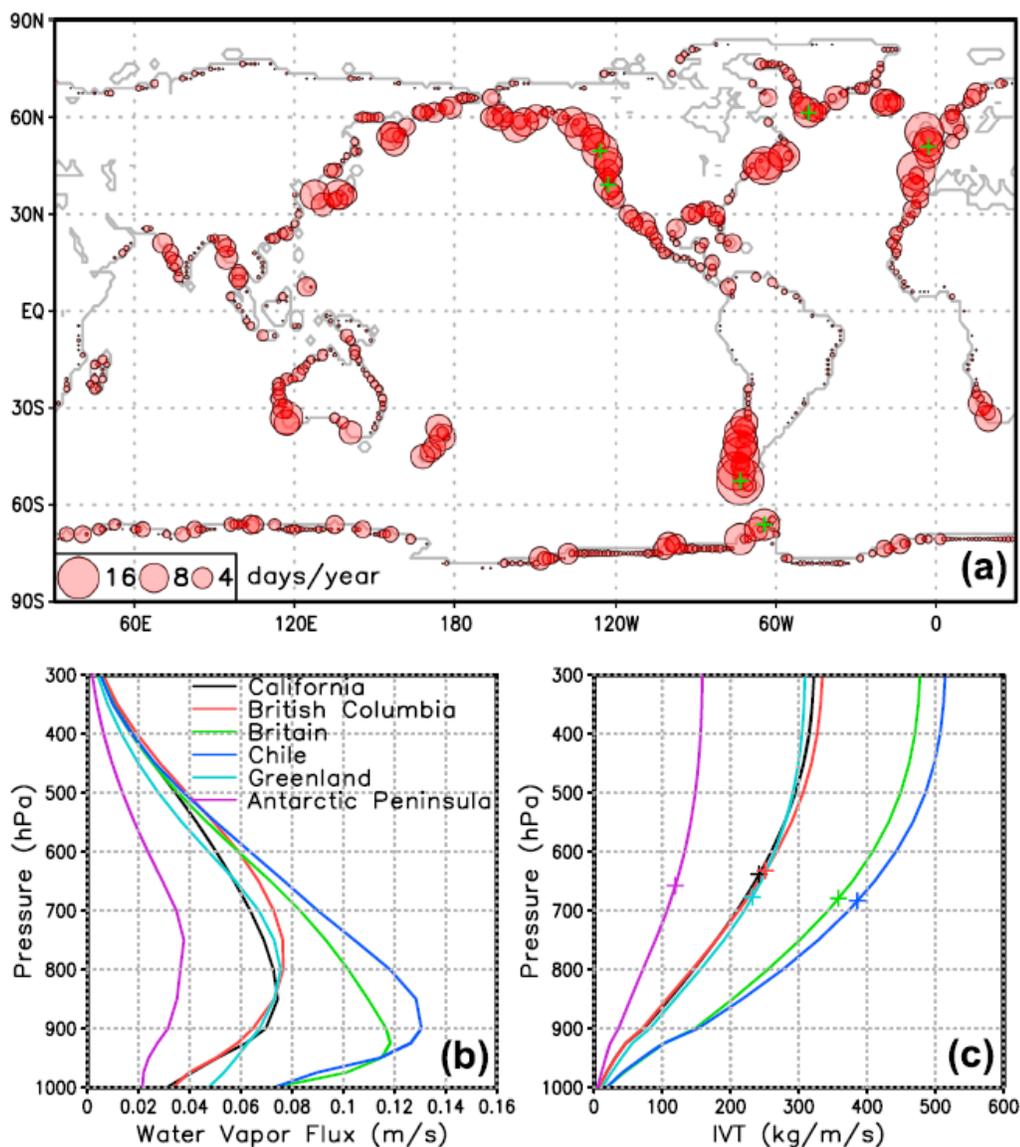


Figura 1.1. (a) Frecuencia (días por año) de contactos de RA basado en todos los meses comprendidos en el período 1997-2014. Los valores de frecuencia en día por año fueron obtenidos multiplicando la fracción de periodos temporales 6-horarios con contactos continentales de RA (i.e. probabilidad de que exista contacto continental de un RA). Las cruces verdes indican ubicaciones con frecuencias de contacto destacables seleccionadas para los análisis de los paneles 1.1b y 1.1c. (b) Perfil vertical medio de flujos horizontales de vapor de agua (m s^{-1}) en las seis ubicaciones marcadas en el panel 1.1a. (c) Flujo de vapor de agua horizontal acumulado ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) entre 1000hPa y cada nivel de presión para cada uno de las 6 ubicaciones seleccionadas. El signo de cruz indica el nivel bajo el cual se contiene un 75% del total de IVT en la columna. Fuente: tomado desde Guan & Waliser, 2015.

Dependiendo de las características de cada RA y la interacción con la geografía local, el transporte de estos flujos de humedad concentrados puede generar eventos de precipitación por forzamiento topográfico. Estos eventos pueden generar tanto consecuencias positivas, tales como terminar con periodos de sequía (Dettinger, 2013), como negativas, al generar grandes inundaciones (Ralph et al., 2006). En zonas donde el recurso hídrico no es abundante, los eventos de precipitación asociados a eventos de RA son una fuente crucial de agua fresca, tanto de precipitación líquida, como en forma de

nieve (Dettinge et al, 2011; Guan et al, 2010; Rutz & Steenburgh, 2012). Las contribuciones de los RA a la precipitación han sido cuantificadas en el orden de 30% a 50% de lo esperable en el periodo invernal en Europa Occidental, así como también de la costa oeste y las regiones central y noreste de Estados Unidos. (Lavers & Villarini, 2015)

En particular, a nivel nacional, con respecto a la disponibilidad de recurso hídrico, se ha estimado que los eventos de precipitación asociados a RA contribuyen en un 50% del manto nival esperable en un año hidrológico en la región comprendida entre 27,5°S y 36,5°S, y que las precipitaciones asociadas son a dichos eventos son en promedio 2,5 veces más intensos que los eventos sin un RA asociado (Saavedra et al, 2020). Adicionalmente, Valenzuela y Garreaud (2019), vinculan los RA a eventos de precipitación extrema, con una correlación en aumento a medida que se avanza hacia latitudes mayores. En particular, grandes desastres tales como los aluviones de Santiago de 1993 y de Santa Lucía en el año 2017 se pueden vincular a la ocurrencia de un RA, al identificar las fechas de ocurrencia de estos eventos en el catálogo de identificación de eventos de RA de Guan y Waliser (2015).

La caracterización más detallada de los eventos de RA que afectan a Chile continental fue desarrollada por Viale et al. (2018), donde se establece una climatología de RA, la cual se presenta en la Figura 1.2a. En dicho estudio, se identifica la región entre 38°S y 50°S como el sector donde se concentra la mayor frecuencia de eventos de RA (35 a 40 eventos) llegando a un máximo en el sector Patagónico donde se encuentran los Campos de Hielo Norte y Sur. Al revisar más en detalle esta climatología, se observan diferencias estacionales siguiendo un patrón latitudinal: durante el invierno austral, los contactos de RA con la superficie continental se concentran entre las latitudes 35°S y 42°S, fenómeno que se extiende incluso a parte de las estaciones de transición; en contraste, durante el periodo estival austral, se tiene una frecuencia mayor en la región comprendida entre los 51°S y 55°S (Viale et al., 2018). Las diferencias estacionales descritas se presentan gráficamente en la Figura 1.2b, donde se puede observar el desplazamiento de la zona con mayor frecuencia de eventos de RA en función del ciclo estacional.

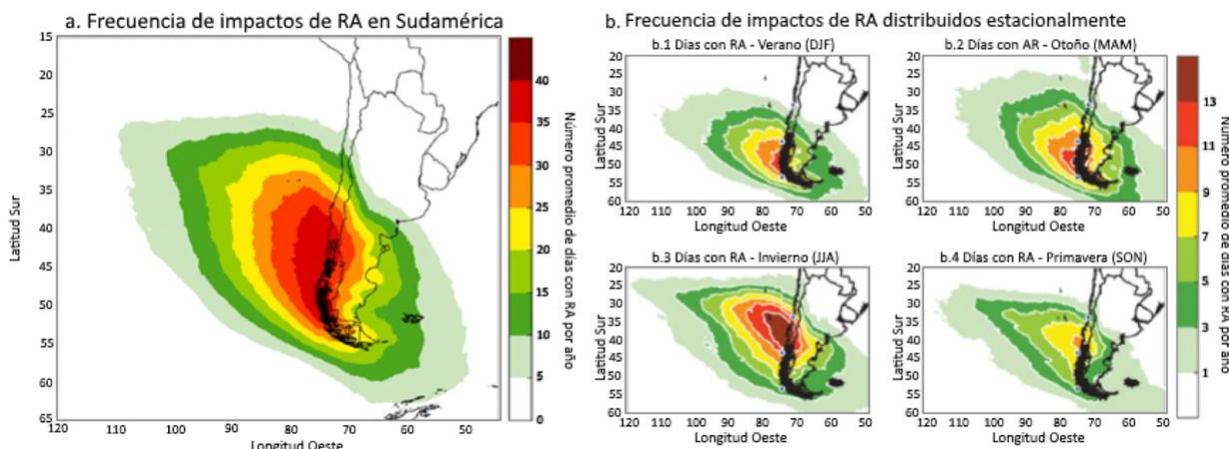


Figura 1.2. a) Frecuencia anual de días con impacto de RA en Sudamérica para el periodo 2001-16. (b) Distribución estacional de la frecuencia de impactos de RA en Sudamérica para el mismo periodo. Fuente: modificada de Viale et al, 2018.

A pesar de que en la literatura se diferencia entre tormentas cálidas y frías, y que ambas tienen probabilidad de presentar un RA asociado, usualmente los enfoques se centran en

cuantificar las contribuciones en precipitación del tipo de tormenta y el proceso de formación del tipo de tormenta (Garreaud, 2013), más que en la presencia o ausencia de un RA asociado.

Adicionalmente, si bien Viale (2018) presenta una caracterización comprehensiva de la distribución geográfica-temporal de los eventos de RA (Figura 1.3a), el estudio se limita a ámbitos descriptivos, y no ofrece nociones sobre cuales podrían ser los mecanismos atmosféricos asociados que rigen dichas variaciones o qué relación guardan con eventos de mayor escala. En la caracterización realizada destacan incluso diferencias estructurales de los eventos de RA, como por ejemplo el ángulo de contacto, que varía geográficamente (Figura 1.3b), la intensidad de los RA que hacen contacto con Chile continental, que aumentan en su valor medio en latitudes mayores (Figura 1.3c) o el largo del RA, el cual varía tanto geográfica como estacionalmente (Figura 1.3d). Esta diversidad de características en los eventos es solo descrita y no se plantea ninguna hipótesis respecto de los mecanismos de gran escala que controlan estas características. Así, a pesar de los importantes efectos regulatorios que ejercen los RA sobre eventos extremos y variabilidad interanual de precipitación, los procesos de escala sinóptica y planetaria que llevan a su formación son aspectos que aún no comprendidos a cabalidad. (Benedict et al, 2019).

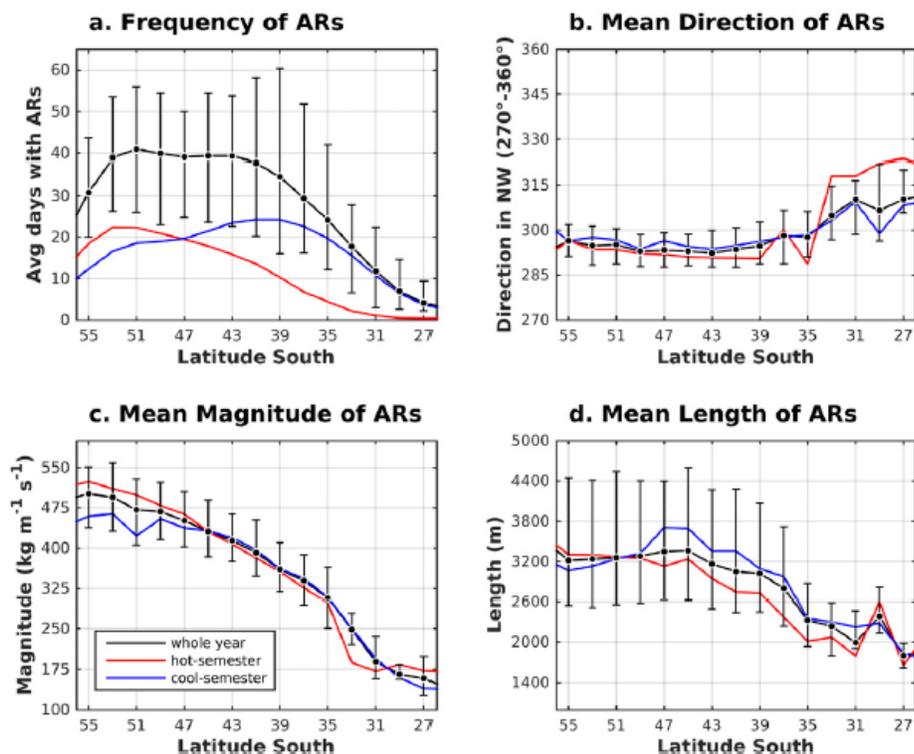


Figura 1.3. Caracterización latitudinal de los RA que hacen contacto con la superficie de Chile Continental. Se presentan distintas agrupaciones temporales: año completo (línea negra), periodo cálido (entre octubre y marzo, línea roja) y periodo frío (entre abril y septiembre, línea azul). Se caracterizan según latitud: a. frecuencia de eventos, b. dirección promedio, c. magnitud media y d. largo medio. Las barras de error representan el rango intercuantil de los eventos considerados para calcular la media. Fuente: Viale et al., 2018

El análisis de caracterización por latitud desarrollado en Viale (2018) podría complementarse, por ejemplo, con una caracterización mediante la metodología que se presenta en Gonzales et al. 2020, donde se busca identificar cual es la componente que más contribuye a la magnitud de un AR: humedad o viento. En una segunda derivada,

otros estudios como, por ejemplo (Benedict et al, 2019a; Benedict et al., 2019b) a través de la revisión de compuestos de eventos de RA que cumplen ciertos requisitos geográficos, buscan identificar mecanismos atmosféricos que conllevan la presencia de RA. Benedict (2019b) estudia patrones atmosféricos de periodos superiores a una semana previa a la fecha de contacto del RA, en dos ubicaciones cercanas a puntos relevantes: Oregón (45°N, 230°E) y las costas del sur de California (35°N, 230°E). Al revisar los compuestos asociados a cada lugar, el de Oregón muestra el desarrollo de un anticiclón migratorio en el sector de Alaska, ciclones en los sectores costeros del sudeste asiático y el sector noreste del Pacífico, y una banda elongada de vapor de agua que ocupa la totalidad de la cuenca oceánica Pacífica del Norte, llevando cantidades anómalas de vapor de agua. Los RA del sector de California del Sur también exhiben un bloqueo en latitudes altas, pero tienen un desarrollo y un ciclón en la zona del noreste del Pacífico más temprano. Sin embargo, en estos estudios, se fuerza la discretización de los eventos de RA en base a un criterio geográfico, perdiendo la generalidad de un análisis climatológico continuo en una región de estudio.

Los RA, al ser un fenómeno de transporte de humedad, son regulados principalmente por la dinámica y circulación atmosférica (Kim et al, 2019). Campos (2020) cita algunos ejemplos de esto, donde asocia por ejemplo la fase negativa del PNA con una mayor frecuencia de RA a la región costera de California, según lo descrito en Guan & Waliser (2015), que asocia el incremento de frecuencia con una circulación ciclónica anómala que es parte del PNA, generando una anomalía de los vientos y del IVT en dirección hacia la costa de California. Por el contrario, en años dominados con una fase negativa de ENSO, la anomalía es inversa, disminuyendo el número de eventos y la acumulación de nieve en la Sierra Nevada (Guan et al, 2013). En particular, en este trabajo, se asocia la ocurrencia de RA con las fases negativas de la Oscilación Ártica (AO, por sus siglas en inglés) y el patrón de teleconexión del Pacífico del Norte (PNA, por sus siglas en inglés). Los patrones de circulación atmosférica asociadas a estas condiciones, caracterizadas por anomalías ciclónicas centradas al noroeste de California, proveen un ambiente excepcionalmente facilitador para la ocurrencia de eventos de RA.

A nivel nacional, es Campos (2020) el que hace un análisis de la influencia de señales macro climáticas oceánicas sobre las consecuencias que sus fases tienen sobre la duración, frecuencia e intensidad de eventos de RA. Se identifica que durante la fase positiva de ENSO se favorece el transporte de humedad desde el Pacífico tropical, debido a un efecto conjunto entre la intensificación del jet subtropical y el aumento en el contenido de agua precipitable cerca de la costa de Sudamérica. Esta mayor disponibilidad de agua precipitable maximiza las anomalías de IVT que ocurren cuando se desarrolla una baja presión subtropical producto de una onda de Rossby cuasi-estacionaria durante el periodo de invierno, lo que se traduce en RA de mayor intensidad (debido a la mayor cantidad de humedad disponible) y mayor frecuencia (debido a los efectos sobre la circulación que generan las condiciones de ENSO+). Los efectos son inversos en el caso de tener una fase negativa de ENSO. Considerando esto, es posible reconocer implícitamente un mecanismo de generación de eventos de RA en el contexto nacional: el desarrollo de una onda de Rossby cuasi-estacionaria propicia que se genere una baja presión la cual gatilla el aumento de vientos que, en conjunto con la humedad disponible, generan un evento de RA. Si bien este caso resulta un ejemplo de un mecanismo de generación de RA, este análisis queda restringido al periodo invernal y geográficamente delimitado a la zona de Chile central.

Actualmente, los esfuerzos de identificación de mecanismos se han centrado en los RA del hemisferio norte, pero dadas similitudes climáticas de la costa oeste de Estados Unidos con la costa de Chile, resulta razonable suponer que existen mecanismos similares que conlleven a la ocurrencia de eventos de RA en Chile. Sin embargo, un análisis de identificación en función de una segregación espacial subjetiva como el realizado en Benedict et al. (2019a), podría eventualmente incorporar un sesgo en los mecanismos a identificar. Una metodología robusta, enfocada a una zona geográfica, debiese incluir en su análisis todos los eventos de RA de una zona continua, los cuales se encuentran disponibles en distintas fuentes de catálogos de RA, como por ejemplo Guan & Waliser (2015) y Viale (2018).

1.1 Enfoques metodológicos

La identificación de dichos patrones de circulación atmosférica o mecanismos, puede ser realizada de forma subjetiva, o de forma objetiva, a través de técnicas de clasificación y otros métodos de reconocimientos de patrones (Vrac et al, 2007).

Un ejemplo de una clasificación según criterios de agrupación más tradicionales son los estudios que segregan en base a selección geográfica, por ejemplo, Benedict et al., (2019a), el cual selecciona eventos de RA que hacen contacto continental específicamente en la parte sur de California y la parte norte de Oregón. Otro ejemplo de clasificación subjetiva son aquellos estudios donde se clasifica en función de alguna característica de un evento, como, por ejemplo, Garreaud (2013) donde se establecen compuestos de condiciones atmosféricas para tormentas, en base a si es que se trata de eventos cálidos o fríos. Sin embargo, al intentar analizar de forma simultánea todos los eventos de RA que han impactado sobre cierta región, establecer a priori un criterio en base a experiencia previa o en base a criterios geográficos posee ciertas desventajas. En el caso de aludir a experiencia previa, si bien se puede llegar a identificar fenómenos ya reconocidos, se pueden omitir potencialmente otros mecanismos de los cuales no se tenga conocimiento. Similarmente, al separar geográficamente pueden estar agrupándose más de un mecanismo, al suponer que todos los eventos que impactan en un lugar tienen su origen en el mismo patrón atmosférico. En este contexto, surgen como una herramienta de potencial utilidad los algoritmos de clasificación.

Existen tres tipos de algoritmos de clasificación: supervisados, semi-supervisados y no supervisados. Los de tipo supervisado y semi-supervisado requieren conocer a priori alguna clasificación de los elementos a clasificar, y con frecuencia son usados para clasificar nuevos elementos en base a un algoritmo entrenado. Por su lado, los algoritmos no supervisados, consisten en un proceso de aprendizaje que permita identificar estructuras en un conjunto de datos no categorizados. Un ejemplo particular de este tipo de algoritmos es el denominado Modelo de Mezclas Gaussianas (GMM, por sus siglas en inglés).

Este tipo de clasificación no supervisada ha sido utilizada en múltiples campos de las ciencias, como por ejemplo ecología (Ullah & Mengersen, 2019), identificación de imágenes (Jiang et al, 2019), astronomía (Lee et al, 2012; Shin et al, 2009), reconocimiento de emociones (Lanjewar et al, 2015), entre otros. En algunas oportunidades, este tipo de algoritmos se ha utilizado para realizar clasificaciones sin un número determinado de grupos objetivos, por ejemplo al analizar secuencias de genoma (Budiarto et al, 2021) o la definición de perfiles de usuarios en lo referente a consumo eléctrico (Li et al, 2018). En ejemplos aplicados a ciencias de la tierra, Kuyuk et al (2012)

clasifica registros de eventos sísmológicos cerca de Estambul, con el fin de lograr diferenciar si es que se trata de un evento de terremoto o una explosión detonada en canteras cercanas. Esto representa un ejemplo de cómo es posible diferenciar, en base a información objetiva cuantitativa, diferentes fenomenologías que se representan de forma similar.

A nivel de ciencias atmosféricas, un primer acercamiento se realiza en Smyth (1997), donde se busca caracterizar patrones atmosféricos de gran escala o clusters en los campos de altura geopotencial – en este caso particular de z_{700} -, y donde concluye, a través del uso de técnicas de agrupamiento de mezclas gaussianas con validación cruzada, que existen 3 patrones en el hemisferio norte, y que cada uno de ellos posee una interpretación física. Los patrones obtenidos se presentan en el sector a la Figura 1.4. Smyth (1999) utiliza una clasificación basada en una combinación lineal de k componentes, sobre las anomalías de geopotencial en 700hPa en 44 periodos invernales, donde el número k de componentes es definida *a posteriori*, ya que el método de clasificación permite establecer la probabilidad de pertenencia de cada elemento a un *clúster* en particular. Finalmente, se confirman los mismos 3 grupos identificados en Smyth (1997). Los resultados presentados son concordantes con patrones con lo presentado en Cheng & Wallace (1993), a pesar de que dichos resultados se basan en “una combinación de técnicas de remuestreo sofisticado y juicio subjetivo” (Smyth et al., 1999).

Adicionalmente, Smyth et al. (1999) contribuye otros aspectos destacables. Por un lado, se tiene que posterior a la clasificación hemisférica, un análisis segregando por sector oceánico permite identificar configuraciones atmosféricas reconocidas tales como la Oscilación del Pacífico Norte (PNA, por sus siglas en inglés) (Lau et al, 1994). evidenciando que es posible identificar distintas fenomenologías dependiendo del sector de análisis que se ponga en observación. Por otro lado, previo a realizar el análisis de clasificación, reduce la dimensionalidad del problema a través del uso de un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) (Maćkiewicz & Ratajczak, 1993) , lo que también es utilizado en Liu et al (2003) en un análisis de clasificación por medio de modelos de mezclas de distribución.

Vrac et al. (2007) aplica procedimientos de clasificación similares a Smyth et al. (1999) pero extiende el análisis en distintas dimensiones, con la finalidad de validar la capacidad de modelos atmosférico-oceánicos de reproducir estructuras claves que influyen el clima regional. En lugar de usar solo el par más relevante de las componentes ortogonales, utiliza tantas dimensiones como sean necesarias para explicar un 99% de la varianza tras aplicar una descomposición en PCA. Luego, realiza varios análisis de sensibilidad de los métodos de clasificación en función de la información de entrada, utilizando más de un reanálisis como base, para verificar la influencia de la resolución espacial. En la Figura 1.4b se muestra a modo de ejemplo los cinco patrones estacionales identificados de geopotencial en 700hPa, en base la información del reanálisis ERA40, durante el periodo 1980-1999, mediante un método de mezclas de distribuciones. Huth et al. (2008) presenta una revisión de distintos métodos de clasificación y aplicación de distintos tipos de categorización, consolidando la utilización de técnicas de agrupamiento como una herramienta útil para la clasificación de patrones de circulación atmosférica.

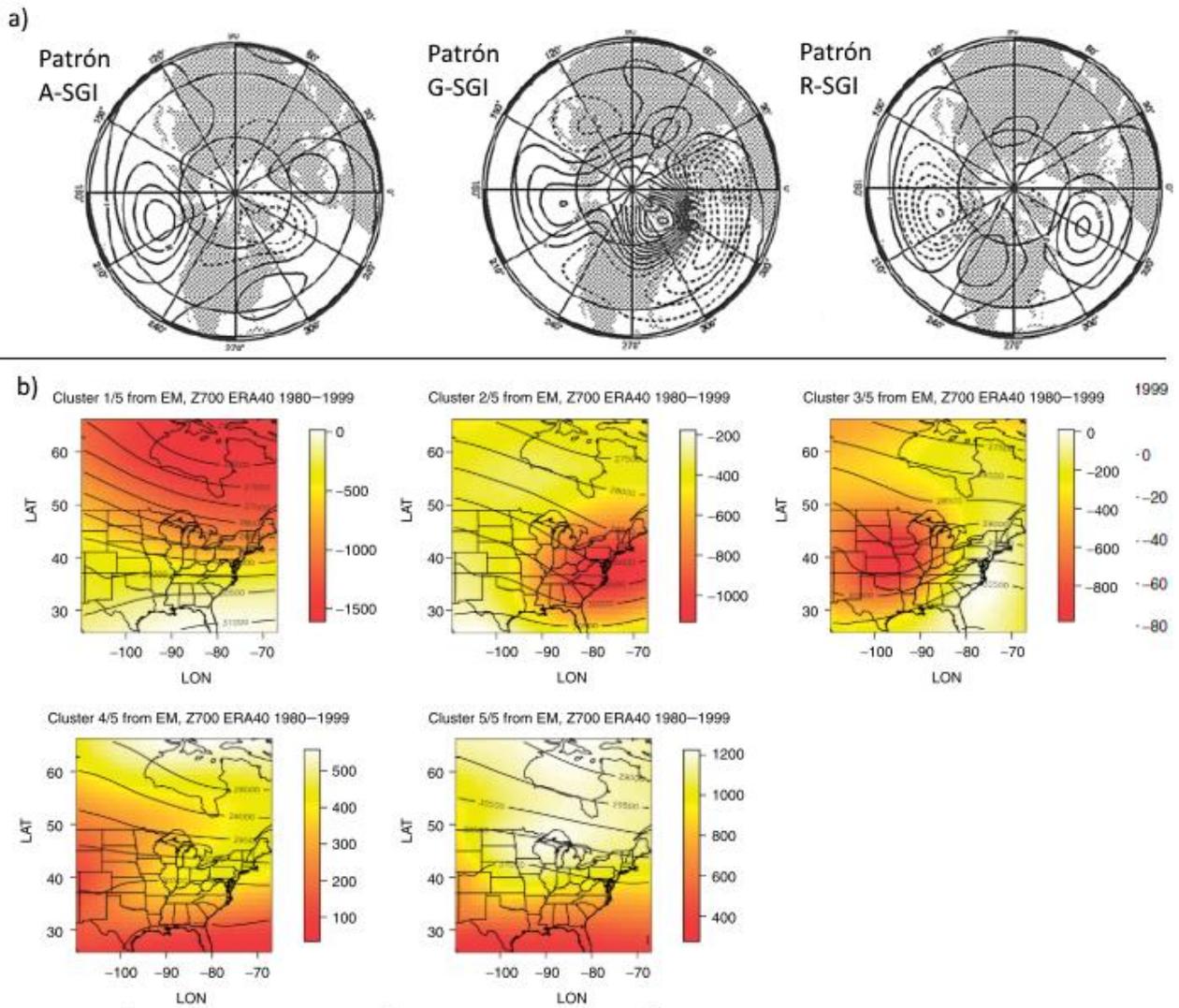


Figura 1.4. (a) Patrones identificados de z700 en el estudio de Smyth et al (1997), usando el algoritmo de clasificación GMM. (b) Cinco patrones primarios identificados usando el algoritmo EM tomando como base el campo de Z700 del reanálisis de ERA40. Los contornos representan las líneas de geopotencial medio, mientras que los contornos coloreados las anomalías respecto a los valores climatológicos, según los resultados obtenidos en Vrac et al. (2007).

Sin embargo, la aplicación de este tipo de técnicas de clasificación no está limitada a casos generales. Su uso también puede considerarse en contextos específicos, donde se cumple una cierta condición, pero no se tengan claros los mecanismos físicos asociados que la desarrollan. Un buen ejemplo de eso se presenta en Miao (2017), donde a través de la clasificación de patrones atmosféricos en el periodo estival, se identificó una relación directa de tres de los patrones encontrados con episodios de alta contaminación. Dichos patrones representan condiciones que facilitaban el transporte de aire contaminado desde zonas industriales a zonas más residenciales, gatillando así los episodios de alerta ambiental.

Considerando estos antecedentes, resulta factible plantear un diseño experimental que permita desarrollar una clasificación objetiva de las condiciones de circulación atmosférica que se encuentran presentes al momento de la ocurrencia de un RA. Una clasificación de este tipo permite que se eliminen sesgos subjetivos, así como también la identificación de patrones subyacentes que no son necesariamente evidentes. Los

resultados de este proceso de clasificación permiten obtener una base sobre la cual es posible realizar diagnósticos de mecanismos o patrones de circulación atmosférica conducentes a la ocurrencia de eventos de RA.

El estudio de estos mecanismos es algo que no ha sido abordado en gran profundidad, y representa un aspecto clave en la comprensión de los RA. Habiéndose desarrollado bastante trabajo descriptivo sobre la frecuencia y consecuencias de este tipo de eventos, el identificar correctamente los patrones de circulación atmosféricos asociados a ellos permitirá profundizar los análisis que se realicen de ellos, sentando las bases para estudios más específicos, tales como comprender variaciones en su desarrollo, las razones de la ocurrencia de eventos extremos, su correcta representación modelos de circulación atmosférica global o las potenciales variaciones esperables bajo un contexto de cambio climático. Dicho esto, se plantea el desarrollo de esta tesis como un estudio que contribuya a la identificación de dichos mecanismos atmosféricos mediante la utilización de técnicas de clasificación no supervisada.

1.2 Objetivos

El presente trabajo de tesis busca resolver los siguientes objetivos:

1.2.1 General

Identificar, describir y caracterizar uno o más mecanismos de circulación atmosférica asociados a la ocurrencia de eventos de RA que realicen contacto con la superficie de Chile continental, así como las precipitaciones resultantes de esta interacción.

1.2.2 Específicos

1. Plantear un esquema en función de variables relevantes asociadas a eventos de RA que permita desarrollar una clasificación objetiva no supervisada de categorías
2. Identificar patrones de circulación atmosférica usando como base los grupos de clasificación obtenidos en el punto anterior.
3. Caracterizar los mecanismos identificados a nivel de circulación atmosférico e identificar posibles teleconexiones y similitudes de ellos con otras señales atmosféricas u oceánicas relevantes.
4. Caracterizar las consecuencias en el régimen de precipitaciones y eventos extremos de precipitación de cada mecanismo.

2 DATOS Y PROCEDIMIENTOS

Se presenta en esta sección toda la información base utilizada en el desarrollo de este trabajo.

2.1 Catálogo de ríos atmosféricos

2.1.1 Información disponible en el catálogo

Para identificar la ocurrencia histórica de ríos atmosféricos se recurre a los catálogos de eventos generados en base a la metodología propuesta en Guan & Waliser (2015).

El algoritmo de detección tiene como objetivo identificar la ocurrencia de RAs y utiliza como base los campos de transporte integrado de vapor (IVT, por sus siglas en inglés). El algoritmo consiste en identificar regiones que cumplen con ciertas características propias de la definición de un RA. Los requerimientos que plantea este algoritmo en la identificación de un RA se presentan en la Tabla 2.1.

Característica	Requerimiento
Intensidad de IVT	se requiere que el IVT del punto de grilla sea mayor que el máximo entre $100 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ y el percentil 85 de IVT calculado para dicho punto.
Dirección	IVT medio del RA dentro de los 45 grados de orientación de la forma del RA y con una componente apreciable hacia el polo.
Geometría	la longitud del eje principal del elemento identificado como RA debe tener una longitud de al menos 2.000 km, y se debe cumplir una razón > 2 entre longitud/anchura del AR.

Tabla 2.1. Requerimientos del algoritmo de detección de Guan & Waliser (2015) para considerar que un pixel presenta condiciones de RA. Fuente: Guan&Waliser (2015).

La aplicación de este algoritmo se realiza en cada instante de tiempo. Dado que este procedimiento se puede realizar sobre cualquier tipo de reanálisis, existen diferentes versiones asociadas a diferentes productos de reanálisis, los cuales se presentan en la Tabla 2.2.

Reanálisis	Lat x Lon	Resolución temporal	Período
CFSR	0.5x0.5/1.5x1.5/2.5x2.5	6h	1979-2015
ERA-Interim	1.5 x 1.5	6h	1979-2019
MERRA2	0.5 x 0.625	6h	1980-2019
NCEP-NCAR	2.5 x 2.5	6h	1948-2019

Tabla 2.2. Catálogos de ocurrencia disponibles

En particular para este trabajo, se utiliza la versión desarrollada en base al reanálisis MERRA2 (Gelaro et al., 2017), el que se destaca por ser el que presenta la mejor resolución espacial.

Uno de los principales beneficios obtenidos con esta metodología es que se obtienen las características de cada RA en cada instante de tiempo, y si es que realiza contacto con algún tipo de masa continental. En el panel superior de la Figura 2.1 se presenta un ejemplo de todos los RA detectados en un momento arbitrario, mientras que el panel inferior muestra un ejemplo de la caracterización que es posible realizar aplicando la metodología de Guan & Waliser (2015), para cada RA en cada paso de tiempo.

Sin embargo, presenta la desventaja que al ser un algoritmo aplicado independiente a cada periodo de tiempo no reconoce eventos en tiempos consecutivos como un mismo río atmosférico. Esto implica que es necesario realizar un pre procesamiento para asociar distintos periodos temporales a un mismo RA.

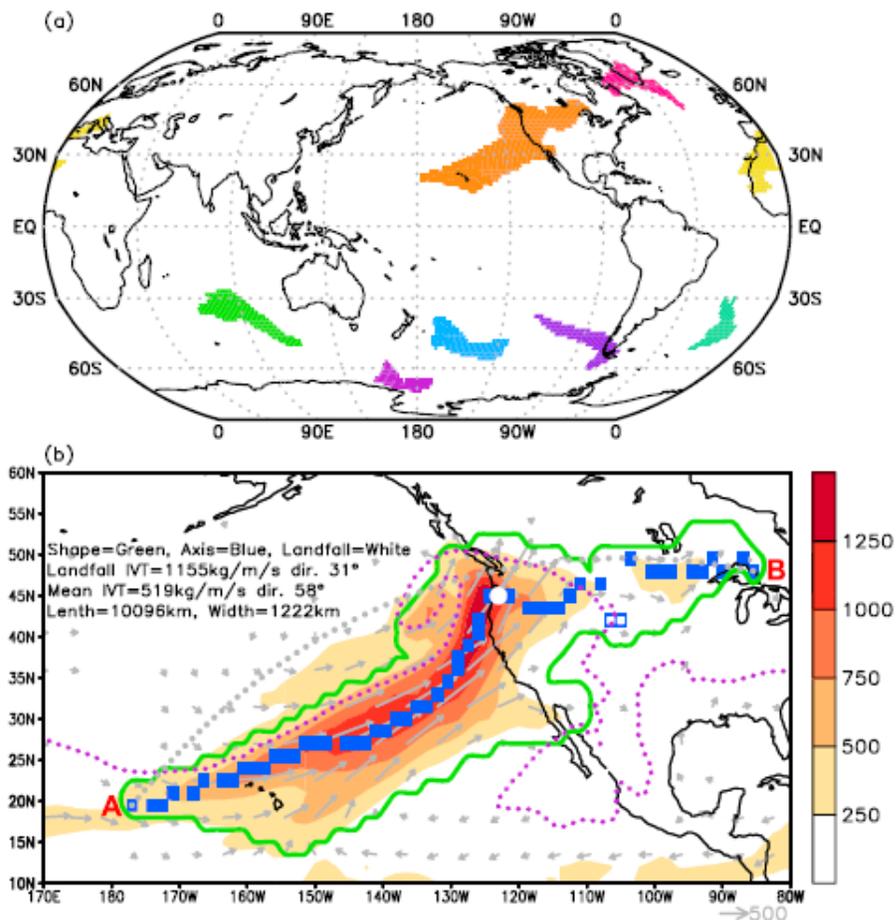


Figura 2.1. (a) Todos los eventos de RA detectados en un paso de tiempo arbitrario de 6h. Cada color indica un RA único. (b) Un evento específico de RA del panel (a), donde se muestra la delimitación del evento (línea verde), su eje principal (línea azul), punto de impacto o contacto continental (punto blanco) y otras características relevantes del evento se describen en el sector superior izquierdo. También se muestran como referencia los vectores de IVT (en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$, flechas grises, se omiten magnitudes menores que $100 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) y su magnitud en contornos coloreados, y la línea de contorno de 20 mm de agua total precipitable (línea punteada morada). Fuente: Guan & Waliser (2015).

2.1.2 Procesamiento del catálogo

Según lo descrito en la sección anterior, la información provista por el catálogo de ríos atmosférico de Guan & Waliser (2015) es un excelente punto de partida para identificar los eventos que impactan a Chile continental. Sin embargo, presenta el inconveniente de clasificar de manera aislada cada periodo de tiempo, sin establecer una conexión entre dos o más periodos consecutivos donde se encuentre presente un mismo elemento de río atmosférico. Adicionalmente, este catálogo presenta información a nivel global, por lo que es necesario filtrar geográficamente solo los elementos relevantes para el estudio.

Considerando los puntos anteriores, previo al uso del catálogo, se debe realizar algunos procedimientos para obtener la información relevante. Los procedimientos aplicados, orden de aplicación, son:

a) Filtro de contacto con superficie continental

Se retienen solo eventos donde hay contacto continental en Chile, entre las latitudes 17°S a 57°S.

b) Identificación de eventos individuales

Dado que no se establece ninguna relación entre distintos instantes temporales, es necesario realizar un proceso de agrupación para identificar un evento de río atmosférico en particular. Dicho proceso consiste en:

- 1) Se toma un instante inicial t_0 de un evento de RA desde el catálogo, el que será considerado su fecha de inicio.
- 2) Se revisa si existe condición de RA para el instante de tiempo t_{0+6h} . En caso de no cumplir con tener condición de RA, se revisa el instante de tiempo subsiguiente t_{0+12h} . Si no se detecta un evento en t_{0+6h} o t_{0+12h} , se procede al paso de cierre.
- 3) En caso de detectarse un RA, se revisa que las latitudes de contacto continental de los eventos de cada instante (t_0 y t_{0+6h} o t_{0+12h} , según corresponda) no tengan una diferencia mayor a 10° de latitud. Si es mayor, se procede al paso de cierre.
- 4) En caso de cumplirse la condición geográfica, se inicia una nueva iteración desde el paso 2, tomando como referencia de tiempo inicial aquel instante t_{0+6h} o t_{0+12h} , identificado. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta que ocurra el proceso de cierre.

El proceso descrito se muestra mediante un diagrama de flujo en la Figura 2.2.

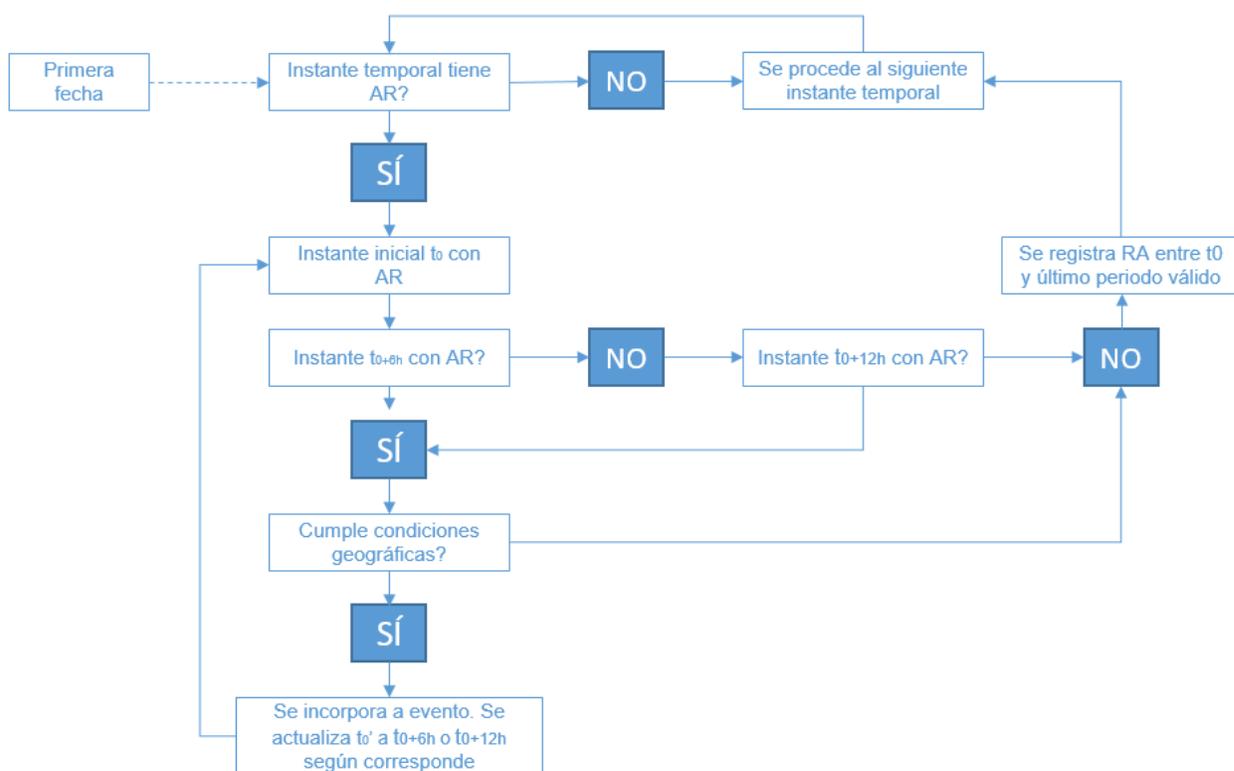


Figura 2.2. Esquema de flujo del procedimiento realizado para identificar eventos continuos de RA. Fuente: elaboración propia.

El proceso de cierre tiene como objetivo caracterizar cada RA identificado, y consiste en:

- 1) se calcula el periodo de tiempo entre t_0 y el último periodo donde se identificó un RA. Se asigna este valor como duración del RA, asociado al instante t_0 .
- 2) Se remueven del catálogo todos los instantes de tiempo entre t_0 y el último instante de tiempo que cumplió las condiciones 2 y 3.
- 3) En caso de no identificarse un instante de tiempo adicional a t_0 que cumpla con las condiciones, se le asigna una duración de 6 horas consecuente con la resolución temporal del reanálisis con el cual se procesó el catálogo.
- 4) Se comienza nuevamente el proceso iterativo desde el paso 1, utilizando como t_0 el instante de tiempo del siguiente evento de RA del catálogo, posterior al evento recién identificado.

2.2 Campos atmosféricos

La información de campos atmosféricos fue obtenida desde el reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), para el periodo comprendido entre 1980 y 2018. Estos datos poseen una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y se encuentran disponibles con resolución temporal horaria. Sin embargo, la información obtenida se obtuvo con una cadencia de 6 horas, coherente a los instantes de tiempo en que se basa el desarrollo del catálogo de eventos de RA. Los datos utilizados de este reanálisis se presentan en la Tabla 2.3.

Variable	Resolución Espacial	Niveles Verticales [hPa]	Resolución Temporal	Unidades
Humedad específica	0.25° x 0.25°	1000-950-900-850-800-750-700-600-500-400-300-200	Horaria	kg kg ⁻¹
Viento zonal				m s ⁻¹
Viento meridional				m s ⁻¹
Transporte de vapor integrado (IVT)		-		kg m ⁻¹ s ⁻¹
Radiación neta en el tope de la atmósfera		-		W m ²

Tabla 2.3. Datos obtenidos desde el reanálisis ERA5, entre 1980 y 2019.

El uso de este reanálisis se justifica en su resolución espacial, la que permite un mejor análisis de los campos en planos horizontales como verticales. Según lo descrito en Hersbach et al. (2020), la variabilidad de baja frecuencia queda bien representada desde 10 hPa hacia abajo, y se encuentran similitudes en las anomalías de temperaturas entre este reanálisis y otros tales como ERA-Interim (la versión predecesora de ERA5, (Dee et al., 2011)) y MERRA2. Esto resulta relevante debido a que la versión utilizada del catálogo de ríos atmosféricos de (Guan & Waliser, 2015) identifica condiciones de ríos atmosféricos utilizando los campos de MERRA2. La buena correlación reportada entre ambos modelos permite suponer que los RAs identificados en base a MERRA2 son coherentemente identificados en los campos correspondientes de ERA5.

2.3 Precipitaciones en Chile continental – CR2MET

Se utiliza como referencia de precipitaciones el producto CR2MET (Boisier et al., 2018), el cual es un producto meteorológico grillado, para todo el territorio nacional con una resolución espacial de 0.05°x0.05° (celdas de aproximadamente 5x5 km) y una resolución temporal diaria. Tiene información disponible desde el 1 de enero de 1979 hasta el 30 de abril de 2020.

Este producto representa el estado del arte en lo referente a información meteorológica grillada a nivel nacional y fue utilizado como base en el desarrollo de la actualización de las distintas etapas del Balance Hídrico Nacional, en todas sus etapas (DGA, 2018, 2019b, 2019a). La versión utilizada corresponde a la versión 2.0, la cual se desarrolló en base a la información de campos meteorológicos del reanálisis ERA5, registros de estaciones pluviométricas e información topográfica.

2.4 Modos de variabilidad climática global

Como información complementaria para la caracterización de los mecanismos, se incorporan valores de distintos modos de variabilidad climática global, principalmente asociados a señales oceánicas (ENSO, PDO, SAM) pero también referentes a la actividad convectiva tropical (MJO). Los índices seleccionados han sido identificados como potencialmente influyentes en el desarrollo de eventos de precipitación a lo largo de Chile continental. Se presenta a continuación una breve descripción de cada índice.

2.4.1 Oscilación de Maden-Julian (MJO)

La fase y amplitud de la oscilación de Maden-Julian, la componente principal de la variabilidad tropical intra-estacional se basa en el índice multivariado en tiempo real (RMM, por sus siglas en inglés) (Wheeler & Hendon 2004). El índice RMM define la evolución de la MJO como un ciclo de ocho fases de acuerdo a la ubicación de anomalías convectivas de gran escala y asociadas a cambios en el cizalle de movimientos ascendentes. Los valores del índice RMM son obtenidos del Centro Australiano de Investigación del Tiempo y Clima¹.

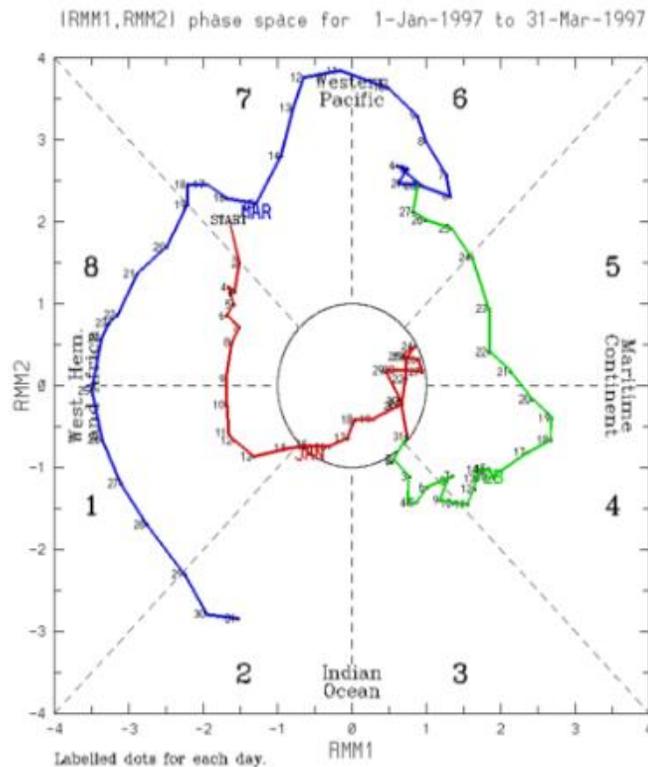


Figura 2.3. Ejemplo de la evolución de las fases de MJO para el primer trimestre del año 1997. Se muestra en rojo la serie de enero, en verde la de febrero y en azul la de marzo. Fuente: Bureau of Meteorology, Australia.

2.4.2 Oscilación del Sur de El Niño (ENSO)

La Oscilación del Sur de El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) es un patrón climático recurrente que consiste en oscilaciones de la temperatura superficial del mar en la zona centro y este del Océano Pacífico. Presenta fases donde la anomalía es positiva (en cuyo caso se conoce habitualmente como fase de Niño) y otras negativas (en cuyo caso es conocida como fase de La Niña). Esta oscilación afecta directamente la distribución de precipitaciones en los trópicos, pero también guarda relación con variaciones en el clima local y condiciona el régimen de precipitaciones de las zonas centro, sur y austral de Chile (Campos, 2020; Pittock, 1980) y en todo el hemisferio sur (Garreaud & Battisti, 1999).

Este fenómeno se caracteriza mediante un índice calculado a partir de promedios trimestrales de anomalías de temperatura superficial del mar en la región de El Niño 3.4

¹ Data descargada desde: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealtime.txt>

(5N-5S, 170W-120W). La información fue obtenida directamente desde CPC-NOAA, y fue calculado utilizando la base de datos ERSST v5 para el periodo 1980-2018.

2.4.3 Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) se define por el patrón principal (EOF) de anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST) en la cuenca del Pacífico Norte (típicamente, hacia los polos de 20°N), aunque también presenta una imagen de espejo débil de estas anomalías en la cuenca del Pacífico Sur. La fase positiva de la PDO también está asociada con anomalías positivas de TSM en el Pacífico tropical central y oriental, zonas que presentan teleconexiones con el clima de Chile continental. Usualmente, se describe como un patrón de variabilidad climática del Pacífico similar a El Niño, pero de larga duración (Mantua et al, 1997). En general, el patrón espacial de la DOP se asemeja al de ENSO. La mayor distinción entre la DOP y ENSO son sus escalas de tiempo: mientras que ENSO es principalmente un fenómeno interanual, la PDO tiene una escala decenal.

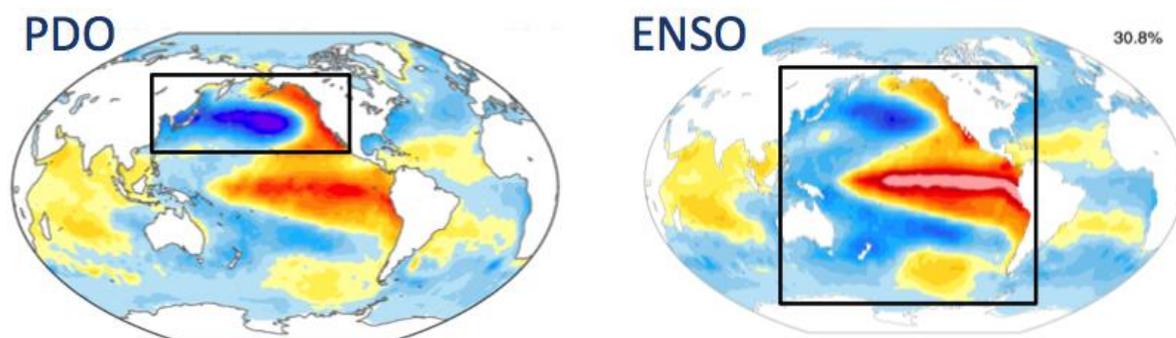


Figura 2.4. Comparación entre los patrones de anomalías de PDO y ENSO en sus fases positivas. Fuente: adaptado de Deser et al, 2016.

Se cuenta con información de este índice según lo calculado por el NCEI². El cálculo de este índice se basa en la reconstrucción ampliada de SST de NOAA (ERSST Versión 5). Se construye haciendo una regresión de las anomalías ERSST contra el índice PDO de Mantua (Mantua, 1999) para el periodo de información coincidente, la cual es posteriormente aplicada a todo el periodo para calcular un mapa de regresión PDO para las anomalías ERSST del Pacífico Norte extendido hasta 2021. Las anomalías ERSST luego se proyectan en ese mapa para calcular el índice NCEI. Esta reconstrucción presenta una excelente correlación con el índice PDO de Mantua, con lo cual se obtiene información para este índice.

2.5 Cálculo de climatologías y anomalías

El cálculo de anomalías de una variable requiere en primer lugar que se tenga una serie de valores climatológicos. Para la estimación de esta serie de referencia, se obtiene para cada una de las variables presentadas en la Tabla 2.3, en cada punto de grilla una serie

² Información obtenida desde <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

media anual de frecuencia 6-horaria. Se extraen para esta serie los modos más relevantes que expliquen un 99% de la varianza de la variable por medio de un análisis de armónicos con series de Fourier. En la práctica, esto usualmente involucra no más de 3 o 4 armónicos.

Teniendo estas series de referencia para cada punto de grilla, y para cada variable, se calcula la diferencia entre el valor instantáneo de la variable y su correspondiente valor climatológico, obteniéndose como resultado la serie de anomalías.

2.6 Traza de IVT

Se define una variable de agrupamiento temporal denominada **traza**, aplicada en específico a los campos atmosféricos de IVT. La definición de esta variable se presenta en la Ecuación 2.1:

$$IVT = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{300hPa} qu dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{300hPa} qv dp\right)^2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

El objetivo de esta agregación es que en un solo campo atmosférico se pueda incorporar información de la evolución temporal de la variable. Su formulación matemática se presenta en la Ecuación 2.2. El concepto que busca representar esta variable es el desplazamiento temporal que recorre un RA. Debido a la forma en que es calculada, al graficarse muestra de forma visual por donde pasó el flujo de vapor de agua.

$$IVT_{traza_T} = \sum_{t_0=t_{contacto}-T}^{t_{contacto}} IVT_t \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

IVT_t : corresponde al valor de transporte de vapor de agua en el instante t.

$t_{contacto}$: es un instante de tiempo donde se ha identificado que un evento de RA hizo contacto con la superficie continental.

T : es el periodo de tiempo sobre el cual se agregará.

Este campo se calcula solo para las fechas identificadas tras el procesamiento del catálogo, tomándose las fechas identificadas como la variable $t_{contacto}$ de la ecuación anterior. El parámetro T que define el periodo de tiempo sobre el que se agrega condiciona la definición de la variable. Por ejemplo, un valor de T de 4 días tiene como resultado la suma de todos los campos de IVT de los 4 días previos a que el RA haga contacto.

Con el fin de considerar efectos sinópticos del desarrollo de los RA, se calcularon las trazas de 1 día y 4 días. La Figura 2.5 muestra un ejemplo gráfico de cómo se ven comparativamente los campos de IVT al momento de impacto de un RA (panel superior)

y el resultado de calcular las trazas de IVT de 1 día y 4 días (paneles central e inferior respectivamente).

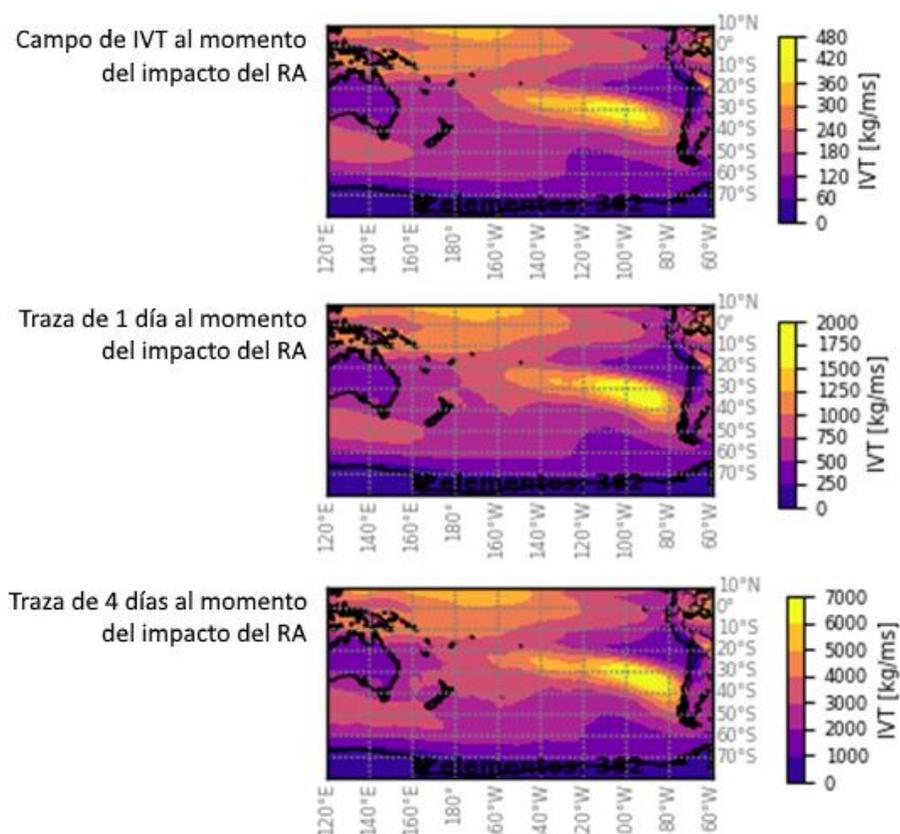


Figura 2.5. Campos de IVT instantáneo (panel superior), traza de 1 día de IVT (panel central) y traza de 4 días de IVT (panel inferior) calculados para el evento del día. Gráficamente, es posible observar como la agrupación temporal de los distintos instantes temporal registra el desplazamiento del RA previo al contacto con la superficie continental.

2.7 Análisis de componentes dominantes en un RA

Según la definición de IVT presentada en la sección anterior, esta variable se calcula como la ponderación entre dos factores distintos: viento y humedad. Así, es posible obtener un mismo valor de IVT con distintas “configuraciones” de estas variables: mayor contribución de la humedad, mayor contribución del viento o contribuciones similares de ambos factores.

Con el fin de caracterizar perfiles distintos de RA, Gonzales (2020) propone particionar el IVT en dos variables complementarias: IVT de viento variable ($IVT u'v'$), manteniendo constante la humedad en valores medios, e IVT de humedad variable ($IVT q'$), manteniendo constante el viento en valores medios.

Para calcularlo, se calcula en cada punto de grilla y en cada nivel de presión los valores climatológicos de \bar{u} , \bar{v} y \bar{q} según el procedimiento descrito anteriormente para el cálculo de climatologías.

Luego, los valores de $IVT u'v'$ e $IVT q'$ son calculados según la Ecuación 2.3 y Ecuación 2.4 respectivamente.

$$IVTq' = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{500hPa} q\bar{u} dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{500hPa} q\bar{v} dp\right)^2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$IVTu'v' = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{500hPa} \bar{q}u dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{1000hPa}^{500hPa} \bar{q}v dp\right)^2} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Para cada RA estudiado, se calculan estas variables en cada punto de grilla que lo conforma. Posteriormente, se promedian todos los valores del RA para obtener un valor representativo del evento. Posteriormente, se estandarizan las muestras de todos los eventos, utilizando los valores medios y desviaciones estándar de cada conjunto. Finalmente, para definir si es que un AR es dominado por la humedad, el viento o es balanceado, Gonzales (2020) define el índice de predominancia de humedad como la diferencia entre el valor estandarizado de $IVTq'$ y el valor de la curva identidad evaluada en $IVTu'v'$.

Estos valores son posteriormente divididos en tercios. El tercio superior define los eventos considerados dominados por la humedad y el tercio inferior corresponde dominados por el viento. El tercio central representa los eventos balanceados. La Figura 2.6 muestra un ejemplo de esta categorización: en tonos azules se representan los eventos dominados por humedad, en naranja los dominados por el viento y en gris los más balanceados. Se destaca adicionalmente un círculo de radio 2, el cual representa el área dentro de la cual quedan cubiertos el 95% de los eventos centrales. Todo punto fuera de esta zona representa un evento destacable, ya sea por una o ambas características (pudiendo ser un evento muy intenso o muy débil).

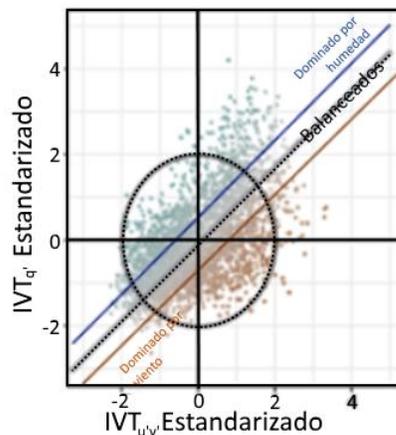


Figura 2.6. Ejemplo de la distribución de valores de $IVTu'v'$ e $IVTq'$ calculados para cada evento de RA en el estudio de referencia. Fuente: modificado de Gonzales et al. (2020).

3 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN

En este capítulo se describe la metodología propuesta para agrupar los campos de IVT asociados a RA para identificar mecanismos atmosféricos conducentes a su ocurrencia.

La metodología se basa en el uso de un algoritmo de clasificación no supervisado sobre campos atmosféricos bajo condiciones de RA, desde el cual se obtiene una clasificación en tantos grupos como se le indique al algoritmo. Usando dichas agrupaciones, se busca identificar los mecanismos que propician la ocurrencia de un evento de RA analizando los compuestos de variables complementarias definidos por dicha agrupación.

El principal desafío de esta metodología consiste en que actualmente no se cuenta con respaldo bibliográfico sobre cuáles son los mecanismos atmosféricos de gran escala que condicionan la ocurrencia de RA. Al carecer de este antecedente, la definición a priori de un número de grupos (o clusters como serán llamados de ahora en adelante) se vuelve la mayor fuente de incertidumbre, pero al mismo tiempo, una oportunidad. Como resultado de cada ejercicio de agrupamiento, se definen el número de grupos solicitado y cada evento es asignado exclusivamente a un clúster.

Usando esta clasificación, con las fechas de los eventos de cada clúster, se calculan compuestos, tanto de las variables de clasificación, como de otras de interés debido a su potencial utilidad para diagnosticar los patrones atmosféricos (por ejemplo, los campos de presión superficial, geopotencial en 500hPa o función corriente en 200 hPa).

Al realizar iterativamente el proceso de clusterización con un número cada vez mayor de clusters, se espera que eventualmente un mismo mecanismo subyacente empiece a ser representado en más de un grupo, con diferencias de intensidad más que de configuración espacial. Así, un número muy alto de grupos eventualmente entregará resultados redundantes pero un número bajo de grupos puede resultar engañoso, ya que podrían estar combinándose dos mecanismos distintos en uno solo. Esto corresponde al principal desafío del desarrollo de esta tesis: la identificación y categorización de dichos mecanismos.

La Figura 3.1 presenta un esquema conceptual de la metodología de trabajo propuesta. A modo de ejemplificar el párrafo anterior, se lleva la atención del lector a la zona donde se generan las categorías. En ella, cada cuadro tiene un borde de color distinto en función de un potencial mecanismo físico representado por dicha categoría. En esta figura se representa que cuando al algoritmo de clusterización se le pide realizar una clasificación de los eventos en 3 de grupos, se representan 3 mecanismos distintos.

Sin embargo, al hacer una clasificación teniendo solo 2 categorías objetivo, los mecanismos representados con bordes gris y amarillo se mezclan en una categoría, mientras que el mecanismo asociado al color naranja se mantiene. Por otro lado, cuando en el proceso de clasificación se definen como objetivo 4 grupos, se observan los mismos 3 mecanismos que cuando se solicitaron 3 grupos, aunque el mecanismo naranja aparece en dos de las categorías definidas. Esto puede ocurrir por una variedad de razones como, por ejemplo, una separación por intensidad, o por latitud de contacto. Este proceso puede repetirse *ad infinitum* hasta un número N de grupos. Sin embargo, a medida que se demandan más categorías, los mecanismos comienzan a repetirse o comienzan a identificarse eventos muy particulares en micro-categorías, con un número muy menor de eventos.

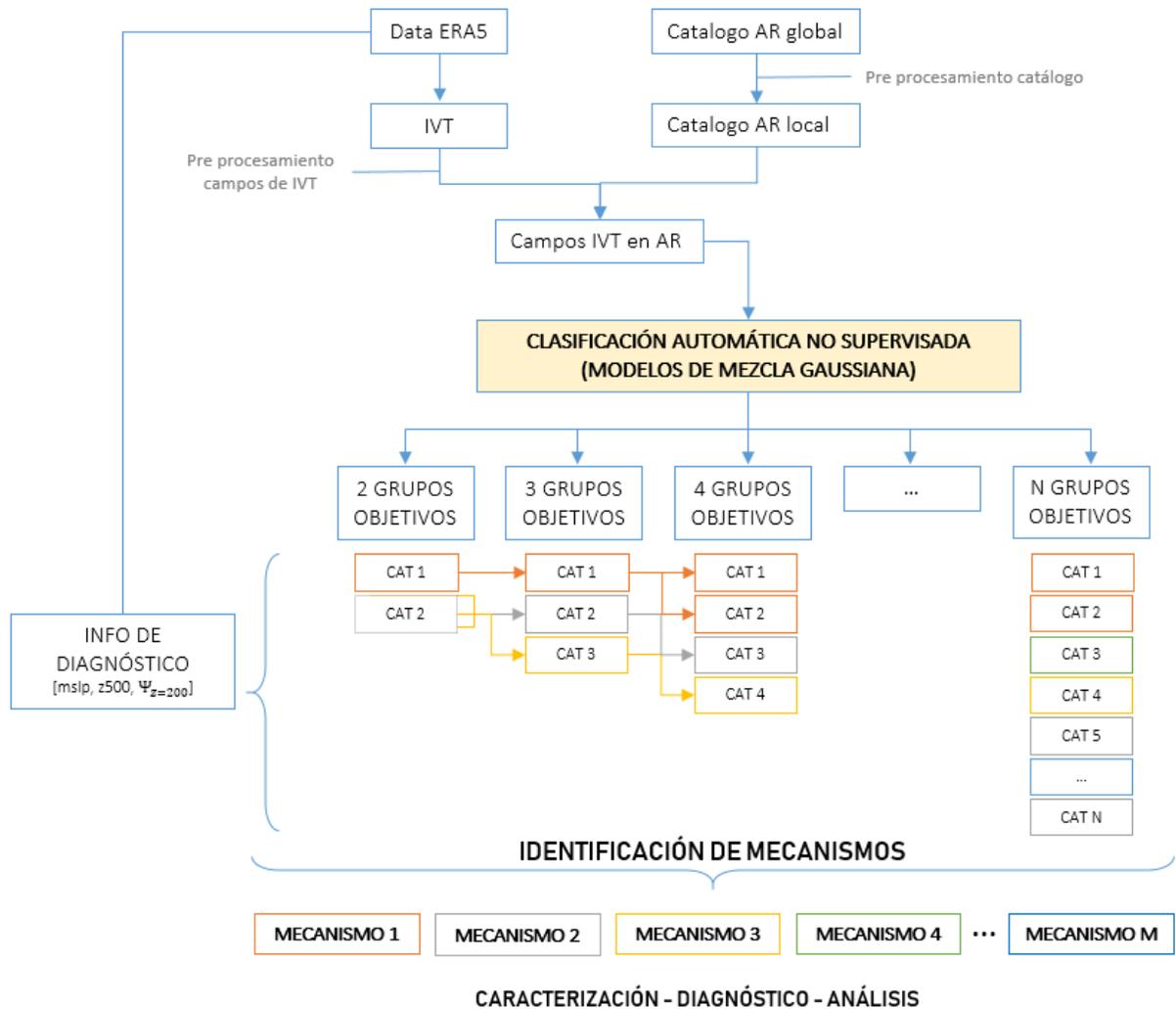


Figura 3.1. Esquema general de la metodología propuesta para la identificación de mecanismos atmosféricos que propician la ocurrencia de eventos de RA.

Así, el proceso de identificación de mecanismos debe ser realizado de forma supervisada. El número de grupos objetivo es variable y en función de lo que se introduzca como parámetro, el algoritmo de clasificación entrega tantos grupos como le sean solicitados. La correcta identificación de mecanismos coherentes, identificables en clasificaciones realizadas con distintos números objetivos de grupos, y su posterior caracterización, diagnóstico y análisis corresponde al objetivo principal de este trabajo.

3.1 Algoritmo de clasificación: GMM - Modelos de Mezcla Gaussiana

La metodología propuesta usa como algoritmo núcleo una técnica de clasificación automática no supervisada llamada Modelos de Mezclas Gaussianas (GMM, de ahora en adelante, por sus siglas en inglés, *Gaussian Mixture Model*) (McLachlan, 1988). Este tipo de técnicas han sido utilizados en diversos ámbitos científicos con relativo éxito,

teniéndose ejemplos de usos en ecología (Ullah & Mengersen, 2019), identificación de imágenes (Jiang et al, 2019), astronomía (Lee et al., 2012; Shin et al., 2009), entre otros. En el ámbito de las ciencias atmosféricas, se ha utilizado este algoritmo exitosamente para la identificación de patrones atmosféricos de geopotencial en el hemisferio norte (Smyth et al., 1997, 1999), con estudios posteriores que ampliaron dicho análisis a través de la incorporación de técnicas de refinamiento de la información de entrada como la aplicación de un análisis PCA a la información de entrada (Vrac et al., 2007). Este tipo de análisis demuestra que es posible utilizar este algoritmo sobre campos atmosféricos completos de grandes dimensiones. Otro ejemplo de aplicación de este algoritmo en ciencias atmosféricas corresponde a su uso en la identificación de tipos de masas de aire (Pernin et al., 2016), donde se explota particularmente la propiedad de este algoritmo de entregar la probabilidad de pertenencia de cada elemento a cada uno de los grupos definidos, lo que lo diferencia de otros algoritmos de clasificación como agrupación jerárquica o *k-means*.

Un modelo de mezcla gaussiana es un modelo probabilístico que supone que, dado un conjunto de n puntos $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ de dimensionalidad m , todos los puntos son generados de una mezcla de un número finito de distribuciones gaussianas con parámetros desconocidos. Este algoritmo tiene por objetivo identificar las distintas distribuciones que están presentes en este conjunto original de puntos, a través de la estimación de parámetros que definan distribuciones tales que cada punto pertenezca a una de ellas.

En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo en un espacio unidimensional donde se identifican tres distribuciones, cada una definida por sus propios estadísticos μ_i y σ_i . El algoritmo GMM es capaz de estimar los parámetros que definen dichas distribuciones, aunque estima exactamente el número de distribuciones que el usuario le solicita.

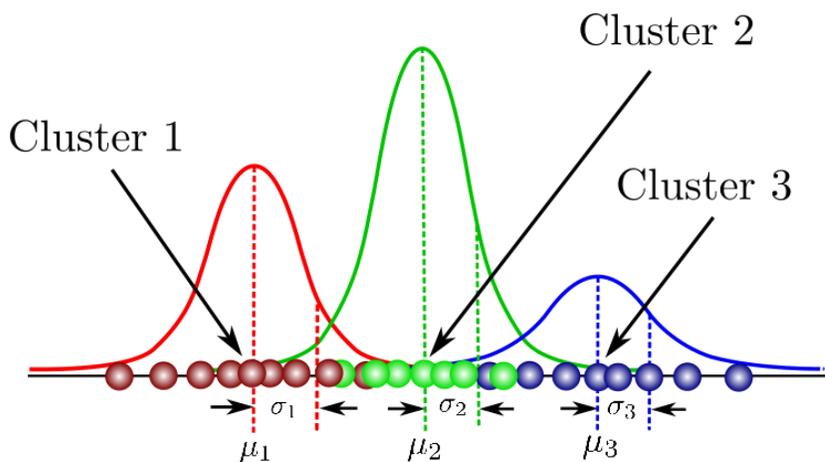


Figura 3.2. Ejemplo de clasificación de puntos por medio del algoritmo GMM. Habiendo definido un total de tres distribuciones a priori, el algoritmo estima tres sets de parámetros que definen distribuciones las cuales en conjunto podrían generar la muestra de entrenamiento. Fuente: *TowardsDataScience.com*

Para estimar los parámetros de cada distribución, la técnica de GMM usualmente utiliza el algoritmo de Maximización de la Esperanza (EM, por sus siglas en inglés, de *expectation maximization*), el cual es la forma más frecuente de determinar sus valores. Sin embargo, este algoritmo requiere saber a priori el número real de distribuciones que se tienen. Si es

que esta información no se encuentra disponible, su uso en la resolución de este problema no es directo (Peng, 2017).

3.2 Aplicación de GMM al problema de clasificación de RA

En el desarrollo de este trabajo, los puntos por agrupar corresponden a los campos y trazas de IVT de cada RA filtrado del catálogo de Guan & Waliser (2015).

Al utilizar estos campos como variable de agrupación, se obtiene una clasificación semi-automatizada de los eventos de RA, donde a cada evento se le asigna una categoría. Esto permite el cálculo de compuestos medios no solo de las variables utilizadas en la clasificación, sino que, de cualquier otra variable atmosférica. Para ello, basta utilizar solo los campos de las fechas correspondientes a los eventos asignados a cada categoría.

En teoría, esta clasificación automática permite identificar patrones de circulación atmosféricos de gran escala que conducen a la ocurrencia de un RA, al identificar diferencias en los campos de circulación utilizados como base de clasificación que en un análisis manual no sería factible realizar de forma objetiva sobre una cantidad similar de elementos.

Sin embargo, la metodología presenta, a priori, más de una dificultad y de distinta índole:

- a) La mayor fuente de incertidumbre proviene en la elección del número de categorías a estimar, ya que no se sabe cuántos son los mecanismos asociados a la generación de RA, siendo esta la pregunta a resolver en esta tesis.
- b) Altos requerimientos computacionales, dadas las características de los datos de clasificación.
- c) El tipo de técnica de agrupamiento tiende a definir distribuciones con un número similar de elementos, lo que podría inhibir la identificación de algunos mecanismos observados con menor frecuencia.

Para abordar cada uno de los puntos descritos anteriormente, se realizan los siguientes ajustes:

a) Número de conjuntos desconocidos

La Figura 3.3 muestra un ejemplo gráfico de cómo utilizando un modelo GMM es posible definir, para un mismo conjunto de puntos, diversos números de conjuntos que parecen razonables. En este ejemplo, se solicita se identifiquen dos categorías (panel superior) y cinco categorías (panel inferior), para el universo de puntos a clasificar.

En el panel superior, se ve que el algoritmo GMM identifica dos grupos claramente distintos: una nube de puntos de color azul oscuro, y el conjunto de puntos naranja que parece seguir una tendencia lineal. Estos dos grupos se identifican como la agrupación intuitiva esperable. En el panel inferior, al clasificar en cinco categorías, se observa que la clasificación respeta los dos grupos anteriores, al generar subcategorías que resultan subconjuntos de las originales. Así, donde antes se tenía una nube de puntos, ahora existen dos categorías: nube de punto superior (azul) y nube de punto inferior (amarilla). Así mismo, el grupo de puntos de tendencia lineal, se subdivide en 3 categorías, las cuales podrían definirse como sector inferior (celeste), sector central (naranja) y sector superior (verde). Es posible ver como cada una de estas sub-clasificaciones tiene una base

razonable, aunque en realidad responden a una misma población original que queda bien definida en solo dos categorías.

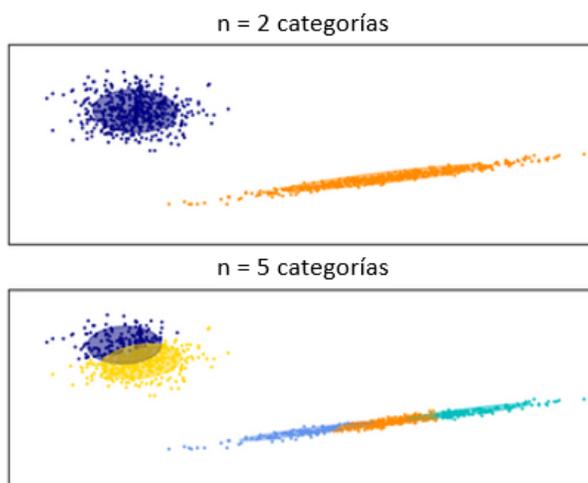


Figura 3.3. Ejemplo de resultados de clasificación de un conjunto de puntos bidimensional, presuponiendo 5 categorías (panel superior) y 2 categorías (panel inferior), utilizando un modelo GMM. Fuente: adaptado de Pedregosa et al. (2011).

En el caso de los eventos de RA, el problema no resulta tan simple. Si bien es posible esperar categorías definidas en función de elementos muy representativos, puede ocurrir que las categorías generadas no sean tan evidentes.

Para abordar esto, se realizan clasificaciones con un número variable de grupos objetivos, variando de 2 a 12 categorías objetivo. Haciendo un símil con el ejemplo anterior, debe existir un número de categorías que represente los mecanismos generales bajo los cuales se observan eventos de RA. Si se solicitan más categorías que ese número, es esperable que se repliquen algún o algunos mecanismos en más de una categoría, diferenciados por alguna característica como, por ejemplo, intensidad del evento.

Por otro lado, al clasificar con un número de categorías inferior al de mecanismos existentes, se obtendrán categorías artificiales donde pueden ocurrir dos cosas: un mecanismo no prevalente es “diluido” entre otros más frecuentes, que mantienen su configuración (aunque un poco “distorsionada” por la inclusión de elementos que no pertenecen a dicho grupo), o bien, se puede llegar a generar un artefacto el cual parece un patrón definido que no lo es.

Para afrontar este problema, una buena solución corresponde a identificar la evolución de cada grupo, al aumentar la cantidad de categorías en una unidad. De esta forma, una categoría o clúster bien definido mantiene la mayor parte de los eventos que la conforman, aun al aumentar las categorías disponibles. Por el contrario, un clúster con una definición poco clara (por ejemplo, uno que muestre poca similitud entre los elementos que lo conforman) ve que los eventos que lo definen al tener n categorías posibles, al ser reclasificados en $n+1$ categorías, se dispersan de forma relativamente uniforme. Un caso especial ocurre cuando un *clúster* se separa en dos grupos relativamente de similar tamaño al aumentar las categorías disponibles, lo cual se interpreta como una subdivisión de un grupo bien definido.

Adicionalmente a revisar la evolución de los elementos, se realiza un análisis de los compuestos asociados a cada categoría de valores absolutos y anomalías de otras variables relevantes, como, por ejemplo, geopotencial en distintos niveles o función corriente.

b) Dimensionalidad del problema

El número de eventos de RA es del orden de 10^3 , y la región de trabajo es del orden $10^2 \times 10^2$, lo cual representa un orden de magnitud conjunto de 10^7 . Este es un problema que se ha reportado anteriormente en la literatura, y donde se ha propuesto como alternativa de solución reducir la dimensionalidad del problema a través de un PCA y luego realizar un ajuste del tipo GMM sobre los datos proyectados en dichos ejes (Liu et al, 2003), incluso sobre campos atmosféricos de hemisferios completos obtenidos desde reanálisis como ERA40 (Vrac et al., 2007).

En el presente trabajo se adopta esta metodología y se vectoriza cada uno de los campos y se procede a realizar un análisis de componentes principales, manteniendo un número de componentes tal que se explique un 99% de la varianza. Este proceso se realiza para cada una de las potenciales variables de clasificación:

- Campo de IVT en el momento en que el RA hace contacto continental.
- Traza de IVT de 1 día, según lo definido en el punto 2.6,
- Traza de IVT de 4 días, según lo definido en el punto 2.6.

Se presenta en la Tabla 3.1 el número de componentes requerido por cada variable para cumplir con la exigencia de explicar un 99% de la varianza. Se presentan dos columnas de datos – Pacífico y Pacífico Oriental - en función de dos regiones que fueron definidas como las posibles áreas desde las que se extrae información para desarrollar la clasificación de los eventos. Más detalles de esto se presentan en la sección 3.3.2 de sensibilidad a la selección del área geográfica de información a clasificar.

Variable	Número de componentes requeridas	
	Pacífico	Pacífico oriental
t_{od} - IVT	1155	467
t_{1d}	810	243
t_{4d}	517	153
Total dimensiones reducidas	2.482	863
Dimensiones originales	260.281	57.600

Tabla 3.1. Número de componentes por PCA requeridos por variables para explicar el 99% de la varianza.

c) Distribuciones podrían dejar afuera ciertos patrones por tener una frecuencia de ocurrencia menor.

Dada la información de entrada, el algoritmo tiende a realizar agrupaciones con un número de elementos similares. Si bien esto no es una propiedad inherente al modelo de clasificación, dada la multidimensionalidad del problema, el algoritmo tiende a mostrar este comportamiento. Esto podría eventualmente traer como consecuencia la omisión de la formación de una categoría que tenga comparativamente pocos eventos. Por ejemplo, resulta razonable suponer que los mecanismos que producen eventos de RA en la zona central son menos frecuentes que los que generan RA en la Patagonia, dadas las frecuencias de ocurrencia en los distintos sectores.

Este problema debe abordarse directamente, ya sea a través de la generación de un alto número de categorías u otro método que permita salvaguardar esta limitación. Se

proponen en particular para solucionar este punto un análisis de sensibilidad asociado al conjunto de eventos de RA a clasificar por el algoritmo, el cual se desarrolla en detalle en la sección 3.3.2.

3.3 Análisis de Sensibilidad

La utilización de GMM requiere tomar una serie de definiciones para realizar el proceso de agrupamiento. Dependiendo de los supuestos que se realizan, los resultados podrían variar drásticamente. Los siguientes parámetros fueron identificados como críticos en los potenciales resultados de agrupación:

- a. Variable de análisis.
- b. Región de análisis.
- c. Método de asociación de momentos con condiciones de RA.
- d. Agrupación geográfica de RA a clasificar.

Es crucial evaluar los impactos de variaciones que se eligen arbitrariamente para asegurar resultados confiables. Se describen a continuación los análisis de sensibilidad desarrollados con este fin para cada una de las variables.

3.3.1 Sensibilidad a la variable de análisis

El agrupamiento por medio de GMM requiere de un conjunto de puntos que puede ser de infinitas dimensiones. Este conjunto de puntos usualmente hace referencia a un tipo de variable. Según lo presentado en el punto 2.6, se definió una variable auxiliar que corresponde a la acumulación de IVT en un periodo de tiempo, denominada traza.

Este periodo de tiempo se define de forma arbitraria, y se da por supuesto que mientras más tiempo se acumule, más información se incorpora sobre la trayectoria que sigue el IVT que define el RA. Sin embargo, dado que los RA ocurren en una escala de tiempo sinóptica, el incorporar periodos muy extensos podría resultar contraproducente. Por otro lado, el análisis más sencillo corresponde a tomar simplemente el campo de IVT al momento de contacto con superficie continental, que sería el equivalente a una traza con periodo de acumulación cero.

Como distintos periodos de acumulación definen campos atmosféricos de trazas con información distinta, existe la posibilidad de que los clústers generados difieran si es que se usa una u otra variable. Además, debido a la dimensionalidad reducida de los campos por medio del proceso de representación por PCA, es posible definir puntos de dimensión compuesta, agrupando los vectores de dos o más variables de un mismo punto.

Con el fin de analizar la sensibilidad del algoritmo a la variable que es utilizada para agrupar, se aplica la misma metodología considerando las siguientes configuraciones:

- a. Campo de IVT instantáneo en momento de contacto.
- b. Traza de IVT de 1 día.
- c. Traza de IVT de 4 días.
- d. IVT instantáneo y traza de IVT de 1 día.
- e. IVT instantáneo y traza de IVT de 4 días.
- f. IVT instantáneo, traza de IVT de 1 día y traza de IVT de 4 días.

El análisis visual de coherencia de distintos números de clusters muestra que no existen mayores diferencias en los compuestos generados posterior a la clasificación. La Figura 3.4 muestra los compuestos de IVT al momento de contacto continental, agrupados según los resultados de clusterizar según la variable el campo instantáneo de IVT en la columna izquierda, y considerando el campo instantáneo de IVT y las trazas de 1 y 4 días en la columna derecha, suponiendo 3 grupos objetivos.

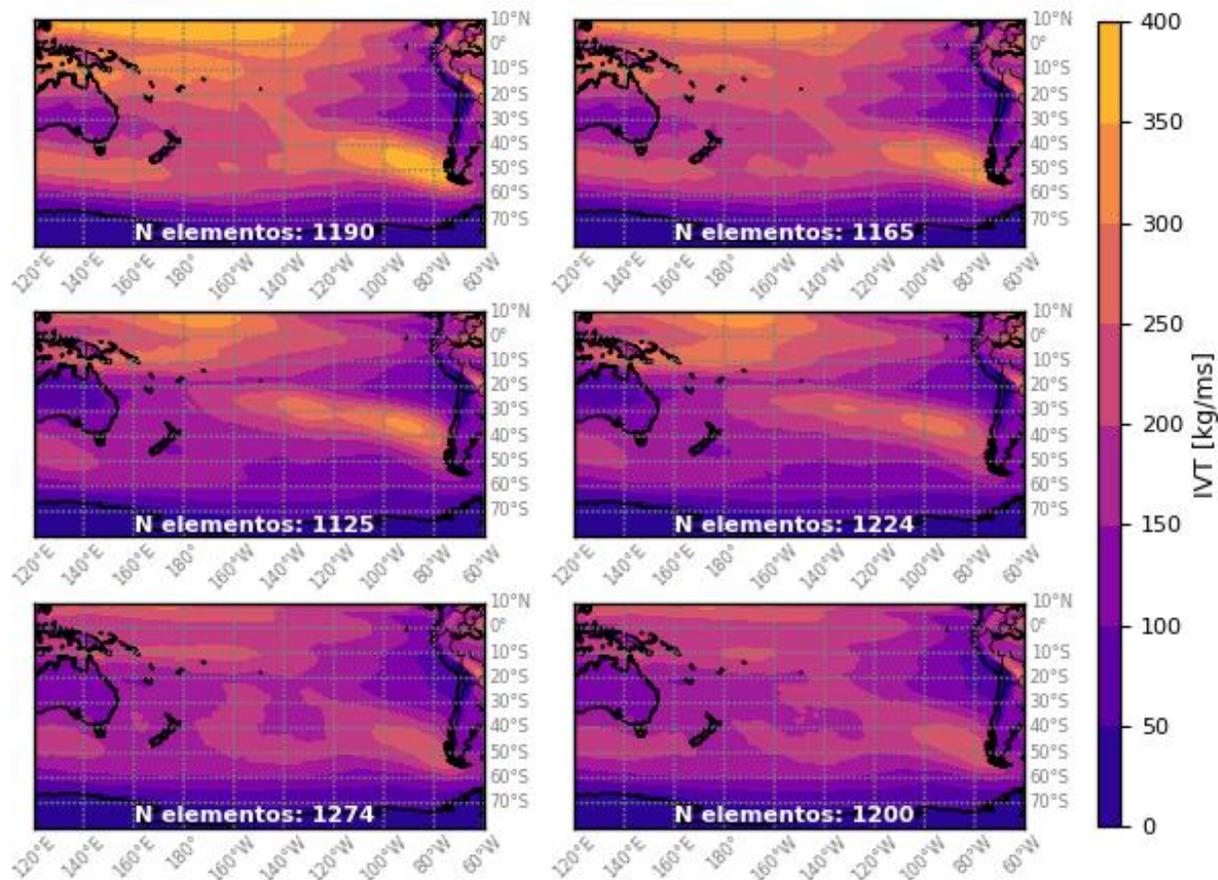


Figura 3.4. Comparación entre resultados de categorías obtenidas utilizando solo los campos de IVT al momento de contacto continental de un AR y las variables conjuntas de IVT instantáneo al momento de contacto y las trazas de 1 y 4 días.

Si bien la clasificación no difiere mayormente basado en un análisis visual, sí existe diferencias en la asignación de algunos eventos. Es razonable suponer que dichas diferencias guardan relación con la información adicional que se incorpora al añadir los campos de trazas, ya sea de 1 día, 4 días o ambos. Se concluye de este análisis que el uso de cualquiera de las variables propuestas no genera grandes diferencias y se opta por utilizar la agrupación de campos instantáneos de IVT, de traza de 1 día y de 4 días en conjunto como variable de agrupamiento, lo que corresponde a la alternativa f de las planteadas.

3.3.2 Sensibilidad a la selección geográfica de elementos

La frecuencia de eventos de RA aumenta latitudinalmente en dirección sur, con un máximo en la región definida aproximadamente entre 42°S y 55°S (Viale et al., 2018). Sin embargo, es en la región al norte de 42°S donde se concentra la mayor parte de la población y actividad humana. En esta zona los RA tienen gran relevancia, ya que generan

tanto impactos benéficos, al ser responsables de la mayor parte del proceso de acumulación de nieve en los Andes (Saavedra et al., 2020), como perjudiciales al estar asociados con eventos de precipitación extrema que eventualmente causas daños sociales (Valenzuela & Garreaud, 2019).

Considerando este antecedente se propone replicar la metodología de agrupamiento general considerando eventos de RA filtrados por zona geográfica. Se realiza un análisis complementario de agrupamiento, para eventos al norte de 42°S (zona 1, Z1 de ahora en adelante) y al sur de 42°S (zona 2, Z2 de ahora adelante), adicionales al análisis general donde se consideran todos los eventos de RA. Las zonas que se propone revisar se presentan en la Tabla 3.2 y guardan directa relación con lo descrito anteriormente.

Nombre	Zona	Límite	Número de eventos
Zona 1	Z1	17°S-42°S	845
Zona 2	Z2	42°S-57°S	2.744
General	G	17°S-57°S	3.589

Tabla 3.2. Definición de zonas geográficas de análisis.

Debido a la diferencia en la frecuencia de eventos por zona, y características propias de la técnica de clusterización utilizada (que tiende a generar grupos con números de elementos similares), existe una tendencia a que los RA de la zona austral condicionen la generación de clústeres en la categoría general. Considerando esto, el análisis por zonas facilita la identificación de mecanismos propios de la zona central de Chile, donde la frecuencia relativa de ocurrencia de RA es menor que en la Patagonia, pero donde generaría más impacto. La Figura 3.5 muestra un ejemplo de los compuestos de IVT al momento de contacto continental, al clasificar en dos grupos los elementos geográficos de las zonas Z1, Z2 y general.

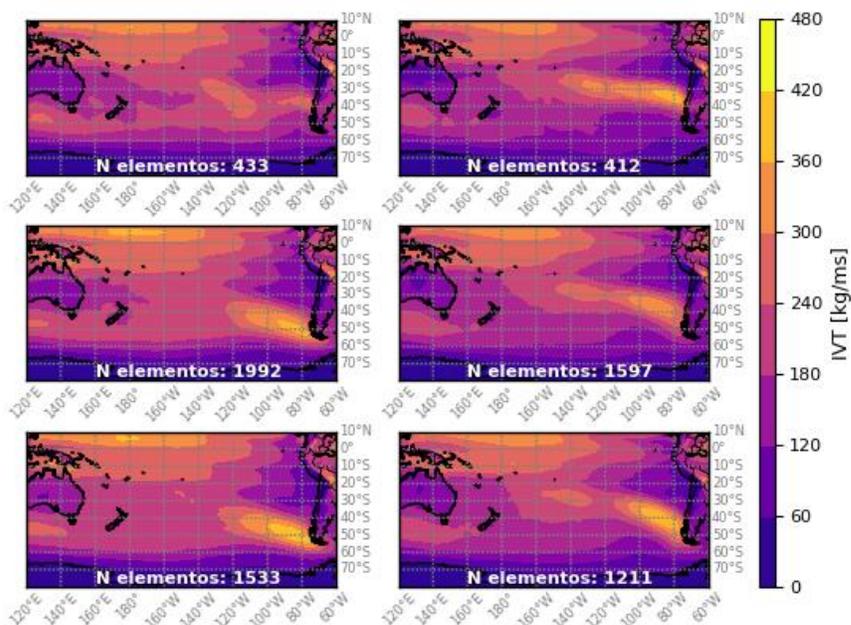


Figura 3.5. Comparación de los clusters generados suponiendo dos grupos objetivos, considerando solo los elementos de la zona 1 (Z1), general (G) y zona 2 (Z2).

Cuando se clasifica con un número bajo de grupos objetivo y equivalente para las tres zonas, los compuestos obtenidos como resultados tienden a presentar similitud entre las zonas G y Z2.

Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de grupos objetivos en la categoría general, se comienzan a identificar categorías con preferencia a Z1, otros con preferencia a Z2 y algunos que incorporan elementos de ambos. Esto refleja que este análisis no genera nuevos patrones, sino que identifica con mayor facilidad patrones que resultaría difícil discernir a priori en un análisis general. La Figura 3.6 muestra un ejemplo de esta idea, graficando los resultados de clasificar las Z1 y Z2 en 3 grupos, y los resultados de clasificar en 6 grupos todos los eventos de RA sin distinción geográfica.

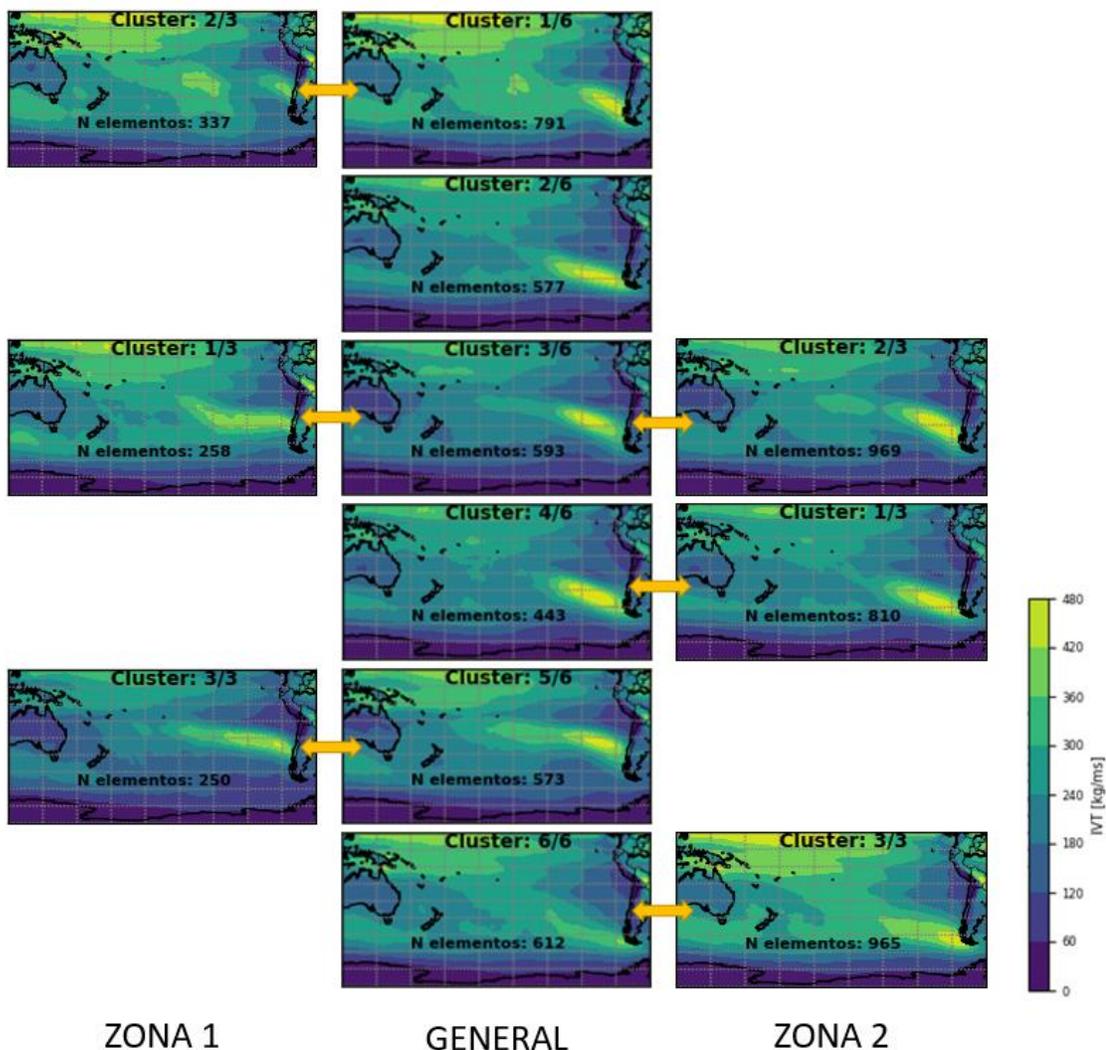


Figura 3.6. Asociación entre los compuestos generados al clasificar en 3 grupos en las zonas Z1 y Z2 y en 6 grupos a nivel general. Se observa que dentro de los compuestos generados a nivel general se replican algunos los compuestos generados según las clasificaciones en zonas específicas. Notar que, en algunos casos, en particular en los compuestos de zona 1, la similitud de los compuestos no resulta tan evidente. Esto se debe en particular a que el número de compuestos objetivo de la categoría general (6 grupos) no logra representar la separación geográfica, por lo que se requiere un número mayor de compuesto en esta categoría para representar los potenciales mecanismos de la zona 1.

Considerando el análisis anterior, para lograr una apropiada y correcta identificación de mecanismos atmosféricos que generan RA se requiere que coherencia entre los compuestos generados a nivel general y de las zonas específicas.

Así, resulta necesario que el número de grupos a generar que se especifiquen como objetivo en el algoritmo de clasificación cuando se aplique sobre la zona general sea tal que logre representar los mecanismos geográficos específicos identificados al aplicar el algoritmo de clasificación en las zonas 1 y 2. Dicho esto, lograr que los compuestos obtenidos de la clasificación general sean coherentes con los compuestos de las clasificaciones regionales de zona 1 y zona 2 se considera un indicio de haber encontrado un número de grupos objetivos que permite una correcta identificación de mecanismos que conducen a la ocurrencia de RA.

3.3.3 Sensibilidad a la región de análisis

El proceso de categorización requiere información de las variables de clasificación. El alcance de dicha información debe cumplir ciertas características para ser de utilidad:

- a) Debe ser información asociada al fenómeno en estudio.
- b) Debe ser limitada de forma tal que no inflencie los resultados con fenómenos que condicionen la clasificación.

Considerando los puntos anteriores, se definen en la Tabla 3.3 dos regiones geográficas para delimitar la información de los campos geográficos utilizados como información base para el proceso de clusterización. (la Figura 3.7 presenta dichas regiones geográficamente).

Área	Longitud	Latitud
1	120°E – 60°W	10°N – 80°S
2	120°W – 60°W	10°S – 60°S

Tabla 3.3. Definición de regiones geográficas delimitantes de la información de entrada al algoritmo de clusterización.

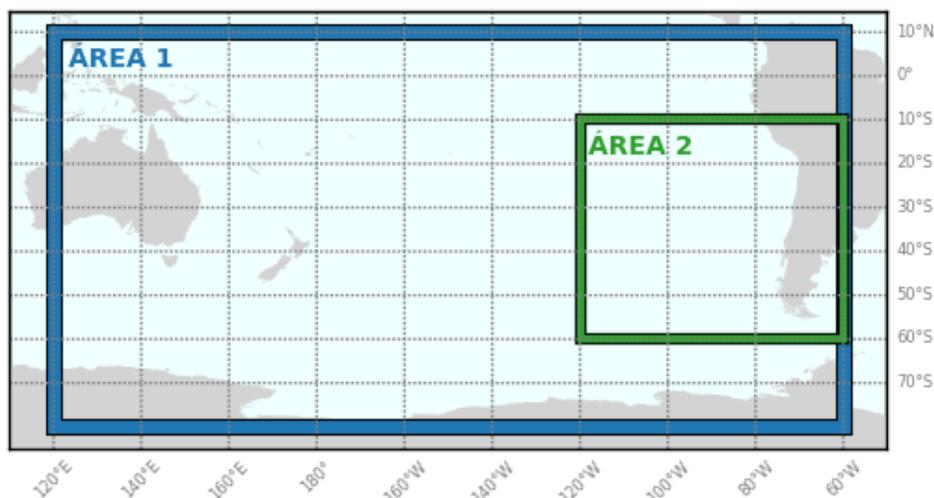


Figura 3.7. Representación gráfica de las regiones geográficas delimitantes de la información de entrada al algoritmo de clusterización.

Tomando como guía los resultados de clasificación usando la zona general de todos los RA, se observa que los compuestos obtenidos al agrupar según las áreas 1 y 2 son similares en la medida que el número de clusters por definir es bajo. Cuando el número de clusters es superior a 5, se observa que la coherencia entre la asignación de grupo de cada elemento es menor.

Un ejemplo de esto se presenta en las matrices de coherencia presentadas en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5. Una matriz de coherencia se define como un instrumento para analizar la similitud de dos clasificaciones distintas. Muestra cuantos elementos de cada categoría de una primera clasificación quedan clasificados en las categorías de otra clasificación realizada con alguna diferencia (la que en este caso corresponde al área de los campos atmosféricos utilizados para la clasificación). En el caso de tener dos clasificaciones que presentan un alto nivel de coherencia, en cada fila y en cada columna debiese existir una celda que concentrara la mayor parte de los elementos. Si es que esto no se cumple, se puede decir que existe poca coherencia entre ambas clasificaciones.

		CATEGORÍA	ÁREA 1	
			CAT 1	CAT 2
ÁREA 2	CAT 1	1401	196	
	CAT 2	831	1161	

Tabla 3.4. Matriz de coherencia de asignación de categoría para eventos de RA en la zona general, predefiniendo la asignación a 2 grupos.

		CATEGORÍA	ÁREA 1					
			CAT 1	CAT 2	CAT 3	CAT 4	CAT 5	CAT 6
ÁREA 2	CAT 1	214	26	106	123	96	28	
	CAT 2	6	187	0	234	38	112	
	CAT 3	193	5	273	17	81	4	
	CAT 4	35	75	117	178	166	220	
	CAT 5	12	104	0	214	46	67	
	CAT 6	33	59	63	98	154	205	

Tabla 3.5. Matriz de coherencia de asignación de categoría para eventos de RA en la zona general, predefiniendo la asignación a 6 grupos.

Como se aprecia en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5, la cantidad de elementos definidos en cada categoría resulta similar entre ambos, cuando las opciones se limitan a dos, aunque incluso en ese contexto se observa que una de las dos categorías presenta una división importante (celda amarilla en la Tabla 3.4). Sin embargo, frente a un número mayor de

alternativas, se observa un número mayor de incongruencias entre las distintas clasificaciones.

Dado que a priori ambas opciones parecen válidas, se estudian ambas configuraciones. En base al comentario final de la sección anterior, se espera que una buena selección de zona geográfica mantenga coherencia en los clusters que se definen entre zonas específicas y la categorización general. Para esto, es posible establecer una matriz de coherencia similar a las presentadas anteriormente, pero estableciendo una relación entre los clusters de la clasificación general (G), y las clasificaciones locales de zona norte (Z1) y zona sur (Z2).

Se espera que, dado un número razonable de grupos en la clusterización a nivel general, las categorías definidas en una clasificación local de zona Z1 presenten coherencia con algunas de las categorías de la clasificación general. Evidentemente, en la clasificación general aparecen algunos grupos que no se observaron en la clasificación local de Z1, por consideraciones geográficas. Sin embargo, en los grupos en que sí se observa coherencia, se espera ver que los compuestos definidos sean relativamente similares. Este mismo análisis resulta válido considerando la clasificación local de Z2.

La Tabla 3.6 muestra los porcentajes de compatibilidad entre los clusters definidos en las clasificaciones locales (donde se definen 5 categorías objetivo), con respecto a la clasificación general (donde se definen 8 categorías objetivo). La diferencia en número de grupo de las clasificaciones locales con respecto a la general radica en que la clasificación general debe ser capaz de identificar mecanismos que se den en ambos grupos de forma pareja, como otros que sean exclusivos de cada categorización local basado en consideraciones geográficas.

La columna central de la tabla es el eje principal: a su izquierda se presentan las categorías con el mayor porcentaje de intersección de eventos con respecto a las categorías de Z1; análogamente, hacia la derecha, se presentan las categorías de Z2. Se define el valor de pertenencia como el porcentaje de eventos de la subcategoría de Z1 o Z2 que se encuentran presentes en la categoría asociada. Por ejemplo, la categoría Z2-51 -es decir, la categoría 1 obtenida al clasificar en 5 categorías los eventos de RA de la zona Z2 - presenta un valor de pertenencia de 63% a la categoría G-81 (es decir, la categoría 1 de un total de 8 definidas en el análisis general). Este valor indica que del total de eventos que fueron asignados a la categoría Z2-51, es posible encontrar un 63% de ellos en la categoría G-81, mientras que el 37% restante se encuentra distribuido en otras categorías.

Este análisis confirma que, dando la posibilidad de que existan un número de categorías suficientes, es posible encontrar coherencia entre las categorías definidas por zona geográfica y una categorización general. Así, es posible encontrar clusters de categoría general que se encuentran relacionados solo a una zona geográfica. Ejemplo de esto es la categoría G-81 solo se asocia con la categoría Z2-51, o la categoría G-82, en la que es posible encontrar el 96% de los eventos que se asignan a la categoría Z1-54.

Categoría de Z1	Pertenencia	Categoría General	Pertenencia	Categoría de Z2
		G-81	63%	Z2-51
Z1-54	96%	G-82		
Z1-51	89%	G-83		
Z1-53	84%	G-84	44%	Z2-54
Z1-55	35%	G-85		
Z1-52	74%	G-86	63%	Z2-52
		G-87	61%	Z2-53
		G-88	46%	Z2-55

Tabla 3.6. Matriz de coherencia de asignación de categoría para RA, comparando las clasificaciones locales de Z1 y Z2 de 5 categorías con la clasificación general de 8 categorías, en el área 1.

La Figura 3.8 ejemplifica resultados obtenidos usando el área 1 de análisis para clasificación. La homologación de una categoría generada en base solo a los elementos de la selección geográfica Z2, con una de las categorías generadas realizando un análisis general. En dicha figura, se comparan los compuestos de los campos de IVT instantáneo al momento de contacto continental, y la evolución de anomalía de geopotencial previo al instante de contacto, 5 días previos al contacto, 2 días previos al contacto y el día de contacto.

En esta figura es posible observar como los compuestos obtenidos de forma independiente por cada categoría guardan similitud, a pesar de presentar orígenes distintos. A pesar de que existen diferencias entre las magnitudes de algunas anomalías, la configuración espacial de los patrones es equivalente. La semejanza entre ambas columnas confirma que es posible homologar una categoría definida en base a una clasificación reducida de forma geográfica con una categoría obtenida usando todos los eventos de RA sin hacer distinción de ningún tipo.

Así, es esperable que un proceso de clasificación coherente cumpla con que todas las categorías obtenidas de clasificaciones locales (con eventos reducidos geográficamente) cumplan la condición de homologación.

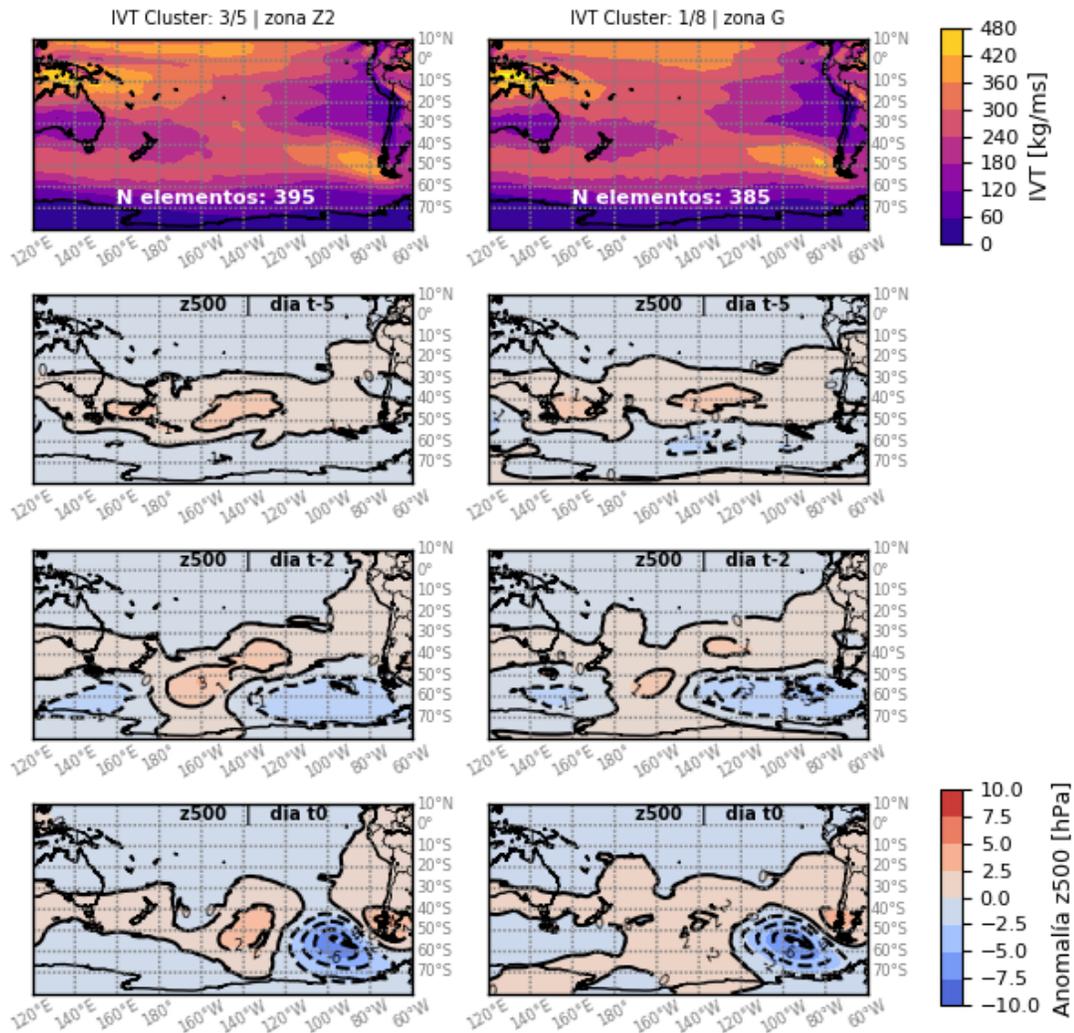


Figura 3.8. Ejemplo de similitud de una homologación de categoría definida en Z2, con respecto a una categoría definida en el análisis general. La columna izquierda muestra los compuestos generados para la categoría 3 (de un total de 5) de la zona Z2, mientras que la columna derecha muestra compuestos generados en base a la categoría 1 (de un total de 8) con la clasificación realizada a nivel general. Los dos paneles superiores muestran los compuestos de IVT al momento de contacto continental de todos los eventos de RA correspondientes a la categoría. Las 3 filas inferiores de la figura muestran la evolución temporal de la anomalía de geopotencial en 500hPa, para 5 días antes de contacto continental del RA (fila superior), para 2 días antes del contacto continental del RA (fila central) y para el momento de contacto continental (fila inferior).

Dicho esto, la Figura 3.9 es equivalente a la Figura 3.8, pero comparando la categoría 2 (de un total de 5) de la selección geográfica Z1 con la categoría 3 (de un total de 8) de la clasificación general sin realizar ninguna selección geográfico, considerando como región de análisis el área 1. Según lo indicado en la Tabla 3.6, estas categorías debiesen ser homologables, dado el porcentaje de coincidencia que tienen. Sin embargo, según lo que se muestra en la Figura 3.9, y a diferencia de lo que ocurre en el caso anterior, los patrones espaciales de IVT al momento de contacto continental difieren significativamente. Es más, la configuración espacial de las anomalías de geopotencial difiere radicalmente, sin presentar similitud alguna. Esto quiere decir que estas categorías que debiesen ser equivalentes no son homologables.

Este tipo de incongruencia demuestra que la región de análisis utilizada en la clasificación, correspondiente al área 1 en las Figura 3.8 y Figura 3.9, no entrega resultados coherentes.

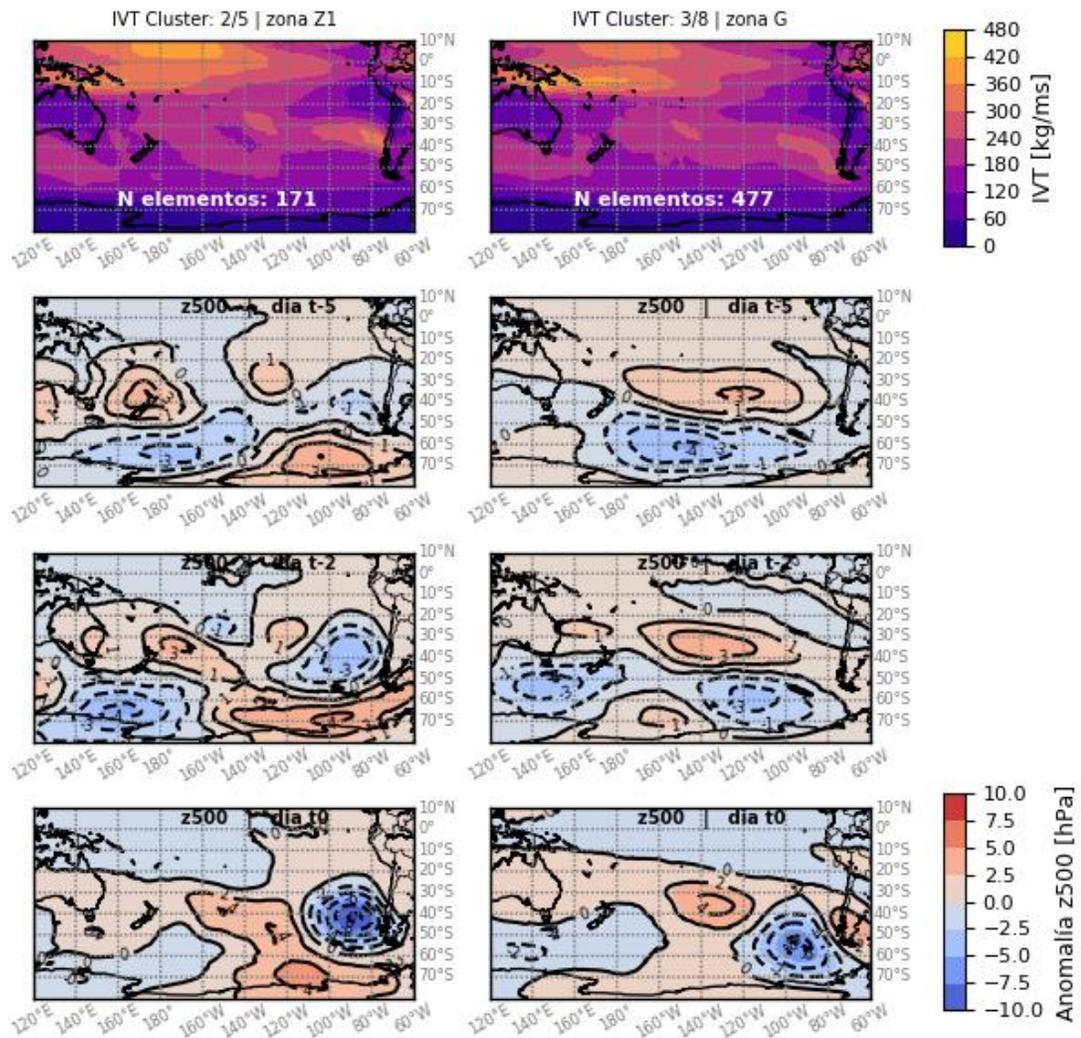


Figura 3.9. Equivalente a la Figura 3.8, pero comparando la categoría 2 (de un total de 5) definida en el análisis de Z1 y la categoría 3 (de un total de 8) definido en el análisis general

3.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se ha descrito en detalle la metodología de clasificación planteada como base en la identificación de mecanismos atmosféricos conducentes a la ocurrencia de eventos de RA. Esta metodología presenta la particularidad de que realiza una clasificación no supervisada (es decir, sin información base o referencial de que se debe obtener como resultado), mediante el algoritmo GMM, pero requiere que se especifique el número de conjuntos objetivo. Esta es tanto una fortaleza como una debilidad para la metodología, ya que es posible extender el análisis tanto como se crea necesario, pero eventualmente dificulta la identificación de mecanismos.

El algoritmo GMM es aplicado sobre los campos de tres variables conjuntas:

1. IVT al momento de impacto.
2. traza de IVT de 1 día y
3. traza de IVT de 4 días.

Todos los campos de información son previamente procesados con un PCA para reducir la dimensionalidad del problema), con la finalidad de incorporar tanta información como sea posible al algoritmo en su ejercicio de clasificación.

El área definida como fuente de información para la clasificación corresponde a la región del océano Pacífico frente a las costas de Chile, la que fue definida tras un análisis de sensibilidad.

Al tener un objetivo general abarcando una gran área geográfica de ocurrencia de RA, se dificulta la identificación a priori de mecanismos que no resultan tan frecuentes. Para salvaguardar este problema, se realizan ejercicios adicionales de clasificación en distintas sub regiones clasificadas según un criterio geográfico. Esto se realiza con el objetivo de identificar mecanismos menos frecuentes sin requerir de un número tan alto de clusters en la categorización general, en particular en zonas de interés como la zona centro sur de Chile, que es donde se concentra la mayor parte de la población nacional.

Este ejercicio de clasificación regional, dado un número de categorías objetivo razonables a la dimensión de elementos siendo clasificada, sirve como apoyo a la identificación de mecanismos reales que generan RA. Así, cuando se encuentran coherentemente compuestos de IVT similares tanto con la clasificación general como con las de las zonas específicas, es posible concluir que se tiene una clasificación razonable que representa adecuadamente mecanismos relevantes.

Tras varios análisis de sensibilidad, se determinó que al clasificar las sub regiones geográficas en 5 categorías y la zona completa de estudio en 8 categorías, es posible identificar compuestos que presentan un nivel de coherencia interna que se pueden interpretar como mecanismos conducentes a la ocurrencia de RA. El detalle de este cruce se presenta en la Tabla 3.6.

4 RESULTADOS

El algoritmo de categorización entrega tantas categorías como se predefinan. Al realizar este proceso iterativamente, se obtiene, para cada evento, una clasificación que puede ser o no coherentes con el grupo al que había sido asignado previamente.

Así, se identifican conjuntos de eventos que, a pesar de un aumento del número posible de grupos, se clasifican juntos formando patrones persistentes. Estos patrones se analizan ya que potencialmente podrían representar un mecanismo atmosférico que conduce a la ocurrencia de RA.

En general, esta búsqueda se realiza sin una separación geográfica a priori, reservando este tipo de agrupación por zonas norte y sur como un análisis complementario a los resultados obtenidos, según lo descrito en el capítulo anterior.

El proceso de agrupamiento se realiza iterativamente, aumentando el número de categorías objetivo bajo las cuales un evento de RA puede ser clasificado, así como también el subconjunto geográfico de RA a clasificar.

Con el fin de facilitar este procedimiento, para cada uno de los clusters que define el algoritmo, se calcularon compuestos de valores y anomalías de variables relevantes, tanto para el día de impacto, como los previos. Con esto, se busca representar la evolución temporal de dichas variables previo al contacto del RA con el continente para facilitar la identificación de posibles mecanismos.

Se desarrollaron los siguientes compuestos para facilitar el análisis de cada clúster obtenido bajo cada esquema de clusterización:

- a) Trazas de IVT de 4 días y de 1 día e instantáneo, lo que corresponde a las variables de clusterización. Notar que, si bien el algoritmo GMM recibe la información conjunta de estas tres variables para realizar el proceso de clasificación, el análisis de cada una de ellas por separado contribuye significativamente a la identificación de posibles mecanismos al representar la evolución de la creación, intensificación y/o avance de los RA.
- b) Evolución temporal de los valores y anomalías de presión superficial a nivel de mar, geopotencial en 500hPa y velocidad de viento en 300 hPa.
- c) Histograma de frecuencia de fechas de ocurrencia.
- d) Coherencia temporal con modos de variabilidad climática conocidos (ENSO, MJO, PDO)

Es importante destacar que con el algoritmo GMM se obtienen patrones y compuestos desde un punto de vista estadístico, pero que es muy posible que exista una gran variabilidad de condiciones en un análisis caso a caso (Grotjahn & Faure, 2008).

Finalmente, para identificar mecanismos, se realizó el siguiente procedimiento, apoyado por las figuras previamente descritas:

- 1) se identificaron aquellos compuestos con persistencia de los eventos que lo conformaban: al aumentar el número de categorías objetivo, la clasificación

asignada a un evento puede cambiar. Sin embargo, existen patrones que persisten a pesar de la mayor disponibilidad de grupos a las que pueden ser asignados los eventos.

Estos patrones se identifican ya que sus eventos son consistentemente agrupados, a pesar de que algunos pocos eventos sean asignados a otra categoría.

- 2) Un mecanismo que identificable en la clasificación general de todos los eventos, debe ser identificable también en ejercicios de agrupamiento de dominio geográfico acotado. Así, los ejercicios de clasificación realizados separando geográficamente permiten identificar patrones asociados a distintas regiones de forma más expedita, aunque deben ser identificables en la categorización general.

Cumpliendo estos criterios, fue posible identificar seis mecanismos:

- a) Onda estacionaria del Pacífico
- b) Baja Polar
- c) Engranaje
- d) Onda de Rossby con número de onda igual a 3
- e) Onda de Rossby con número de onda igual a 4, en dos polaridades que generan eventos de RA en zonas geográficas distintas. Se les denomina fase norte y sur en función de su lugar de impacto.

La Figura 4.1 muestra una figura esquemática de los compuestos de los campos de IVT $>200 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ en base a la clasificación. Se incluyen además campos relevantes al desarrollo de los RA:

- a) Isobaras de anomalías de geopotencial en 500 hPa.
- b) Isohumas de agua total precipitable.
- c) Isotacas de anomalía de viento en 200 hPa.

Se grafican estos campos al ser lo más relevantes para sus respectivas caracterizaciones y descripciones de los procesos que los generan.

En esta figura se observan claras diferencias entre los distintos mecanismos, variando tanto en magnitudes de las variables como en sus configuraciones espaciales e interacciones entre ellas.

A modo de resumen, se presenta en la Tabla 4.1 una breve descripción de cada uno de los mecanismos, con sus principales características y una síntesis de su desarrollo general.

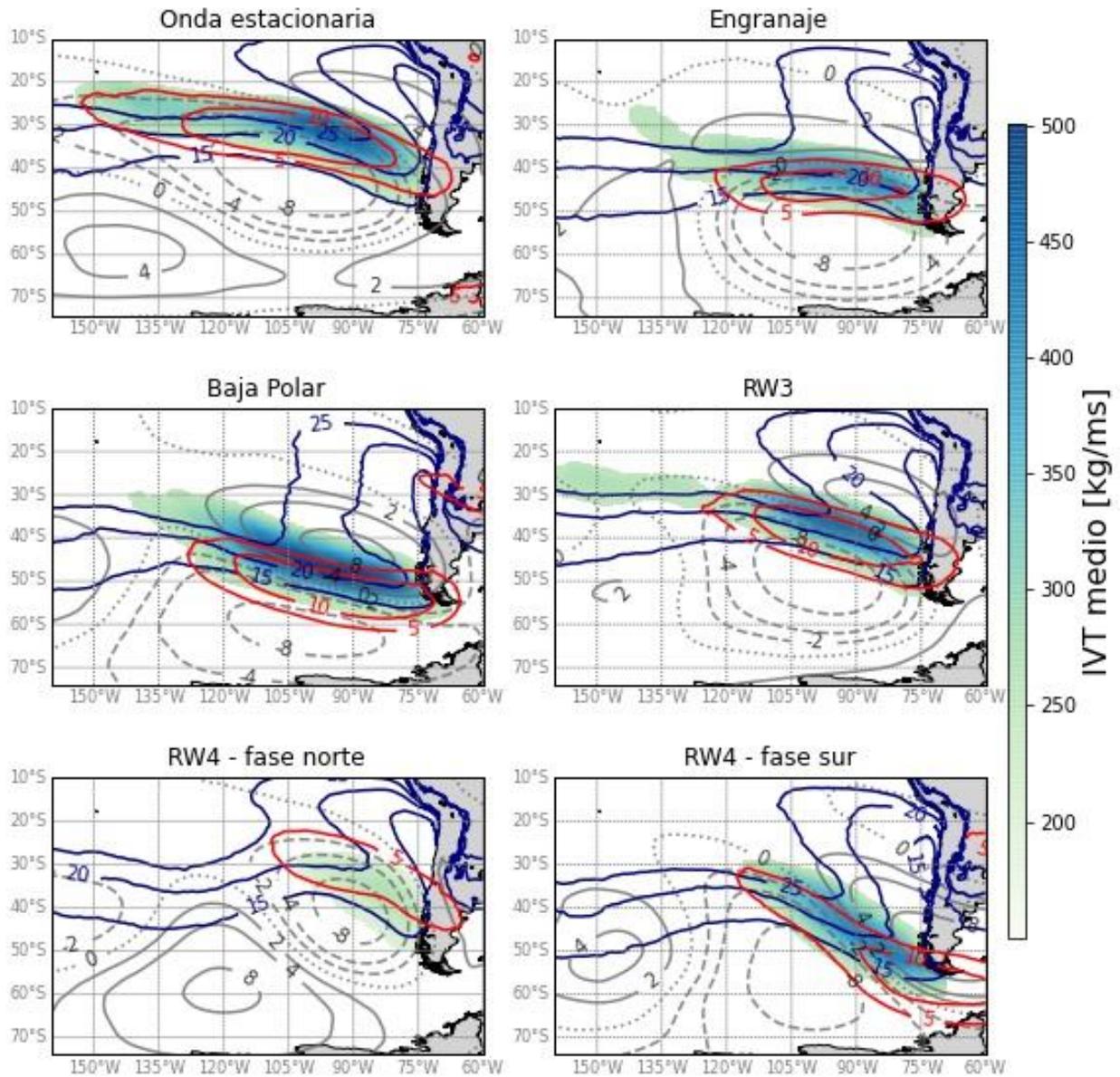


Figura 4.1. Compuestos de $IVT > 200 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ al momento de impacto del RA con la superficie continental de cada uno de los mecanismos identificados en este trabajo. Se grafican adicionalmente en anomalías de geopotencial en 500hPa (contornos grises, donde las líneas sólidas son anomalías positivas, las líneas de puntos son anomalías iguales a cero y las líneas entrecortadas son anomalías negativas, en unidades de hPa), contornos de isohumas de agua total precipitable para los valores de 15, 20 y 25 (en líneas azules, en unidades de g/kg) y contornos de anomalía de magnitud de viento en 200 hPa para magnitudes de 5 y 10 m/s (en líneas rojas). El valor de cada contorno se señala en la figura, mientras que los valores del compuesto de IVT se señalan en la leyenda a un costado de la figura.

Tabla 4.1. Resumen de los seis mecanismos atmosféricos identificados en este trabajo.

Nombre	Acrónimo	Descripción
Onda estacionaria del Pacífico	O.E.P.	Desarrollo de un dipolo de gran escala, centrado en 135°W, sobre la cuenca del Pacífico Sur, con la componente negativa en latitudes medias y la positiva en latitudes sobre 60°S, usualmente asociada a ondas atmosféricas. Posteriormente se desfasa, generando un avance de la anomalía negativa hacia el oeste, intensificando valores de IVT y provocando un RA.
Engranaje	En	Patrón de ondas de perturbaciones cuasi estacionario en latitudes medias y altas, originada en sectores del océano Índico y el área del continente marítimo y se desplaza hacia latitudes altas, donde se refleja hacia Sudamérica. Por su disposición de engranaje, facilita la ocurrencia de eventos de RA en el sector de la Patagonia al canalizar la humedad presente en el aire tanto desde el trópico como desde latitudes altas.
Baja Polar	BP	Desarrollo e intensificación de una anomalía negativa barotrópica en latitudes polares, que comienza a desarrollarse en longitudes cercanas a la línea de cambio de hora y se desplaza de forma gradual hacia el oeste, inducido por una forzante tropical transmitida en altura. Genera un aumento de los vientos en la zona y mayor disponibilidad de humedad, facilitando la ocurrencia de RA.
Onda de Rossby con número de onda 3	OR3	Desplazamiento de una onda de Rossby con número de onda cercano a 3, en la tropósfera alta, la cual a medida que se va desplazando hacia el oeste va perturbando los niveles inferiores, en particular tras su refracción en zonas polares, al disminuir su velocidad de avance permitiendo que la perturbación en altura se transmita a los niveles inferiores, favoreciendo la advección de humedad y la intensificación del viento en niveles bajos.
Onda de Rossby con número de onda 4, fase norte	OR4n	Desplazamiento de una onda de Rossby con n=4 que genera eventos de RA cuya latitud de aterrizaje se ubica en torno a 40°S ± 10°, debido al posicionamiento geográfico que desarrolla. La fase norte se caracteriza por tener una anomalía de tipo de positiva en el nodo de refracción ubicado en latitudes altas en torno a 110-120°W, con una latitud media de 60°S, y una anomalía negativa frente a las costas de Chile.

Nombre	Acrónimo	Descripción
Onda de Rossby con número de onda 4, fase sur	OR4s	Desplazamiento de una onda de Rossby con $n=4$ pero de polaridad, inversa a la de fase norte, donde la anomalía donde pivotea el rayo de la onda es de tipo negativo, y que genera eventos de RA que impactan geográficamente en el sector de la Patagonia chilena, entre 44°S y 53°S . Presenta un nodo de anomalía positiva sobre el sector de la Patagonia, canalizando humedad hacia latitudes altas.

Cada mecanismo se describe en detalle en este capítulo, con una descripción de los procesos que los generan. Sin embargo, con fines comparativos se presentan en las Figura 4.2 y Figura 4.3 la distribución de dos de los rasgos más característicos de los RA: su latitud de contacto continental y el IVT máximo al momento de impactar.

De la Figura 4.2 se puede concluir que los mecanismos identificados tienen una importante componente geográfica en la mayoría de los casos. Así, el mecanismo de baja polar tiende a generar evento de RA que afectan a la parte más austral de la Patagonia, mientras que el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 4, en su fase norte, genera eventos que afectan gran parte de la zona centro y sur de Chile. Así mismo, es posible notar que existen algunos mecanismos que presentan un rango muy amplio de latitudes donde pueden generar eventos de RA (e.g. Onda Estacionaria), mientras que otros son mucho más locales (e.g. RW4 fase sur o baja polar).

Por otro lado, la Figura 4.3 muestra la distribución de valores de IVT de los eventos en cada mecanismo. Se observan diferencias en las distribuciones de algunos mecanismos, en particular aquellos clasificados en el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 4, en su fase norte. Estos gráficos son una primera muestra de los resultados obtenidos al clasificar el conjunto de eventos de RA en base a la categorización hecha por el algoritmo de clasificación y el posterior análisis que permite diferenciar mecanismos de

conjuntos de eventos no relacionados entre ellos.

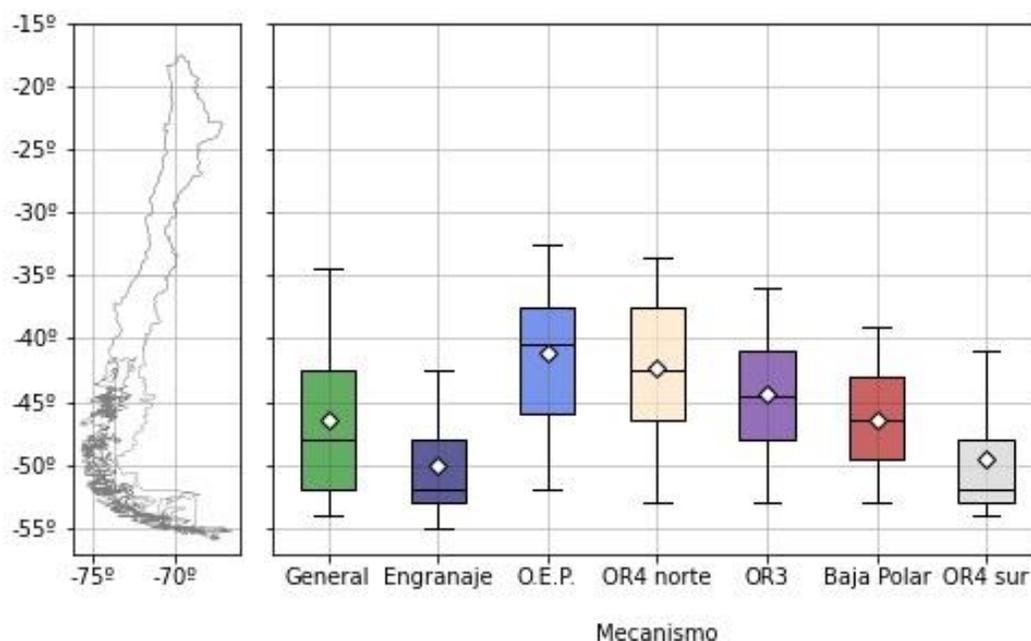


Figura 4.2. Comparación de la distribución de latitud de impacto de los eventos de RA clasificados en cada mecanismo identificado. En cada diagrama de caja se representa la mediana (línea negra al centro de cada caja), el rango intercuantil (extremos de la caja), el valor promedio (rombo blanco) y las líneas por sobre y bajo la caja tienen una amplitud que comprende el 90% de los casos.

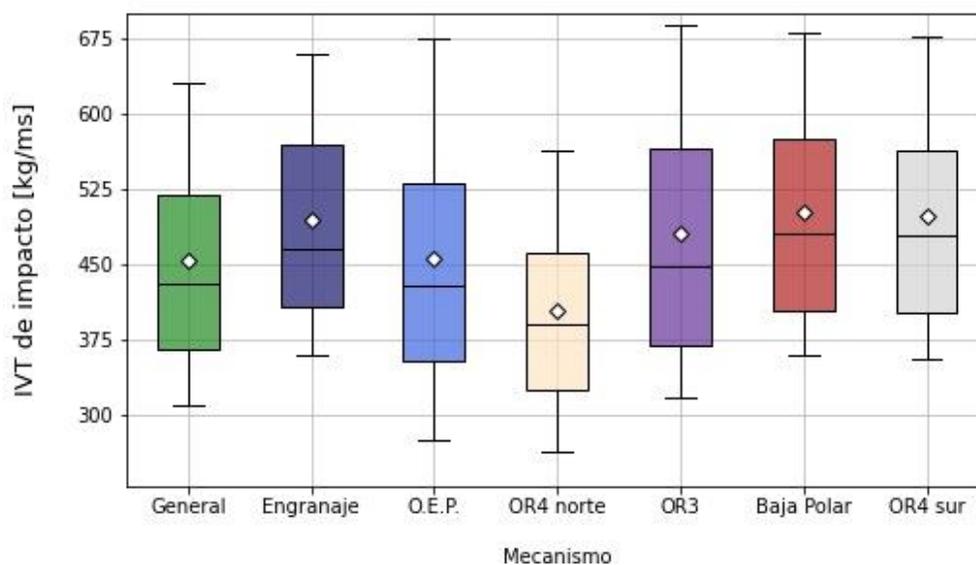


Figura 4.3. Equivalente al gráfico anterior, pero utilizando la variable de IVT máximo al momento del choque continental.

4.1 Onda estacionaria del Pacífico (OEP)

Este mecanismo se caracteriza por una configuración de dipolo de gran escala, cubriendo casi totalmente la cuenca del Pacífico Sur. A grandes rasgos, este mecanismo corresponde a la formación de dos grandes zonas con anomalías de geopotencial acopladas en toda la tropósfera. La componente negativa de este dipolo se ubica principalmente en latitudes medias, mientras que la zona de anomalías positivas se posiciona en latitudes altas sobre 60°S.

Este dipolo, originalmente alineado en torno a una longitud (entre 120°W y 150°W), posteriormente se desfasa, con su componente de anomalías positiva desplazándose hacia el oeste y la de anomalías positivas hacia el este, generando una intensificación de los valores de IVT y de la magnitud del RA asociado a él. Este mecanismo representa, dentro del esquema de clusterización escogido como base con ocho grupos objetivos, cerca del 9% de los eventos de RA que se clasifican.

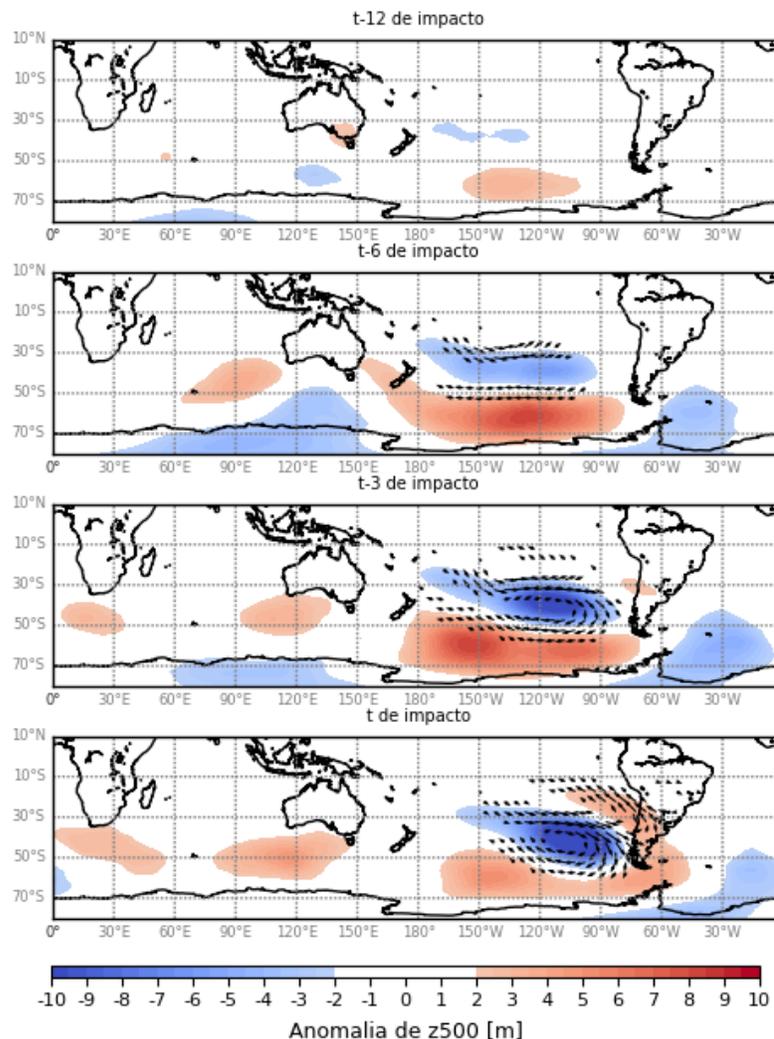


Figura 4.4. Evolución de los compuestos de campos atmosféricos (por fila) de 12, 6 y 3 días antes del impacto y en el día de contacto continental en el mecanismo de onda estacionaria del Pacífico. Se grafica en esta figura los compuestos de anomalía de geopotencial en 500hPa (contornos coloreados), mientras que los vectores representan valores de anomalía de viento en z200 mayores a 5 m/s.

4.1.1 Descripción del mecanismo

Este mecanismo favorece la ocurrencia de RA en el sur del país, con latitud media de contacto en $40,5^{\circ}$ S. La Figura 4.5 muestra la evolución del IVT y de agua precipitable 12, 6 y 3 días antes del contacto y en el momento de contacto. La evolución de IVT muestra que existe una acentuación progresiva de los valores que presentan los compuestos, manteniéndose un ángulo de acercamiento constante al continente durante el periodo formativo, entre 12 y 3 días previos al contacto.

Sin embargo, en el instante de contacto, el ángulo de contacto sufre una variación en su desplazamiento, adquiriendo una componente más longitudinal, aunque aun principalmente zonal. En el periodo entre 3 días previos al contacto y el momento de choque existe una intensificación y desplazamiento hacia el este de las anomalías negativas, que facilita la intrusión de una pluma de agua precipitable, la cual contribuye a la intensificación del RA al adveccionar una mayor cantidad de humedad.

Las condiciones que lo generan tienden a presentar, como lo dice su nombre, un grado de estacionariedad y persistencia en la atmósfera, lo que favorece la ocurrencia de eventos de RA consecutivos.

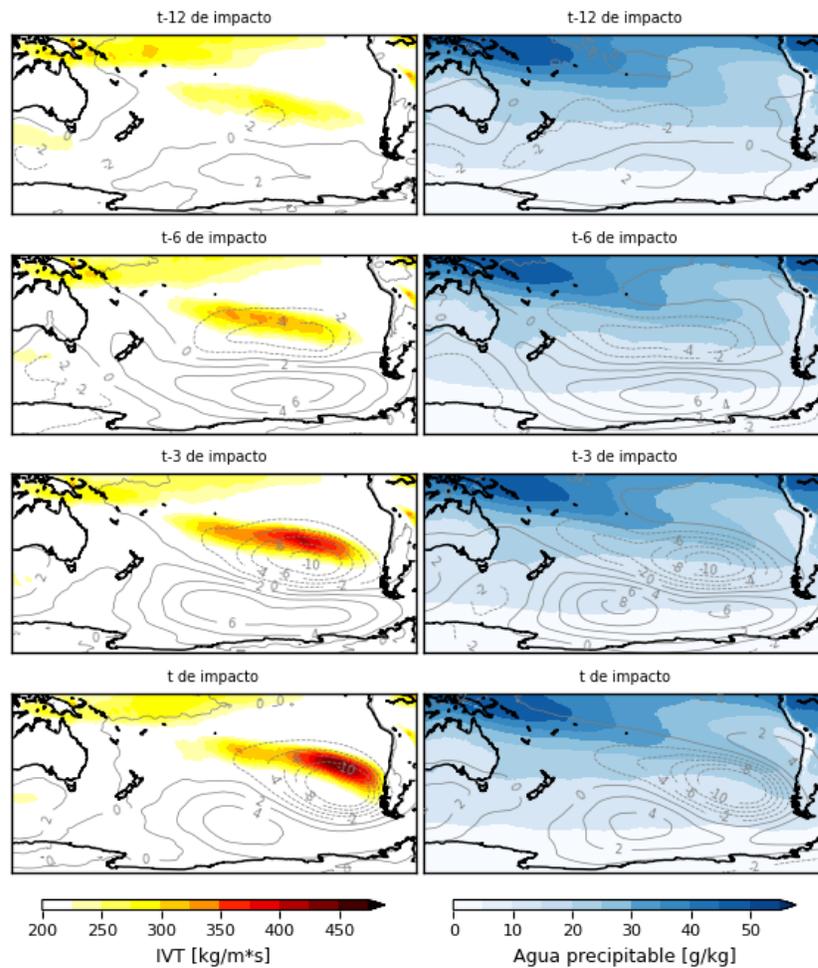


Figura 4.5. Evolución de los compuestos de IVT (paneles izquierdos, contornos coloreados) y de agua precipitable (paneles derechos, contornos coloreados) del mecanismo identificado como onda estacionaria del Pacífico. Los contornos de línea representan la anomalía de presión en superficie (paneles izquierdos) y la anomalía de geopotencial en $z500$ (paneles derechos).

La Figura 4.6 entrega información de distintos campos que permiten describir en mayor detalle la dinámica de este mecanismo. Las condiciones comienzan a desarrollarse en un periodo entre 10 y 14 días previos al contacto del RA, desde un estado relativamente neutro de la atmósfera, sin grandes anomalías en los campos atmosféricos de geopotencial, como se puede ver en la fila superior de la figura, donde al menos las anomalías de función corriente en 200 hPa no presentan mayor amplitud. Sin embargo, en el periodo entre los 12 y los 6 días previos al aterrizaje del RA, comienza a desarrollarse en niveles altos una anomalía positiva en latitudes altas, centrada relativamente cerca de la línea de cambio de hora (ver paneles izquierdos de la Figura 4.6).

Esta anomalía en algunos casos se refuerza con perturbaciones de una onda de Rossby originada por actividad convectiva en la zona del Océano Índico. En otros casos, se ve reforzada por un mecanismo similar de alta convección en el sector del Pacífico central. Estos eventos de alta convección generan una onda baroclínica, perturbando la atmósfera hasta los niveles más bajos, como se puede ver en la evolución de la presión en superficie, graficada en los contornos de línea de la figura en los paneles izquierdos, así como también en las anomalías de geopotencial en 500 hPa, representadas en contornos de color en los paneles centrales, reforzando los procesos de este mecanismo al generar un efecto sinérgico.

Independiente de la razón de su reforzamiento, 6 días antes del momento de contacto del RA, ya se identifica el desarrollo de anomalías negativas y núcleos de baja presión asociadas, como una respuesta al desarrollo de la alta presión en latitudes que advectan vorticidad. Este proceso de intensificación de la baja se da en el periodo entre 6 y 3 días antes del aterrizaje del RA, al mismo tiempo que el núcleo de alta presión se desplaza hacia el oeste, generando como consecuencia que se desarrolle una pluma de humedad desde latitudes tropicales a latitudes medias y, asociado a esto, un incremento de IVT en el Pacífico Central.

Finalmente, en los 3 días previos al aterrizaje del RA, se observa una intensificación de la corriente en chorro en altura, el cual genera un desplazamiento del núcleo de anomalías negativas en dirección este. Como consecuencia de esto, la pluma de humedad se acentúa aún más, llegando al continente. Debido a esto, la estructura del RA ve reforzada en intensidad, alcanzando un máximo de IVT dentro de su periodo de desarrollo, con el que finalmente hace contacto continental.

Es interesante destacar que un mecanismo análogo ha sido identificado en el sector del Pacífico Norte, según lo presentado en Benedict et al. (2019a), al describir el compuesto generado por los eventos de RA que aterrizan en la ciudad de Seattle. Coincidentemente, esta ciudad se encuentra en el mismo rango de latitudes que se observan para este cluster.

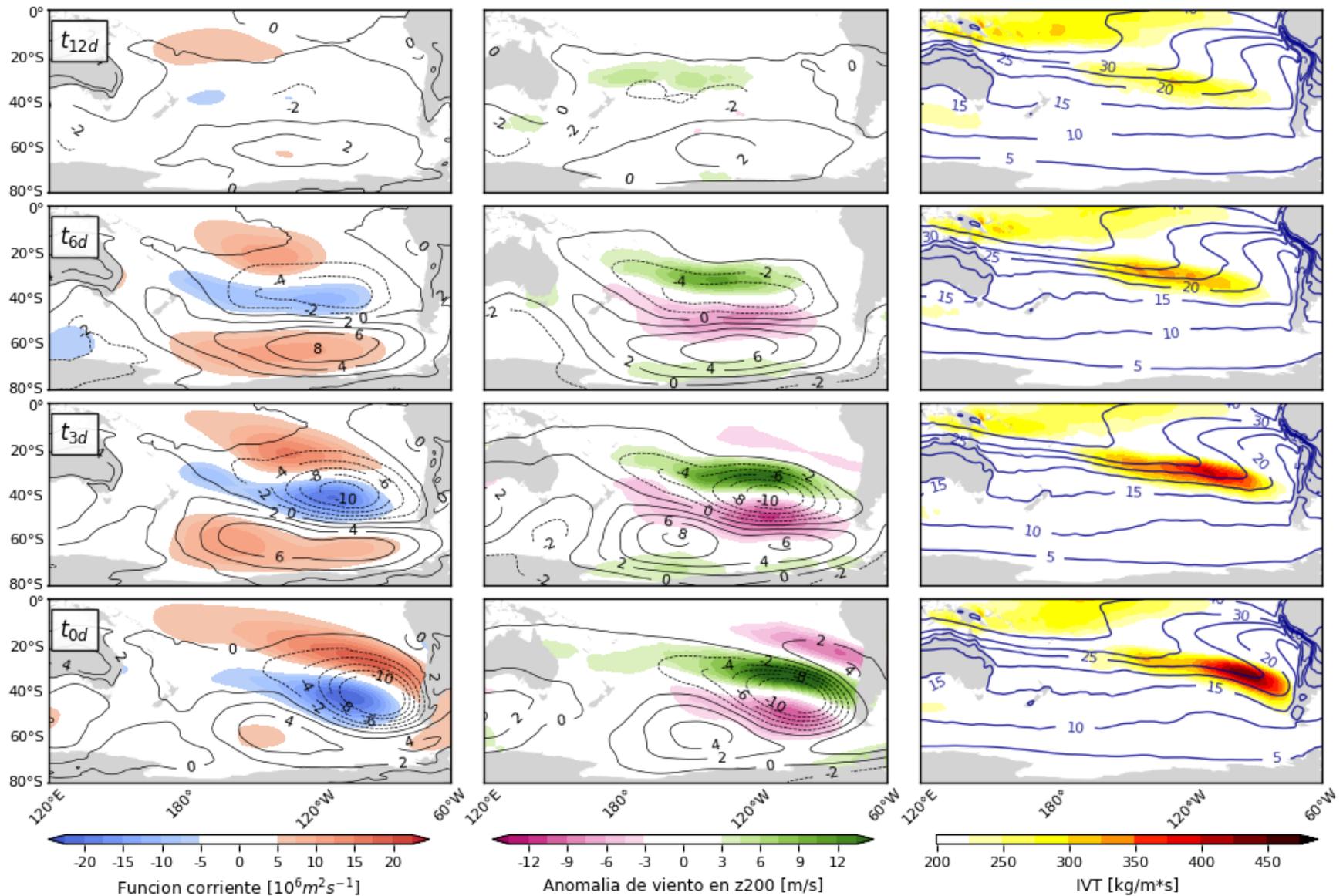


Figura 4.6. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de onda estacionaria del Pacífico. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la función corriente en 200 hPa (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en 2500 y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

La relación de este mecanismo con forzantes tropicales se ve reforzada al analizar los valores de la MJO en los eventos de RA propios de este clúster. Es reconocido que la MJO, una fuente prominente de calentamiento tropical subestacional, puede influenciar la ocurrencia e intensidad de los eventos de RA (Ralph et al, 2011). En el panel izquierdo de la Figura 4.7 se muestran los máximos valores de magnitud alcanzados en un periodo entre 4 y 18 días previos al impacto del RA por el índice de la MJO, su ubicación y el número de días previos en el que fue alcanzado. Cada punto corresponde a un evento de RA y el fondo negro representa una distribución empírica de la concentración de los puntos, cuyo fin es enfatizar los sectores donde se concentra la mayor ocurrencia de eventos. De esta figura se observa que, a rasgos generales, el máximo de intensidad de MJO es alcanzado en las fases 6, 7, 8 y 1 en un periodo comprendido mayormente entre 8 a 14 días previos.

A pesar de que existe una tendencia a observar una preferencia a la ocurrencia de este tipo de eventos bajo estas condiciones, se reconoce que aunque estas perturbaciones subestacionales tropicales influyen los regimenes de flujo extra tropicales, los procesos dinámicos que conducen a la ocurrencia de eventos de RA pueden ser significativamente distintos y no necesariamente representan la única configuración para su ocurrencia (Benedict et al., 2019).

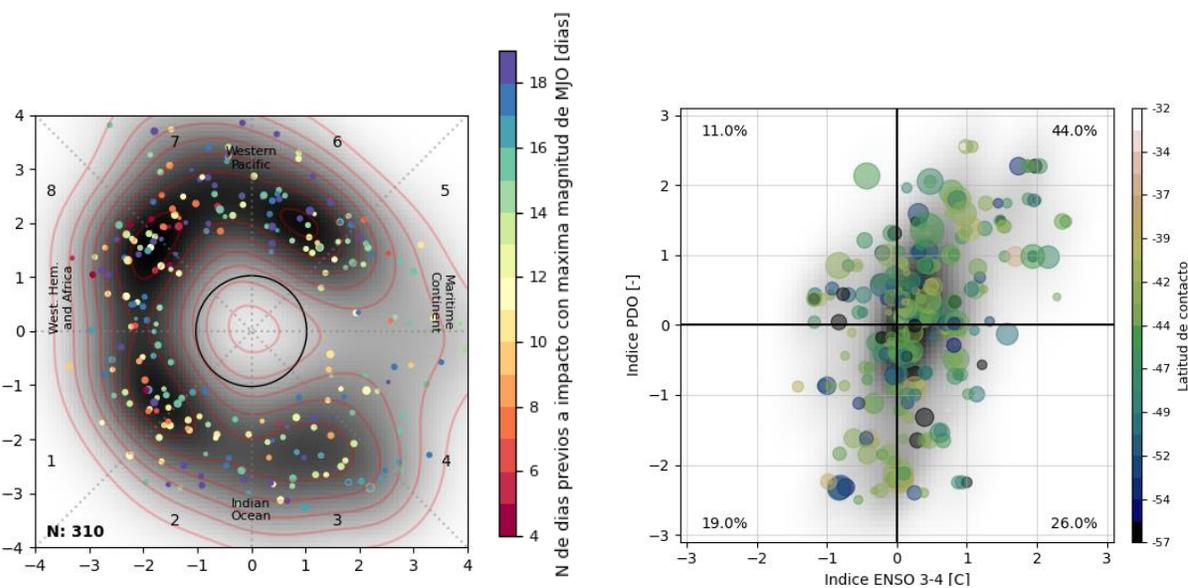


Figura 4.7. (panel izquierdo) Distribución de valores máximos de MJO observados en los días previos al contacto continental del RA para el mecanismo O.E.P. (panel derecho) Correlación entre la ocurrencia de eventos de RA, su intensidad y latitud de impacto, con valores del índice de ENSO y del índice de la PDO.

En el panel derecho de la Figura 4.7 se muestra la relación entre los eventos de este clúster con otros modos de variabilidad global, cuya influencia es reconocida en el clima de Chile continental: el índice de ENSO3-4 y el índice de la PDO. Se concluye que este mecanismo es más frecuencia bajo condiciones cálidas en la SST en la zona 3,4 del Pacífico (70% de los eventos ocurren bajo esta configuración). Adicionalmente, valores positivos del índice de la PDO complementan lo anterior.

Adicionalmente, las condiciones que se dan cuando ambos índices toman valores positivos parecen tener directa correlación con la magnitud de los RA (lo que se representa de forma gráfica en el tamaño de los puntos).

Se infiere que las condiciones reflejadas por valores positivos de estos índices facilitan la disponibilidad de humedad en la atmósfera, lo que representa una importante componente en su ocurrencia y magnitud, aunque también es posible inferir que este calentamiento anómalo puede eventualmente reforzar la intensidad del jet subtropical o extra tropical, según lo analizado por Campos (2020).

4.1.2 Caracterización de sus elementos

Si bien el número de elementos que componen cada clúster y, por tanto, las características que esté presente, dependen del número de grupos objetivos de clasificación, se considera que bajo el esquema de clasificación actual de 8 grupos se obtienen condiciones representativas de los mecanismos identificados.

Dicho esto, en la Tabla 4.2 se presenta una caracterización de los RA clasificados bajo este mecanismo. Se presentan los valores asociados a cinco percentiles distintos para describir la variabilidad de las características del clúster. Todos los valores son obtenidos agrupando la caracterización de eventos de Guan & Waliser (2015).

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	12	24	42	66
Largo [km]	4163	5065	6620	8723	10200
Ancho [km]	511	618	780	914	1078
IVT máximo	212	321	487	716	870
Latitud de contacto	-49.0	-46.0	-40.5	-37.5	-34.0
Dirección de contacto [°]	103.8	108.7	115.3	124.3	130.5

Tabla 4.2. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo de onda estacionaria del Pacífico.

Dentro de las características destacables de este clúster, se destaca que la intensidad de IVT media del compuesto es de 487 kg/m⁻¹s⁻¹. Además, más del 25% de los RA que lo componen tienen un valor de IVT superior a los 716 kg/m⁻¹s⁻¹, con una duración del orden de 42 horas, lo que corresponde a un evento de tipo IV en la categorización de Ralph et al. (2019). Esto se traduce en eventos mayormente peligrosos, pero también levemente beneficiosos (principalmente por la intensa precipitación asociada, lo que ayuda a recargar los recursos hídricos).

Adicionalmente es posible también caracterizar la forma en que están compuestos los RA de este mecanismo. Con este fin, se toma como referencia en análisis planteado por Gonzales et al. (2020), según lo descrito en la sección 2.7 de metodología, donde se plantean una forma de identificar si cada RA presenta una componente prioritaria en la definición de su IVT, favoreciendo valores mayores de humedad o de viento, o si es que resultan de un balance de ambos valores. La Figura 4.8 presenta los resultados de este análisis.

En el panel superior izquierdo de la Figura 4.8 se muestra una comparación entre las anomalías de IVTq' e IVTu'v', donde se grafica también la recta identidad. Cada punto

representa un evento de RA, y valores por sobre la recta definen eventos dominados más por la humedad que por el viento y viceversa. Además, el círculo de radio unitario se define como una zona donde a pesar de las diferencias en valores, no existe una prevalencia de una componente por sobre la otra. Se observa en este gráfico dos particularidades: que casi no se tienen eventos asociados a una componente positiva de $IVTu'v'$ y que sí existen eventos con anomalías significativas de $IVTq'$.

La distribución temporal de estos eventos se aprecia en el panel central de la fila superior, donde se observa que la ocurrencia de este mecanismo se concentra en el periodo de los meses de otoño-invierno. En dichos meses, al menos el 75% de los eventos que se dan ocurren con una anomalía positiva de los valores de $IVTq'$, es decir, con una componente de humedad importante en la composición del IVT que los define. Esto es coherente con la descripción del mecanismo, donde se ha identificado que la evolución del mismo conlleva que dadas las condiciones pseudo-estacionarias que lo dominan, se genera una extensa pluma, sin grandes meandros ni desviaciones, lo que facilita que haya una mayor concentración de humedad.

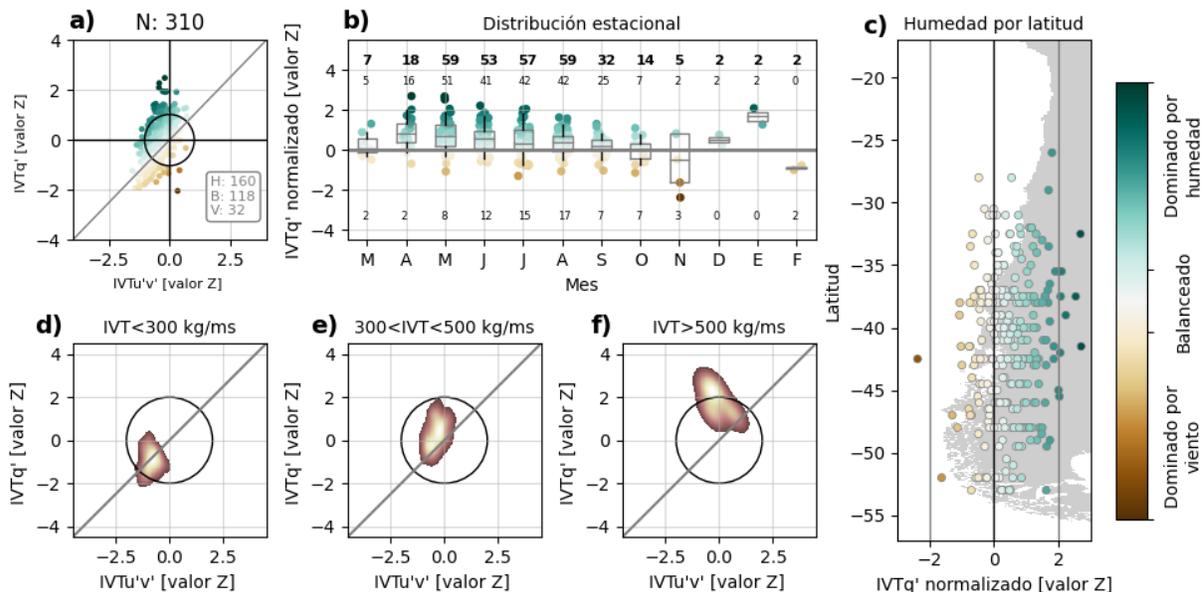


Figura 4.8. Caracterización de la composición vertical de los eventos de RA clasificados bajo el mecanismo de OEP. (a) distribución comparativa de las variables $IVTq'$ e $IVTu'v'$ normalizadas. (b) variación estacional de los valores de $IVTq'$. Se indica en cada diagrama de cajas el número total de eventos por mes (número en negrita), el número de eventos con $IVTq' > 0$ (número en el sector superior no en negrita) y el número de eventos con $IVTq'$ menor a 0. (c) distribución latitudinal de eventos y los valores $IVTq'$ asociados de cada uno de ellos. (d), (e) y (f) muestran la densidad de distribución específica de los valores de $IVTq'$ e $IVTu'v'$ para eventos débiles (< 300 kg/ms), medios (300 kg/ms $< IVT < 500$ kg/ms) y fuertes (> 500 kg/ms).

Los paneles inferiores de la Figura 4.8 muestran la distribución de anomalías de $IVTq'$ e $IVTu'v'$ separado por magnitud de eventos. Esto permite identificar que en general los eventos de mayores magnitudes ($IVT > 500$ kg m⁻¹s⁻¹) están asociados a una mayor disponibilidad de humedad, en condiciones de viento relativamente normales o bajo las medias del conjunto total de los eventos de RA estudiados en este trabajo.

4.1.3 Evolución del clúster

En la Figura 4.9 se presenta la evolución de los compuestos de IVT en el día de choque del RA de los campos de IVT y de las anomalías de z500, realizando una clasificación con un número variado de clústeres objetivo. Este mecanismo resulta identificable incluso al definir solo 4 grupos, pero queda definido en forma clara a partir de 6 grupos objetivos. La configuración espacial de ambos campos se mantiene invariante espacialmente a medida que se aumenta el número de clústeres, aunque el número de elementos que conforman el conjunto vaya disminuyendo. Sin embargo, los compuestos se refuerzan, aumentando sus valores a medida que se aumenta el número de clústeres a los que puede pertenecer un evento. Por ejemplo, en el caso del IVT, el valor máximo medio del compuesto cuando se tienen 6 grupos objetivos es cercano a $400 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, valor que aumenta a casi $600 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en el caso de tener 12 grupos objetivos. En el caso de la evolución de anomalías de z500 - adicionalmente a la intensificación de las anomalías - el desplazamiento del dipolo, con las anomalías positivas desplazándose hacia el oeste y las positivas hacia el este, se acentúa espacialmente a medida que el clúster se vuelve más específico.

Adicionalmente, cabe destacar que en el proceso de clasificación, al aumentar el número de grupos objetivos de 10 a 11, se genera una subdivisión de este clúster (ver paneles inferiores de la Figura 4.9). Esta subdivisión genera dos clusters con compuestos relativamente similares, pero que difieren en intensidad. Esto sugiere que este mecanismo, si bien no representa una alta cantidad de eventos del total analizado, si es lo suficientemente identificable como para eventualmente generar sub-clasificaciones del mismo.

Cabe destacar que esta evolución de los compuestos se hace a través de realizar un análisis de trazabilidad de cada elemento (revisando manualmente donde queda cada elemento tras cada clasificación automática), identificando donde son clasificados la mayor proporción de elementos que componían el clúster original. En particular, en el caso de este mecanismo, el número de elementos que lo componían solo disminuía de forma progresiva, y se observan pocas reclasificaciones de eventos de otras categorías a este mecanismo.

Con el fin de ejemplificar este punto, se presenta en la Figura 4.10 una comparación de la MJO de los eventos identificados en los clusters obtenidos con 8 y con 12 grupos objetivos. Los puntos blancos representan el subconjunto de eventos que se mantienen en el clúster del mecanismo aun con 12 grupos objetivos. Se observa que todos corresponden a puntos que fueron clasificados en el clúster equivalente cuando se usaron ocho grupos como objetivo en la clasificación, así como también una ausencia de nuevos puntos.

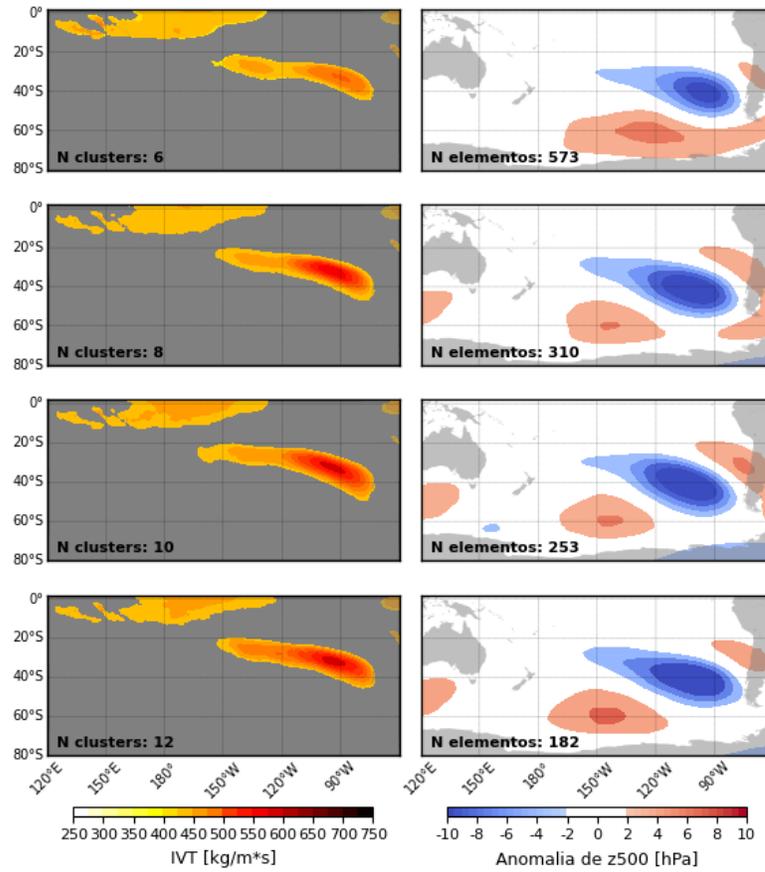


Figura 4.9. Evolución de los compuestos de IVT (panel izquierdo) y de anomalía de z500 (panel derecho) descritos por el mecanismo de Onda Estacionaria del Pacífico, en función del aumento de clústeres objetivo definidos para el algoritmo de clasificación.

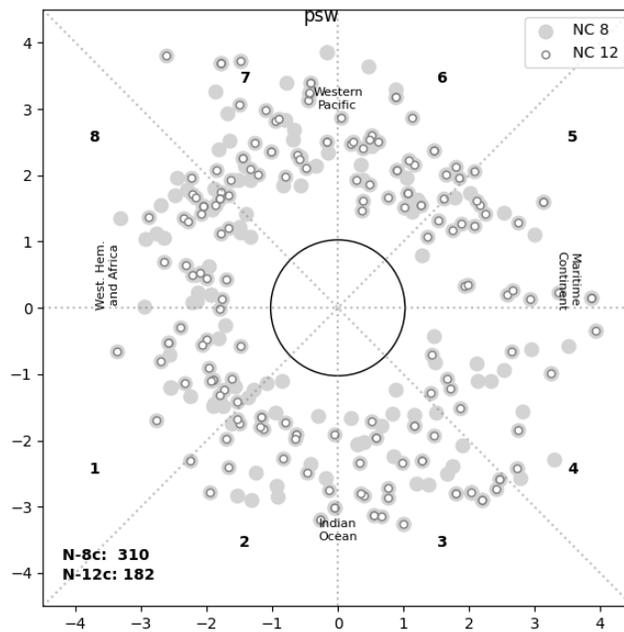


Figura 4.10. Comparación de los eventos identificados en el mecanismo de Onda Estacionaria del Pacífico utilizando 8 y 12 clusters como objetivo en el algoritmo.

4.2 Baja polar (BP)

La principal característica de este mecanismo es el desarrollo e intensificación de una anomalía negativa barotrópica en latitudes polares, que comienza a desarrollarse en longitudes cercanas a la línea de cambio de hora y se desplaza de forma gradual hacia el oeste, potencialmente reforzada por una onda extra tropical.

4.2.1 Descripción del mecanismo

Este mecanismo se caracteriza notoriamente por el desarrollo e intensificación de una perturbación negativa en latitudes altas, inicialmente de magnitud débil en el sector de 160°W , en el periodo $t-12$ antes del impacto del RA. Esta perturbación, al pasar los días, se va intensificando y desplazando hacia el este, generando un leve dipolo de magnitudes asimétricas, intensificando los vientos y canalizando humedad entre ellos de forma tal que se genera el evento de RA por la combinación de estos factores.

Cabe destacar que este mecanismo se desarrolla de forma gradual y barotrópica, y que presenta un desplazamiento longitudinal de progresión lenta, desarrollando una intensificación significativa de los vientos en altura solo tres días antes del aterrizaje, como se puede ver en la Figura 4.11.

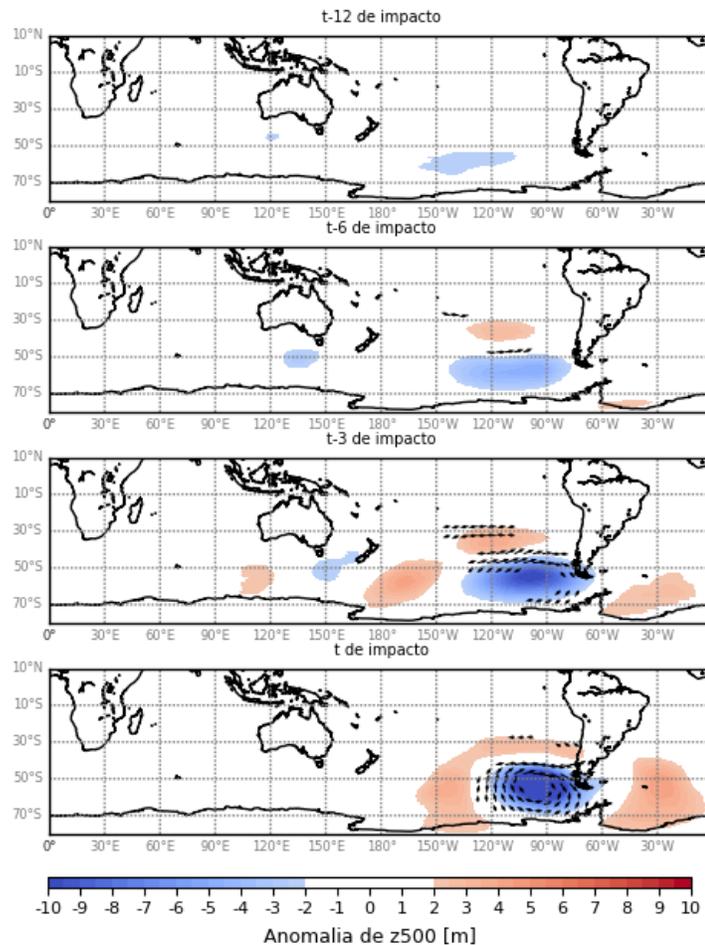


Figura 4.11. Evolución del compuesto de anomalía del geopotencial en $z500$ hPa (en contornos coloreados), para los días $t-12$, $t-6$, $t-3$ y t de aterrizaje del día atmosférico para el mecanismo de Baja Polar. Las flechas representan sectores donde las anomalías de viento son superiores a 5 m/s.

Sin embargo, a pesar de su nombre en base a la característica de circulación más definitoria, este mecanismo es inducido por una forzante tropical, cuya señal se transmite a través de campos en altura. La Figura 4.12 muestra la evolución de la anomalía de función corriente en 200 hPa. Se observa que en el día t-12 comienza el desarrollo de una perturbación que se desplaza de forma marcadamente meridional, hasta el día t-6. Esta perturbación se transmite a nivel inferiores, generando un dipolo de anomalías en los campos de circulación, donde además se genera un aumento de los valores de IVT (panel izquierdo, Figura 4.13).

El desarrollo de este incremento es un efecto conjunto de dos factores: por un lado, la intensificación en el dipolo genera un aumento de los vientos en la zona, y por otro lado, la mayor disponibilidad de vapor de agua, que se comienza a canalizar hacia latitudes más altas (panel derecho, Figura 4.13).

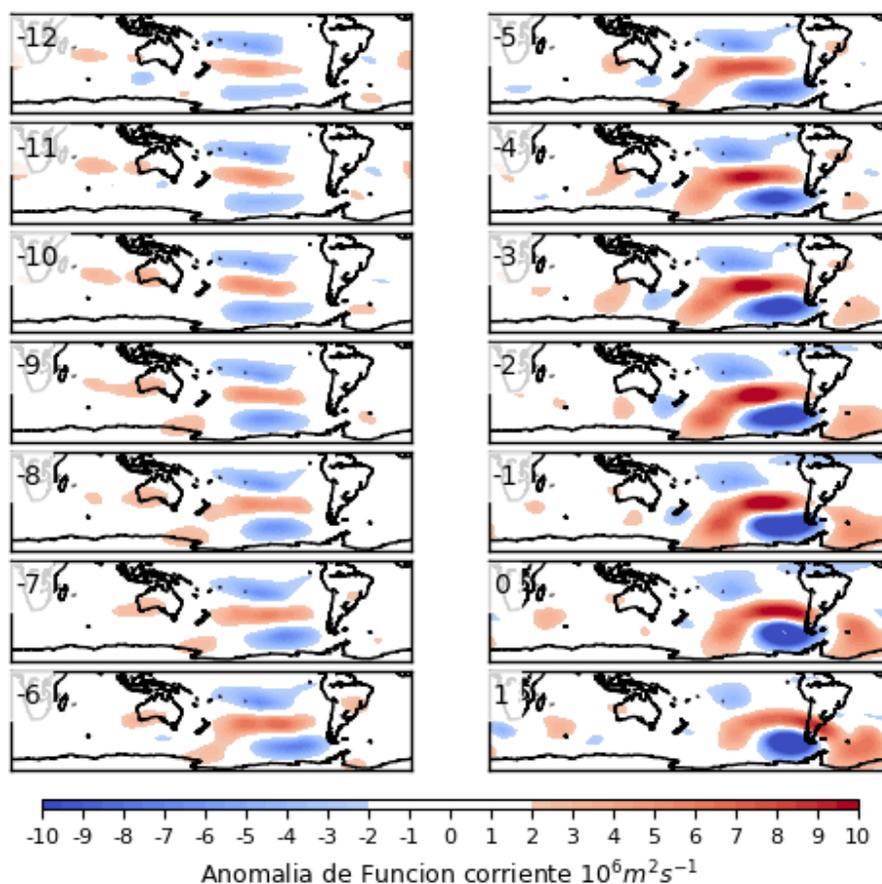


Figura 4.12. Evolución del compuesto de anomalía de función corriente en 200 hPa en los 12 días (contornos coloreados) y la anomalía de presión superficial (en líneas) en los días previos al aterrizaje del RA, definidos por el mecanismo de Baja Polar.

Una característica particular de este mecanismo es que el desarrollo del rayo de la onda se mantiene relativamente meridional durante un periodo cercano a 6 días, como se observa en los paneles izquierdos de la Figura 4.12, donde es posible observar la evolución de la perturbación desde sus orígenes tropicales. Solo desde el momento t-7 al aterrizaje del RA la perturbación negativa en latitudes altas comienza a trasladarse hacia el este. Para que ocurra dicho desplazamiento, se requiere una forzante de viento zonal, el cual en

este caso corresponde al jet subtropical. La ocurrencia de este mecanismo queda entonces condicionado a la posición de este jet, generando una dependencia a cuando este se encuentra ubicado en latitudes altas. Esta ubicación del jet subtropical es característica del periodo estival austral, lo que determina que la ocurrencia de este mecanismo sea predominantemente en el periodo comprendido entre los meses de diciembre a marzo, tal y como se describe en el panel central superior de la Figura 4.16.

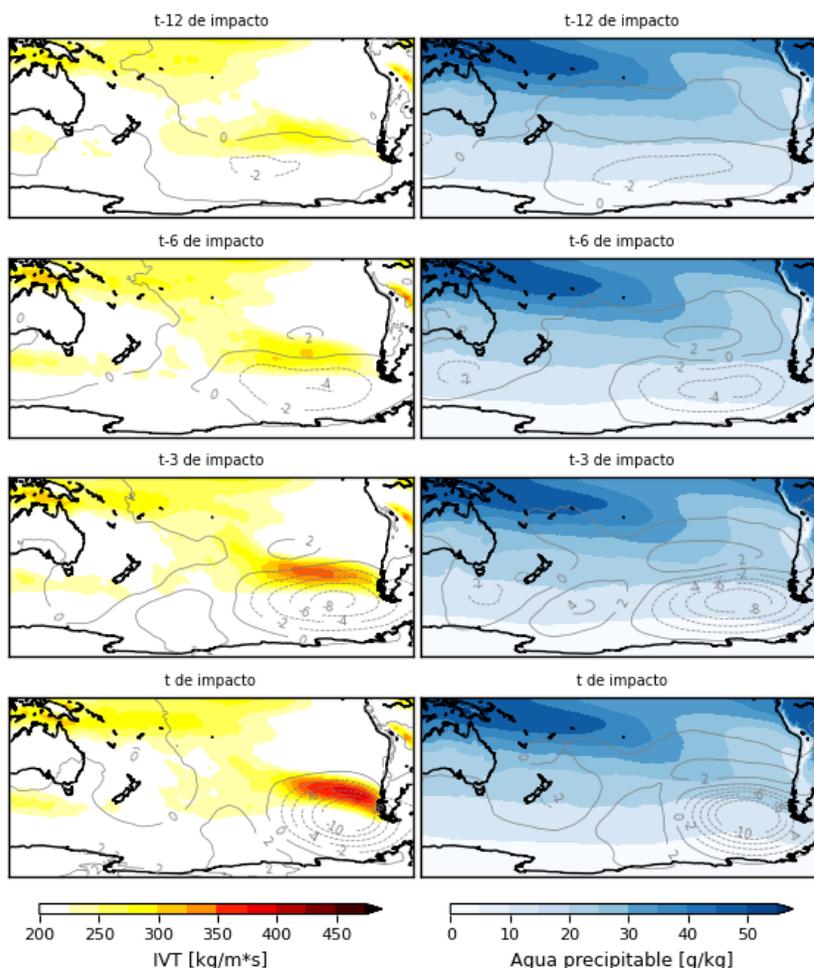


Figura 4.13. Evolución de los días t-12, t-6, t-3 y t de impacto de los compuestos de IVT (en colores) y anomalía de z500 (líneas) en los paneles del costado izquierdo y de agua precipitable y anomalía de presión superficial en los paneles del costado derecho, para el mecanismo de Onda Polar.

La Figura 4.14 muestra en conjunto todos los campos relevantes descritos anteriormente para los días t-12d, t-6d, t-3d y t de impacto. En los paneles del lado izquierdo, donde se tienen los campos de función corriente en contornos coloreados, y presión superficial en líneas, se observa el desplazamiento de la onda en altura, y la trayectoria descrita anteriormente.

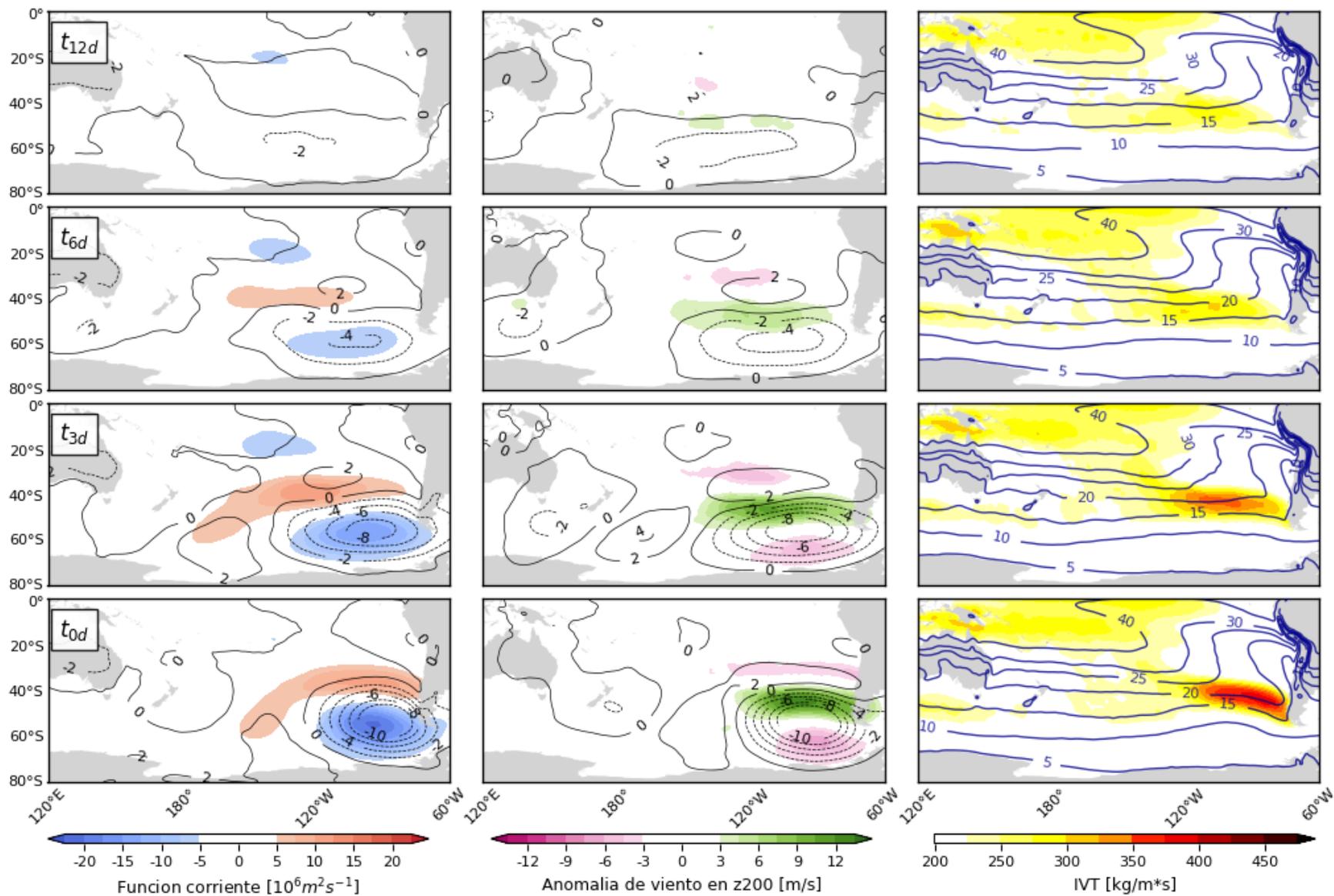


Figura 4.14. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de Baja Polar. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la función corriente en 200 hPa (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en z500 y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

El desarrollo meridional de la onda, concentrado entre t-12d y t-6d, ya muestra un cierto desplazamiento zonal hacia al este producto de la influencia del jet subtropical. Entre t-6 y t-3d se observan leves desplazamientos adicionales hacia el este, de forma barotrópica, lo cual es confirmado por los núcleos concéntricos de las perturbaciones en altura y en superficie. Es finalmente en el periodo entre t-3d y t de impacto donde se desarrolla inestabilidad entre los niveles. Esta inestabilidad va acompañada de una intensificación de las perturbaciones tanto en altura como en superficie, además de una reducción de su área. Debido a la intensificación de la baja, se disponibiliza una mayor cantidad de vapor de agua, que asociada a una intensificación de los vientos resulta en que los valores de IVT alcancen intensidades correspondientes a un evento de RA.

Reafirmando este último punto, en los paneles del costado derecho se muestra que la evolución de los campos de agua precipitable y de IVT permanece relativamente invariantes en el periodo entre t-12d y t-3d al impacto, situación que cambia drásticamente en el tiempo de impacto.

La Figura 4.15 muestra los valores más intensos de MJO registrados en un lapso entre 4 y 18 días previos al contacto del RA. Se observa que existe una gran concentración de puntos que representan eventos donde el máximo ocurrió entre 9 y 16 días previos al aterrizaje del RA en el sector del continente marítimo y del Pacífico Occidental. Estas fases guardan relación con la actividad convectiva en las zonas donde se desarrolla este tipo de mecanismo, lo cual refuerza el planteamiento del desarrollo de este mecanismo como una teleconexión desde los trópicos hacia latitudes medias y altas. A nivel de índices macro climáticos interanuales, como ENSO y PDO, no se observa un favorecimiento o a la ocurrencia de este tipo de mecanismo

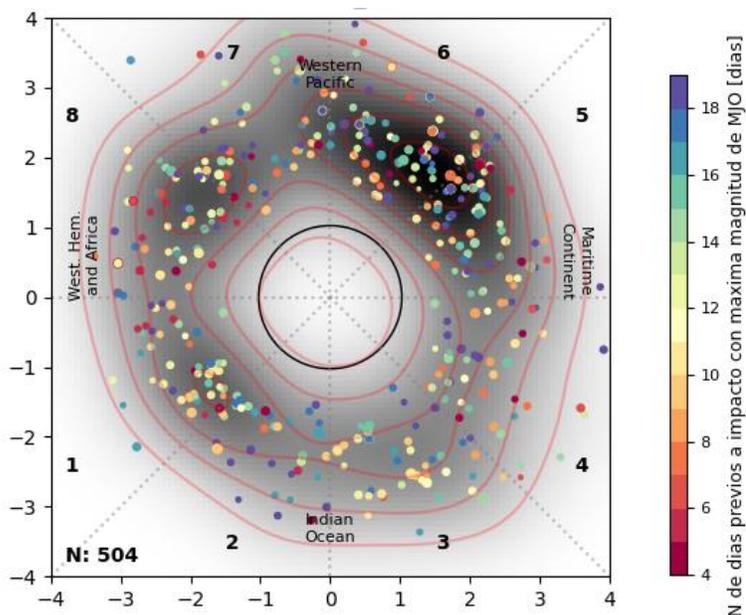


Figura 4.15. Distribución de valores máximos de MJO observados en los días previos al contacto continental del RA para el mecanismo BP. Caracterización de sus elementos

4.2.2 Caracterización de sus elementos

La Tabla 4.3 presenta las características generales de los RA que quedan categorizados bajo este mecanismo. Se destaca que este mecanismo en general tiene eventos de corta

duración temporal pero relativa alta intensidad. Más de la mitad de los eventos de este clúster tienen una duración de 18 horas o menos. Se observa también que el rango geográfico de este clúster es relativamente uniforme según los valores de latitud de contacto, las cuales varían entre 37.5°S y 51.5°S. Sin embargo, parece haber una correlación entre la intensidad máxima de IVT de un RA, según lo que se sugiere en el panel derecho de la Figura 4.16, donde se observa que las mayores anomalías de IVTq' se registran en latitudes mayores.

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	6	18	36	60
Largo [km]	3674.4	4609.5	5895.0	7432.7	9317.7
Ancho [km]	417.1	505.1	614.8	739.2	907.9
IVT máximo	317.5	369.5	447.1	565.6	689.0
Latitud de contacto	-51.5	-48	-44.5	-41	-37.5
Dirección de contacto [°]	103.3	109.9	117.0	125.4	135.3

Tabla 4.3. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo de Baja Polar.

La Figura 4.16 presenta una caracterización de los eventos de RA que conforman este clúster. Estacionalmente, y según lo descrito en la sección anterior, la ocurrencia de este mecanismo se concentra en el periodo de verano austral, con la mayor cantidad de eventos registrados en el mes de enero y una alta componente de humedad (panel central superior de la figura).

En general, los elementos de este clúster tienden a ser eventos de alta intensidad, como se puede ver en la concentración de eventos que presentan valores altos tanto de anomalías de IVTq' como anomalías de IVTu'v'. Esto quiere decir que tanto los valores de humedad como de viento que desarrollan el RA se encuentran por sobre el IVT climatológico de las zonas donde se desarrolla, y en particular al compararse con otros eventos de RA de la muestra total estudiada.

Los paneles inferiores de la Figura 4.16 muestran una sub clasificación de esta distribución según la intensidad de los eventos, lo que permite identificar las causas asociadas a distintas magnitudes de eventos. Se observa que tanto para eventos débiles ($IVT < 300$ kg/ms) como medianos ($300 \text{ kg/ms} < IVT < 500$ kg/ms) las distribuciones de anomalías son relativamente simétricas, lo que habla de eventos de RA balaceados, con una leve tendencia a tener mayores anomalías de viento en el caso de los primeros y mayores valores de anomalías de humedad en el caso de los segundos. Sin embargo, los eventos fuertes ($IVT > 500$ kg/ms) se caracterizan por presentar anomalías de humedad altas, usualmente en conjunto con valores de anomalías de viento positivas, pero que en algunas ocasiones pueden presentar valores negativos. Esto levanta la hipótesis de que los eventos extremos de este clúster guardan relación con una mayor disponibilidad de humedad en la atmósfera al momento de hacer contacto.

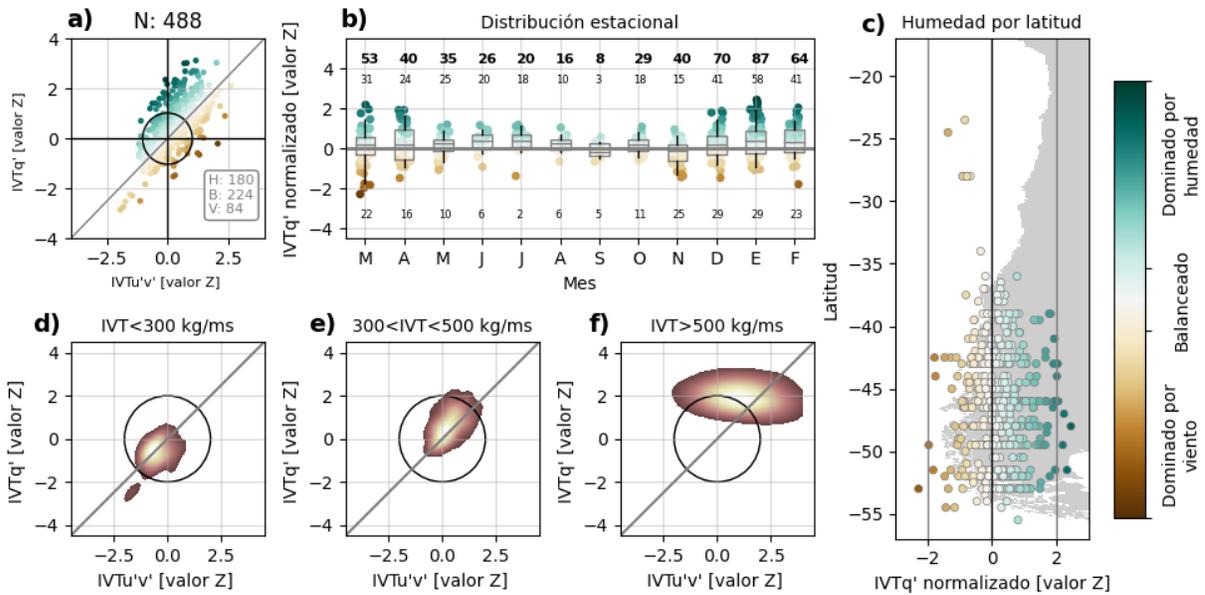


Figura 4.16. Caracterización de la composición vertical de los eventos de RA clasificados bajo el mecanismo de BP. (a) distribución comparativa de las variables $IVTq'$ e $IVTu'v'$ normalizadas. (b) variación estacional de los valores de $IVTq'$. Se indica en cada diagrama de cajas el número total de eventos por mes (número en **negrita), el número de eventos con $IVTq' > 0$ (número en el sector superior **no en negrita**) y el número de eventos con $IVTq'$ menor a 0. (c) distribución latitudinal de eventos y los valores $IVTq'$ asociados de cada uno de ellos. (d), (e) y (f) muestran la densidad de distribución específica de los valores de $IVTq'$ e $IVTu'v'$ para eventos débiles (< 300 kg/ms), medios (300 kg/ms $< IVT < 500$ kg/ms) y fuertes (> 500 kg/ms).**

4.2.3 Evolución del clúster

La Figura 4.17 muestra una comparación de la evolución de los compuestos de IVT y de anomalías de z_{500} en el día del impacto del RA, definidos teniendo un número objetivo de clusters distintos en cada fila (el cual se señala en cada fila en el panel izquierdo). En cada fila se representan los compuestos asociados al mecanismo de Baja Polar identificados bajo cada esquema de clasificación.

Se observa que el compuesto definido con la clasificación de Baja Polar de 6 grupos objetivos difiere significativamente de los compuestos definidos con 8, 10 y 12 grupos objetivos. El patrón de anomalías de z_{500} presenta una forma relativamente circular, mientras que en los otros describe una forma ovalada de mayor extensión zonal y no presenta una anomalía positiva al norte como lo hacen los otros. Además, el compuesto de IVT también difiere significativamente. En base a esto, es posible concluir que este patrón no es identificable con un número bajo de grupos objetivos.

Sin embargo, la evolución de los compuestos considerando 8, 10 y 12 grupos objetivos resulta similar, a pesar de que el patrón definido con 8 grupos objetivos presenta un compuesto de IVT con mayor intensidad que sus evoluciones (así como también un patrón de baja polar de mayor extensión). Este cambio puede asociarse a que una mayor posibilidad de desagregación de los RA en un número mayor de conjuntos objetivos genera que algunos de los eventos de mayor intensidad sean trasladados a otro clúster. En particular, y dada la posición de una anomalía positiva de z_{500} al este de la baja polar en el caso del compuesto en base a 8 grupos, se puede inferir la presencia de ciertos elementos que eventualmente podrían estar asociados a una onda de Rossby zonal.

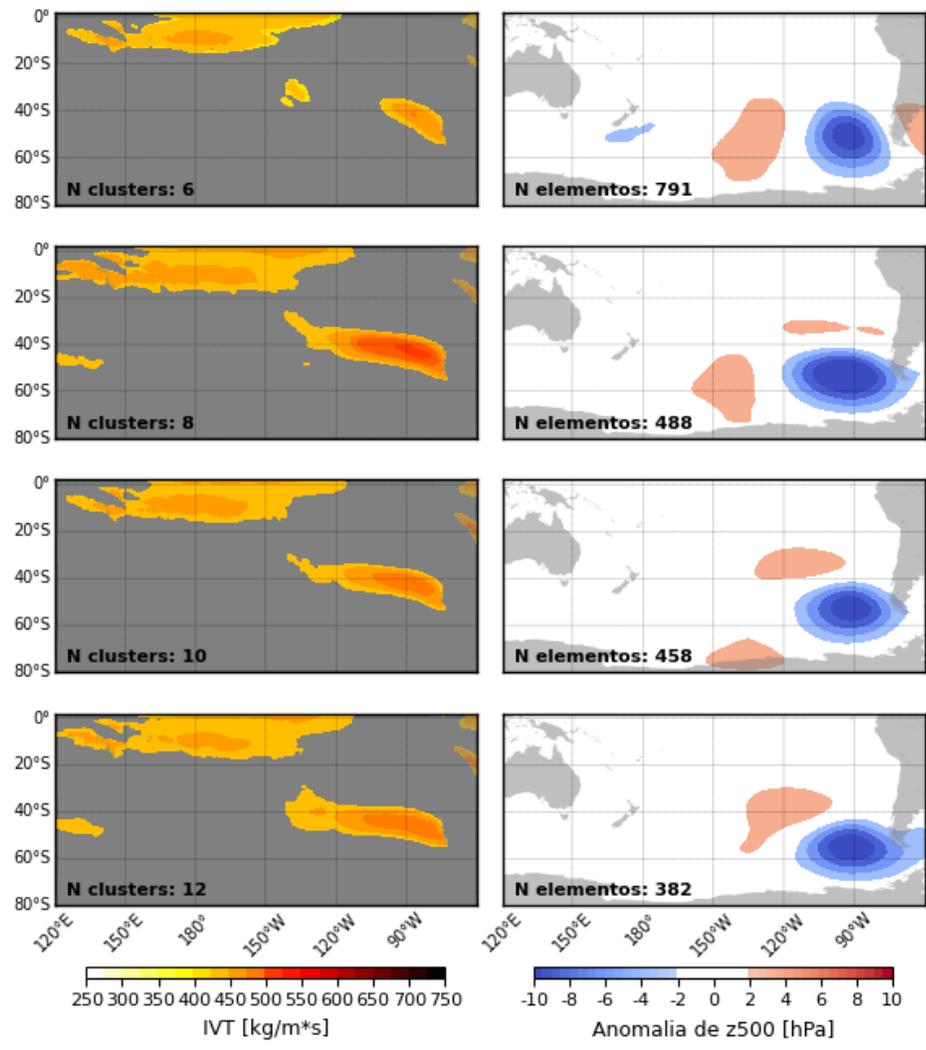


Figura 4.17. Evolución de los compuestos de IVT (panel izquierdo) y de anomalía de z500 (panel derecho) descritos por el mecanismo Baja Polar, en función del aumento de clusters objetivo definidos para el algoritmo de clasificación.

4.3 Engranaje (En)

Este mecanismo se caracteriza por el desarrollo de un patrón de perturbaciones cuasi estacionario en latitudes medias y altas. La perturbación se origina geográficamente en sectores del océano Índico y el área del continente marítimo y se comienza a desplazar hacia latitudes altas, donde eventualmente es reflejada hacia Sudamérica. La configuración espacial resultante facilita la ocurrencia de RA en la Patagonia, al canalizar la humedad presente en el aire tanto desde el trópico como desde latitudes altas.

4.3.1 Descripción del mecanismo

Este mecanismo se caracteriza por una onda atmosférica con velocidad de grupo baja y gran extensión. Dada su configuración, los RA que se generan aterrizan en el sector sur de la Patagonia: debido al posicionamiento de un anticiclón acoplado con un núcleo de baja presión ciclónica se forma una canalización de vapor de agua. Esta canalización logra adveccionar humedad desde los trópicos, aunque también se observan contribuciones desde latitudes altas, dada la configuración en serie y el posicionamiento de los distintos núcleos de altas y bajas presiones.

La evolución de este mecanismo ocurre en un periodo de tiempo menor al de otros mecanismos, identificándose que las anomalías toman valores más significativos solo entre 6 y 7 días previos al aterrizaje del RA. Los paneles al costado izquierdo de la Figura 4.18 muestran la evolución de anomalía de geopotencial en 500 hPa, y se observa como para el periodo entre 12 días previos y 8 días previos al impacto del RA no se registran perturbaciones intensas, solo mostrándose una leve tendencia hacia un valor de anomalía negativa.

Sin embargo, desde 7 días previos al aterrizaje del río, comienza a desarrollarse una anomalía positiva en el sector del mar de Tasmania, la cual rápidamente aumenta en tamaño e intensidad. A partir de entonces, comienza el desarrollo de una onda, a la cual resulta fácil identificar su rayo de onda, reforzándose primero está anomalía positiva, luego una anomalía negativa, y luego una anomalía positiva, tras refractarse al llegar a zonas polares. Este proceso de refracción de la onda es lo que determina la configuración de engranaje, definida por la interacción de una alta y una baja presión, que canalizan humedad e incrementa la velocidad de vientos cerca del continente generado el desarrollo de un RA.

Esta configuración de engranaje, que advecciona humedad desde los trópicos, se establece aproximadamente 5 días antes del aterrizaje del RA y desde ese periodo se intensifica por el paso de la onda. Es así como el IVT, que previo al desarrollo de esta onda ya presentaba condiciones favorables al desarrollo de un RA, se incrementa notablemente en la banda de interacción entre las anomalías positiva y negativa, lo que se muestra en los paneles al costado derecho de la Figura 4.18. Resulta interesante notar que en el periodo entre $t-12$ y $t-6$ existen valores significativos de IVT, proveniente tanto de los trópicos como de latitudes medias (paneles izquierdos, Figura 4.19). En el caso del IVT de latitudes medias, se observa un favorecimiento a su aumento, favorecido por la posición del jet subtropical.

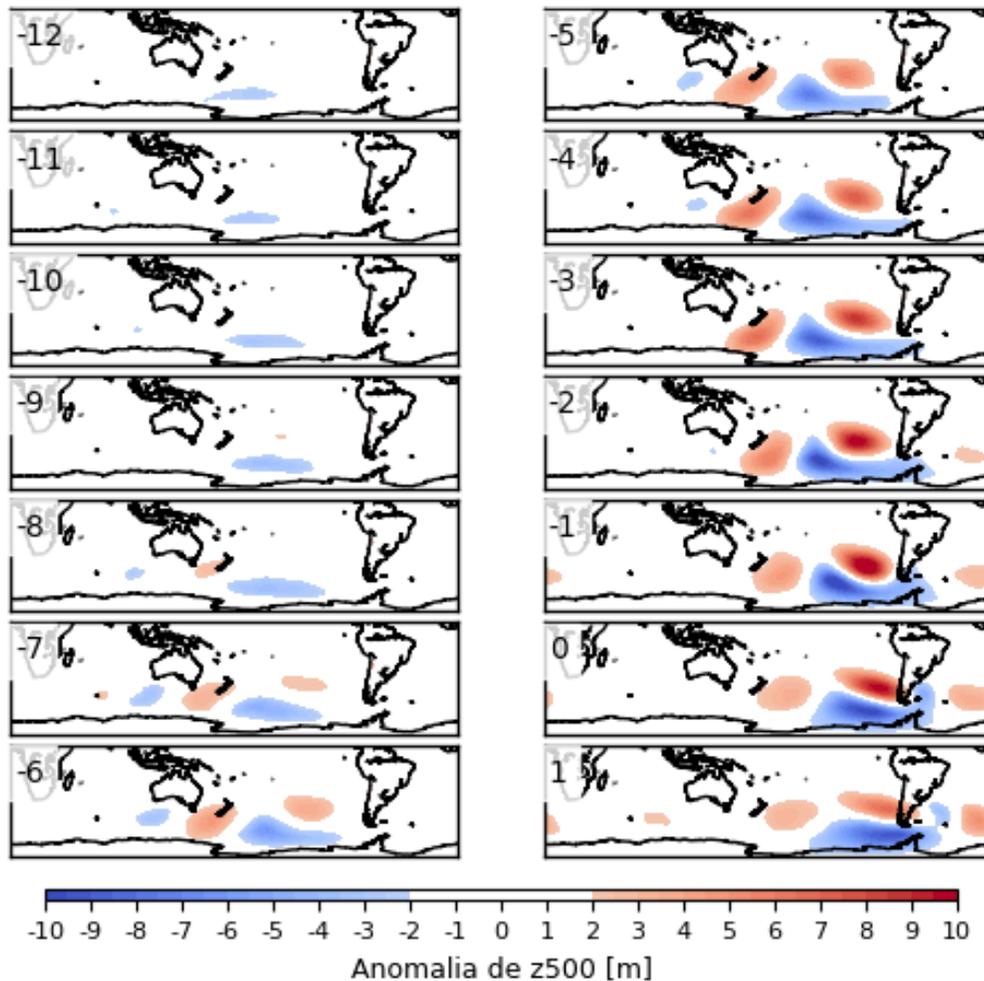


Figura 4.18. Evolución de los compuestos de campos atmosféricos (paneles de la columna izquierda, por fila) de 12, 6 y 3 días antes del impacto y en el día de contacto continental en el mecanismo de engranaje. Se grafica en esta figura los compuestos de anomalía de geopotencial en 500hPa (contornos coloreados), de anomalía de presión en superficie (contornos de línea) y los vectores representan valores de anomalía de viento en z200 mayores a 5 m/s. El sector derecho de la figura, donde se observan 14 paneles distintos, muestra la evolución del compuesto del campo de anomalías de geopotencial en 500hPa desde 12 días previos a 1 día después del contacto continental del RA.

La intensificación del IVT entre $t-6$ y t de impacto del RA resulta de un fenómeno compuesto: por un lado, aumento de la velocidad del viento en la zona de interacción de ambas anomalías y, por otro, un aumento de la disponibilidad de humedad, la cual es fuertemente canalizada al momento de impacto.

La evolución del agua precipitable se muestra en los paneles derechos de la Figura 4.19. En dichos paneles, se puede observar que la distribución del agua precipitable no varía significativamente en el periodo entre $t-12$ y $t-6$, que solo sufre cambios menores entre $t-6$ y $t-3$. Sin embargo, entre $t-3$ y el t de impacto del RA se forma una canalización drástica en la línea de interacción del “engranaje” (se destaca este fenómeno con un cuadro rojo en dicha figura). La razón del desarrollo de esta pluma de humedad, que finalmente desencadena el aterrizaje del RA, guarda relación con el desarrollo de una inestabilidad, en la cual la onda originalmente barotrópica pasa a ser baroclínica.

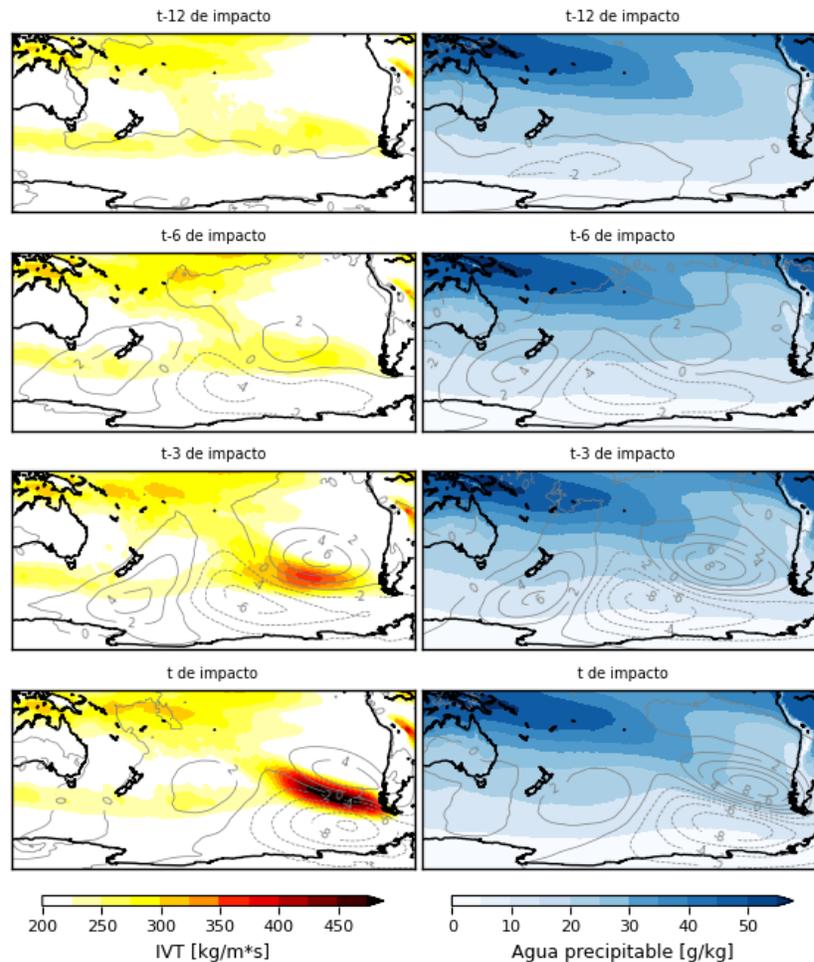


Figura 4.19. Evolución de los compuestos de IVT (paneles izquierdos, contornos coloreados) y de agua precipitable (paneles derechos, contornos coloreados) del mecanismo identificado como onda estacionaria del Pacífico. Los contornos de línea representan la anomalía de presión en superficie (paneles izquierdos) y la anomalía de geopotencial en $z500$ (paneles derechos).

Este mecanismo queda fuertemente condicionado por la generación de una inestabilidad en un contexto cuasi-estacionario, similar a lo que ocurre con el mecanismo de Baja Polar. Sin embargo, a diferencia del clúster anterior, en este caso el origen de la onda parece estar ubicado en el sector del continente marítimo en lugar del sector central del océano Pacífico.

El jet polar resulta un condicionante fundamental, estando desplazado hacia mayores latitudes en la época estival, por lo cual genera dos importantes efectos. Por un lado, la velocidad de fase de grupo de la onda queda asociada a la posición de este, y explica la rápida transmisión de la onda en periodos inferiores a 8 días. Por otro lado, provee la energía para el desarrollo de una inestabilidad baroclínica en la configuración de engranaje que se obtiene tras la refracción de la onda.

La Figura 4.20 entrega un resumen de los campos relevantes necesarios para explicar brevemente el desarrollo de este mecanismo. Los paneles izquierdos muestran en contornos coloreados la anomalía de función corriente en 200hPa y en contornos de línea la anomalía de presión superficial. Se observa que el desarrollo de la onda entre t-6 y t-3 se da de forma cuasi barotrópica, transmitiéndose de forma uniforme en todos los niveles

de la atmósfera. Sin embargo, en el t de aterrizaje del RA, la onda presenta condiciones baroclínicas, mostrando grandes diferencias entre los campos en altura y en superficie.

Como se mencionó previamente, el desarrollo de esta inestabilidad guarda relación con la posición del jet polar, desplazado hacia latitudes más australes en la época estival. Además, esta inestabilidad se ve reforzada por el gradiente de presiones más reforzado en el sector de refracción de la onda (ubicada en torno a la latitud 60°S), al aumentar la velocidad del viento en altura.

Los contornos coloreados de los paneles centrales de la misma figura muestran la anomalía de viento en 200 hPa, y su intensificación puede verse evidencia al seguir la evolución entre t-6, t-3 y t de impacto. Adicionalmente, ya en el tiempo de impacto del RA, la mayor cantidad de energía de la onda se encuentra concentrada en los núcleos que definen el engranaje (la anomalía positiva en el sector de Nueva Zelanda es prácticamente nula en estos instantes).

El desarrollo de todos estos puntos finalmente culmina en la canalización ya descrita de humedad, la cual incrementa los valores de agua disponible y por tanto los valores de IVT, como se muestra en los paneles derechos de la Figura 4.20. El impacto del RA ocurre finalmente por la desestabilización del mecanismo de engranaje, cuando el núcleo de baja presión en superficie se desplaza hacia el este y se posiciona longitudinalmente bajo el núcleo de alta presión, como se puede ver en el panel inferior del costado izquierdo de la Figura 4.20.

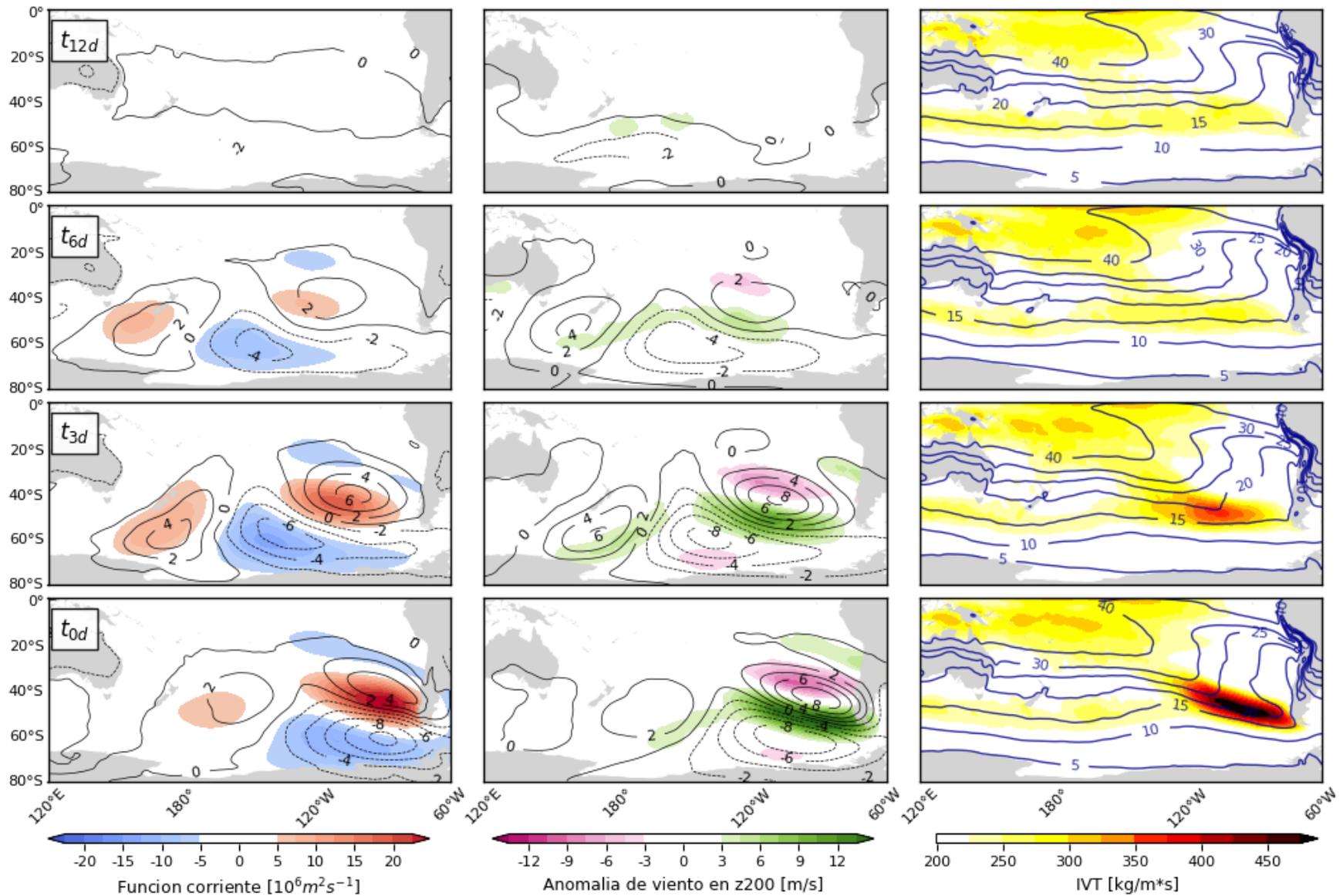


Figura 4.20. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de Engranaje. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la función corriente en 200 hPa (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en z500 y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

El panel izquierdo de la Figura 4.21 representa los valores máximos de MJO relacionados a este mecanismo. Se observa una concentración de ocurrencia de valores máximos en el Pacífico Occidental y el Continente Marítimo, lo que refuerza la hipótesis de que este mecanismo se basa en una teleconexión tropical. La mayoría de los eventos en las fases 4 a 7 se presentan en un rango de tiempo entre 9 y 12 días antes del impacto, lo que coincide en temporalidad con el desarrollo de la onda.

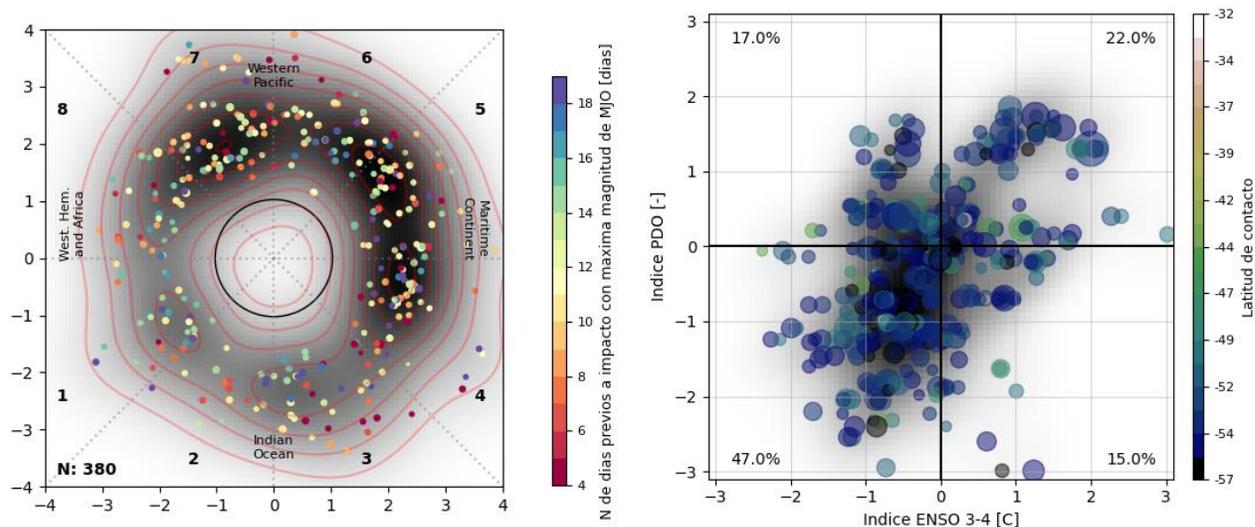


Figura 4.21. (panel izquierdo) Distribución de valores máximos de MJO observados en los días previos al contacto continental del RA para el mecanismo En. (panel derecho) Correlación entre la ocurrencia de eventos de RA de tipo Engranaje, su intensidad y latitud de impacto, con valores del índice de ENSO y del índice de la PDO.

El panel derecho de la Figura 4.21 presenta la distribución de eventos de RA de este mecanismo considerando los modos de variabilidad climática de ENSO y PDO. Se muestra que la ocurrencia de RA originados por este mecanismo se ve favorecida tanto por condiciones negativas de ENSO (64% de los casos) como de PDO (62% de los casos). Se ha reportado que estas condiciones guardan relación con el desarrollo de celdas de Walker, asociadas a eventos de convección en zonas que dan origen a ondas atmosféricas que caracterizan a este mecanismo (Kayano et al., 2019).

4.3.2 Caracterización de sus elementos

La Tabla 4.4 presenta una descripción de las características generales de los elementos que componen este clúster. Este mecanismo es uno de los que presenta un rango de aterrizaje más austral, ya que cerca del 80% de los elementos que lo componen tienen como punto de impacto la región de la Patagonia, abarcando desde la parte superior del Campo de Hielo Norte en su extremo septentrional hasta el Cabo de Hornos en su sector más austral.

Dadas las condiciones de canalización de humedad, se favorece el desarrollo de RA de gran longitud, lo cual se demuestra en el largo medio de los eventos, del orden de 6.500 km (en comparación de los 5.500 km como valor medio de todos los eventos estudiados).

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	12	18	42	66
Largo [km]	3479.5	4656.5	6528.9	8224.9	9820.9
Ancho [km]	379.7	475.2	597.9	707.2	861.9
IVT máximo	360.0	406.8	465.6	570.1	659.1
Latitud de contacto	-54	-53	-52	-48	-45
Dirección de contacto [°]	73.0	89.1	103.5	117.2	128.8

Tabla 4.4. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo de Engranaje.

Este mecanismo corresponde a una dinámica principalmente de la estación estival del hemisferio sur, concentrándose la mayor cantidad de sus eventos durante en el periodo entre diciembre y marzo, según lo que se muestra en la Figura 4.22. Adicionalmente, se observa que en general no presentan una componente dominante en los eventos medios, pero sí que los valores más extremos tienen una marcada componente de humedad superior, lo que es esperable dado el mecanismo de génesis de este tipo de eventos.

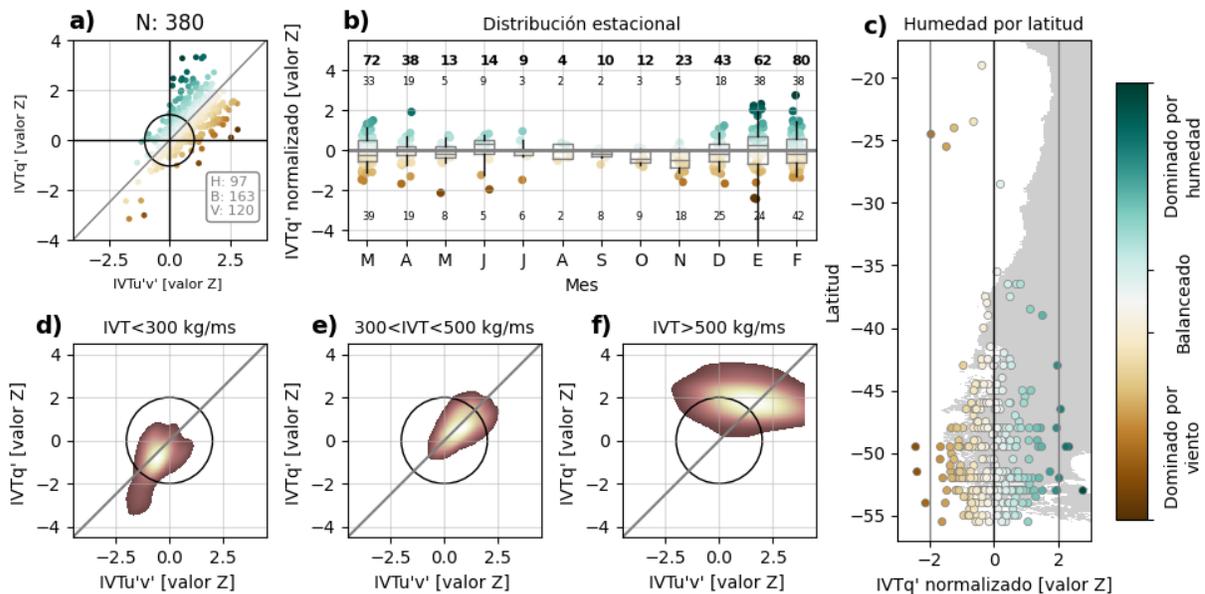


Figura 4.22. Caracterización de la composición vertical de los eventos de RA clasificados bajo el mecanismo de En. (a) distribución comparativa de las variables IVTq' e IVTu'v' normalizadas. (b) variación estacional de los valores de IVTq'. Se indica en cada diagrama de cajas el número total de eventos por mes (número en negrita), el número de eventos con IVTq' > 0 (número en el sector superior no en negrita) y el número de eventos con IVTq' menor a 0. (c) distribución latitudinal de eventos y los valores IVTq' asociados de cada uno de ellos. (d), (e) y (f) muestran la densidad de distribución específica de los valores de IVTq' e IVTu'v' para eventos débiles (<300 kg/ms), medios (300 kg/ms < IVT < 500 kg/ms) y fuertes (>500 kg/ms).

4.3.3 Evolución del clúster

La Figura 4.23 muestra la evolución de los compuestos de IVT y de anomalías de geopotencial en 500 hPa en los días de aterrizaje del RA, considerando diversos ejercicios de clasificación con un número de grupos objetivo distintos.

Se observa que desde la configuración con solo 6 grupos objetivos este mecanismo es identificable, y que, en clasificaciones con un mayor número objetivo de grupos, el algoritmo de clasificación sigue identificando este mecanismo sin mayores cambios en el patrón de IVT del compuesto que se obtiene (paneles izquierdos de la Figura 4.23). En el caso de los compuestos de anomalía de z500, que se presentan en los paneles derechos de la misma figura, se observan cambios leves en la extensión y la intensidad de perturbaciones generales, pero la disposición geográfica se replica en bajo todos los esquemas de clasificación.

La secuencia de una perturbación de valores positivos en el sector del Pacífico Central y el patrón característico de una anomalía positiva con su centro en torno a 40°S - $45^{\circ}\text{S}/90^{\circ}\text{W}$, y una perturbación negativa acoplada en latitudes más altas con su centro en torno a $65^{\circ}\text{S}/100^{\circ}\text{W}$ se puede identificar en todos los compuestos presentados sin dificultad.

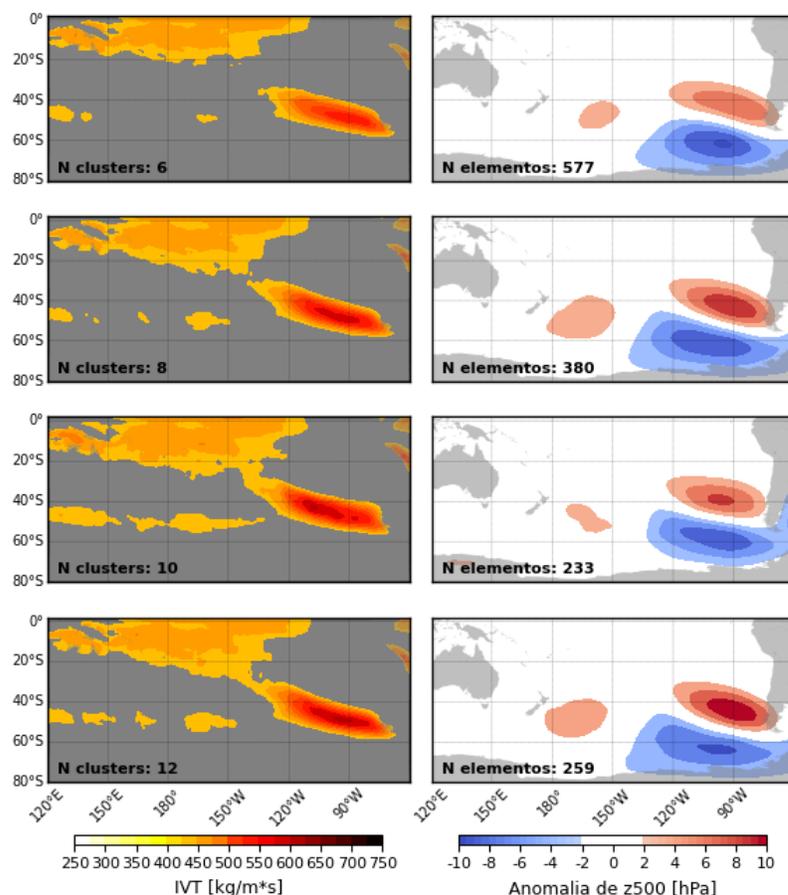


Figura 4.23. Evolución de los compuestos de IVT (panel izquierdo) y de anomalía de z500 (panel derecho) descritos por el mecanismo de Engranaje, en función del aumento de clusters objetivo definidos para el algoritmo de clasificación.

4.4 Ondas de Rossby n=3 (OR3)

Este mecanismo se caracteriza por el desarrollo de una onda de Rossby planetario de número de onda igual a 3, el cual genera una configuración que facilita la ocurrencia de eventos de RA principalmente en el sector norte de Patagonia, aunque alcanzando también sectores de la zona sur de Chile dependiendo de la configuración espacial de la onda.

Este mecanismo representa una de las características más prominentes de la circulación extra tropical del hemisferio sur, con impactos en distintos ámbitos como el hielo oceánico Antártico (Raphael, 2007; Raphael & Hobbs, 2014) y el transporte de calor y momentum (Raphael, 2004). Estudios previos sugieren que la existencia de esta onda se debe a la existencia de tres masas continentales y tres masas oceánicas distribuidas en latitudes media (Lejenas, 1988; van Loon & Jenne, 1972). Este tipo de patrón atmosférico se mantiene presente durante todo el año, con leves variaciones longitudinales ($\sim 20^\circ$ de longitud) entre otoño e invierno, pero grandes variaciones en amplitud y fase identifica tanto a escalas temporales mensuales como subestacionales (Turner et al, 2017).

Resulta interesante destacar que este mecanismo, a pesar de ser uno de los modos fundamentales de oscilación de la atmósfera del Hemisferio Sur, fue detectado en este estudio por medio de un algoritmo de clasificación no supervisado solo en función de los campos de IVT asociados a los eventos de RA. Esto entrega credibilidad respecto del uso algoritmos de clasificación para identificar mecanismos y patrones que no resultan evidentes a simple vista.

4.4.1 Descripción del mecanismo

Este mecanismo se rige por el desplazamiento de una onda de Rossby con número de onda cercano a 3, en la tropósfera alta, la cual a medida que se desplazando hacia el oeste perturba los niveles inferiores.

El desarrollo de esta onda ocurre principalmente en niveles altos, según se observa en la Figura 4.25 donde se representa la anomalía de función corriente en 200 hPa. Si bien es existe un pre-condicionamiento atmosférico, en solo en t-7 que la onda abarca desde el sector este del océano Indico hasta mediados del océano Pacifico. En este mismo periodo la onda alcanza latitudes polares y es refractada meridionalmente hacia el norte. Al refractarse, continua su camino hacia Sudamérica, pero su velocidad zonal de grupo disminuye.

Las causas de esto muy probablemente estén asociadas con dos factores: por un lado, el posicionamiento del jet polar, que es el factor primario en el traslado de estas perturbaciones y, por otro con una contribución probablemente menor, la ausencia de vientos zonales que faciliten su desplazamiento hacia el oeste.

La disminución de la velocidad zonal de la onda permite que la perturbación de la onda en altura incida con mayor intensidad los niveles bajos, al permanecer cuasi estacionaria durante más tiempo en un lugar. Así, el centro de anomalías negativo en altura ubicado frente al sector de Patagonia se refuerza, penetrando hasta niveles bajos de la atmosfera, con una perturbación cada vez mayor a medida que avanzan los días. Esta evolución se puede ver en los paneles izquierdos de la Figura 4.26, donde se observa como el centro de la baja presión en superficie avanza zonalmente hacia el este, mientras intensifica su magnitud negativa (contornos de línea representan anomalía de presión superficial).

De esta secuencia resulta evidente que la conexión desde niveles altos hacia los más bajos ocurre de forma significativa solo en el caso de la perturbación negativa ubicada costa afuera de la Patagonia. Además, también evidencia el carácter baroclínico de este tipo de onda, al mostrar las diferencias de posicionamiento de los núcleos de las perturbaciones en altura con respecto a la superficie, aun en momento como t-6 donde el efecto de la Cordillera y de la refracción de la onda aun no son tan evidentes.

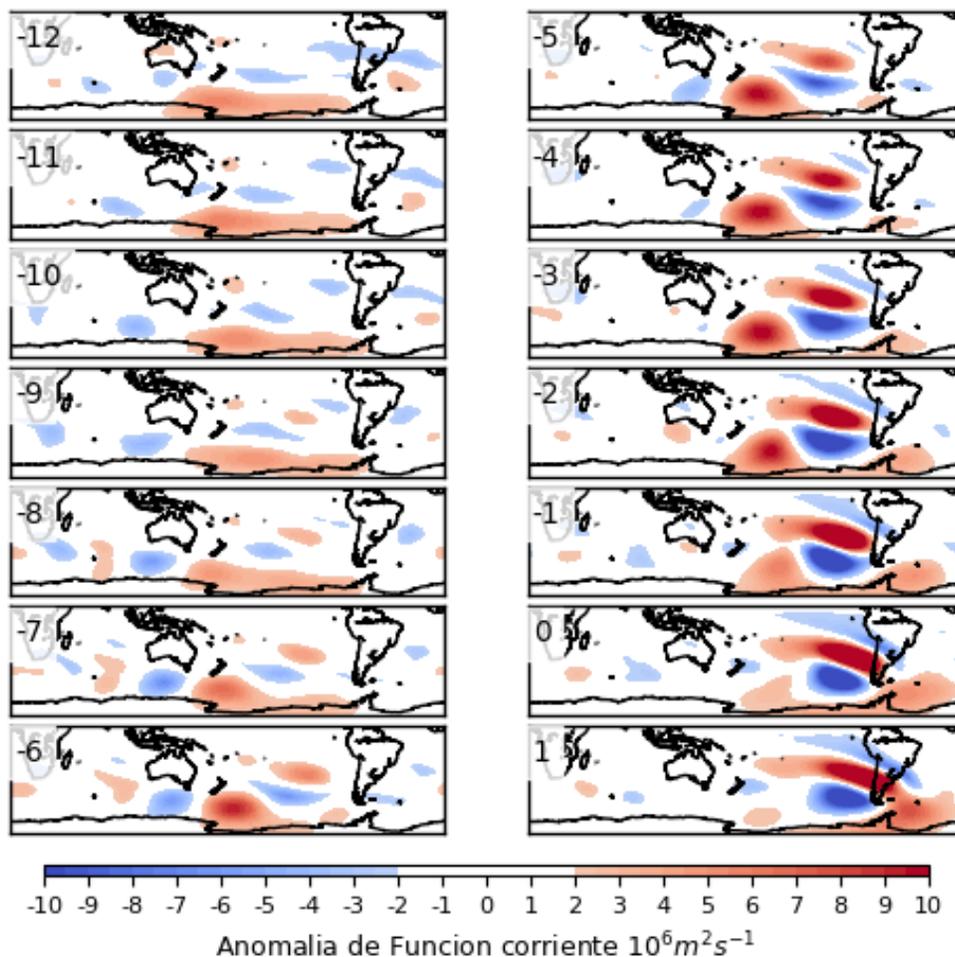


Figura 4.25. Evolución del compuesto de anomalía de función corriente en 200 hPa en los 12 días (contornos coloreados) y la anomalía de presión superficial (en líneas) en los días previos al aterrizaje del RA bajo el mecanismo de ondas de Rossby con número de onda 3.

El paso de esta onda es particularmente visible en la evolución de las anomalías de geopotencial en 500 hPa, según lo que se muestra en los paneles centrales de la Figura 4.26. En esta figura se muestra que las perturbaciones en este nivel se inician en el Océano Índico, y que se trasladan a través del Océano Pacífico en solo 6 días (notar que la evolución ocurre prácticamente entre t-6d, t-3d y t de contacto).

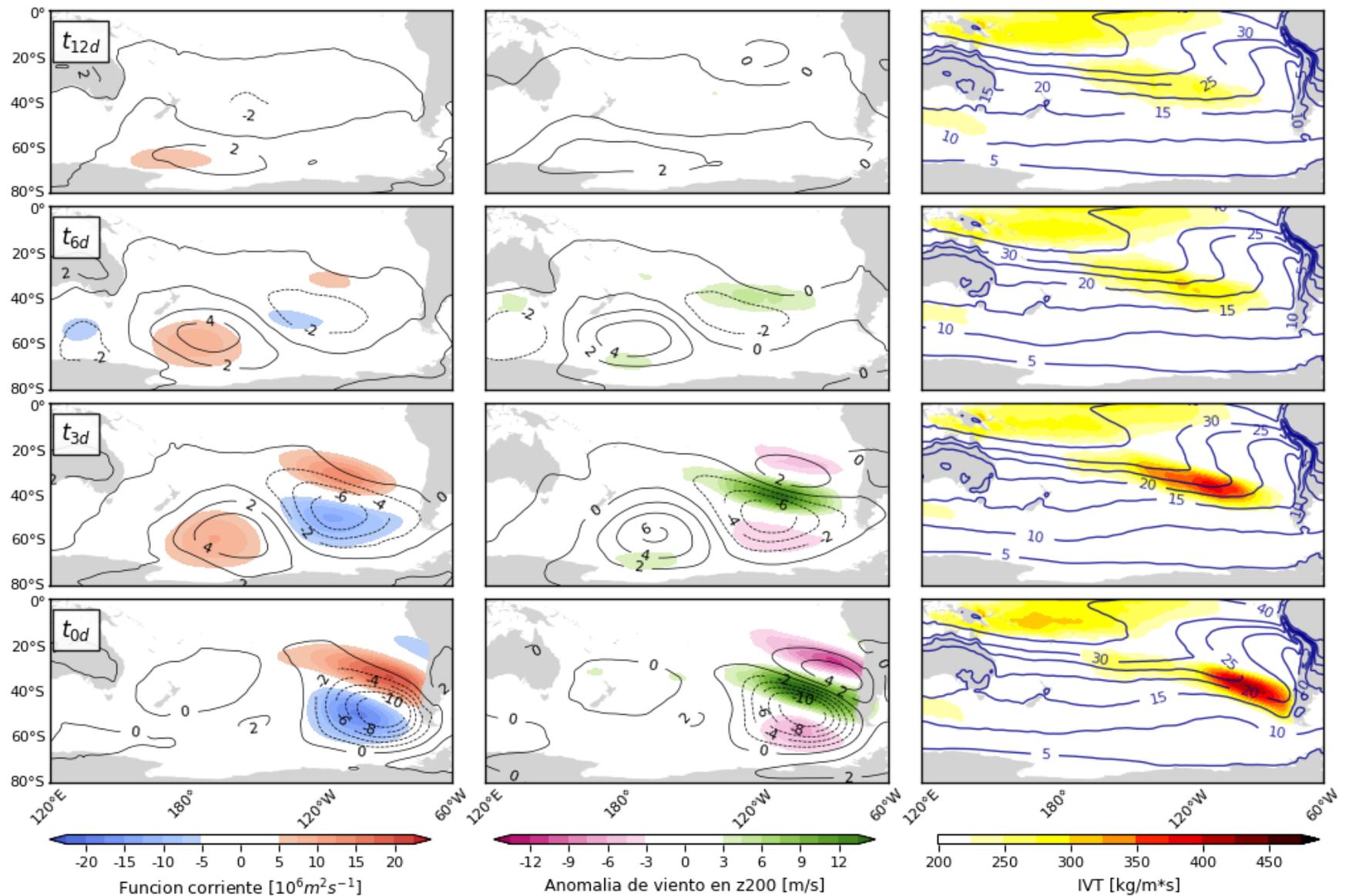


Figura 4.26. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de onda de Rossby con número de onda igual a 3. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la función corriente en 200 hPa (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en z500 (contornos de líneas) y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

El desarrollo de eventos de RA con este mecanismo es una consecuencia directa de esta intensificación del núcleo de baja presión en superficie. Dado que esta perturbación abarca desde los niveles altos hasta los más bajos, se genera una doble intensificación de las variables que componen el IVT, de la siguiente forma:

- a) la humedad comienza a ser advectada desde latitudes tropicales hacia el sur, dado el efecto canalizador de la baja presión. Este efecto canalizador es reforzado en niveles medios por un núcleo de alta presión que desarrolla una estructura de pseudo-engranaje similar al mecanismo de la sección anterior (ver paneles derechos de la Figura 4.26). Se identifica que entre $t-3$ y t las curvas isohumas se ven alteradas de mayor forma, precipitando finalmente el contacto del RA con la superficie continental.
- b) El viento comienza a intensificarse, en todos los niveles, de forma coherente, incluso en niveles altos dada la posición cuasi estacionaria que asume la onda durante el periodo $t-6$ a t de impacto (notar los incrementos de anomalía de viento en altura, que se muestran en contorno coloreados de los paneles centrales de la Figura 4.26).

La evolución conjunta de estas dos variables de forma continua tiene como consecuencia un aumento gradual pero sostenido de los valores de IVT (contornos coloreados, paneles al costado derecho, Figura 4.26) coherente con la intensificación de la baja presión en superficie. La evolución del RA atmosférico asociado a esta intensificación del IVT hace que el ángulo de incidencia de los eventos de este mecanismo presente un gran rango de latitudes donde eventualmente impacta en el continente.

La Figura 4.27 muestra los valores y fase de intensidad máxima de MJO en un intervalo desde 4 hasta 18 días antes del impacto de los RA de este mecanismo. Se observa que existe, a modo general, una distribución relativamente uniforme en todas las fases, con las intensidades máximas variando entre 8 y 15 días antes del impacto generalmente.

Esto guarda relación a que este tipo de ondas corresponden a una de las frecuencias naturales de la circulación atmosférica (van Loon & Jenne, 1972), por lo cual puede esperarse su ocurrencia en cualquier fase. Sin embargo, estudios recientes relacionan entre actividad tropical y el favorecimiento del desarrollo de este tipo de ondas (Goyal et al., 2021). En particular, Goyal (2021) propone que eventos intensos de convección en los sectores del continente marítimo y del Pacífico occidental generan el desarrollo de este tipo de ondas. Esta relación se ve reflejada en la figura en una concentración local de las fases 5 y 6 en la Figura 4.27.

No se observa una tendencia preferente a la ocurrencia de eventos de RA en este mecanismo en relación a modos de variabilidad de gran escala.

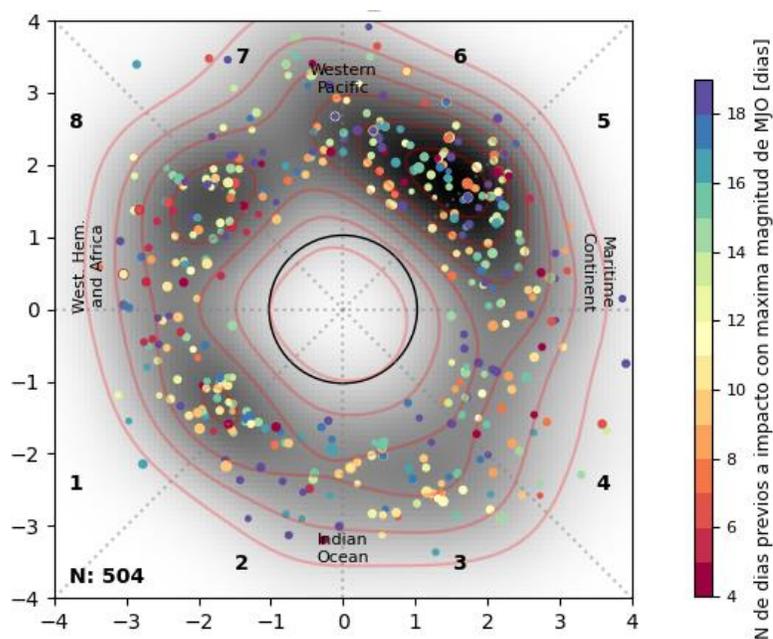


Figura 4.27. Distribución de valores máximos de MJO observados en los días previos al contacto continental del RA para el mecanismo OR3.

4.4.2 Caracterización de sus elementos

La Tabla 4.5 presenta descriptores de las características de los eventos de RA que ocurren bajo este mecanismo. Los valores tanto de largo, ancho, e IVT máximo son valores cercanos al promedio del conjunto. Sin embargo, destaca particularmente el amplio rango de latitud donde pueden aterrizar los RA de este mecanismo, abarcando la totalidad de la Patagonia e incluso parte de la zona centro-sur.

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	12	18	36	60
Largo [km]	3060.7	3910.0	5318.4	7418.6	9011.4
Ancho [km]	304.9	400.7	524.6	672.4	792.1
IVT máximo	358.4	404.6	479.8	574.5	682.6
Latitud de contacto	-52	-49.5	-46.5	-43	-40.5
Dirección de contacto [°]	93.2	108.8	122.1	136.3	146.3

Tabla 4.5. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo de onda de Rossby con número de onda 3.

La Figura 4.28 presenta una mayor caracterización de la composición de los eventos generados bajo este mecanismo. Según la descripción dinámica realizada, este mecanismo cuenta con una contribución equilibrada entre la advección de humedad debido a la baja presión en superficie como la intensificación de los vientos producto de lo mismo.

Esto genera eventos que, en general, son balanceados respecto a su composición, como se puede ver en el cuadro superior izquierdo de la figura, donde se muestra que los eventos usualmente no presentan una tendencia ser dominados ni por la humedad ni por el viento.

Solo en el caso de los eventos de mayores magnitudes, se observa que tienden a ser dominados por una componente de humedad, como lo muestra el panel derecho inferior.

El panel superior central muestra la distribución temporal de la ocurrencia de eventos, con una clara preferencia a que ocurran el periodo de otoño austral (periodo marzo a junio), y que es donde ocurren los eventos de mayor intensidad. Adicionalmente, es interesante destacar que durante el mes de marzo es cuando la temperatura superficial del mar en la zona presenta sus mayores valores climatológicos. Fuera de este periodo la frecuencia de eventos disminuye drásticamente. Esto posiblemente guarde relación con las variaciones estacionales de ubicación que presenta el desarrollo de este tipo de ondas, como lo describe (Turner et al., 2017), cuyo rango de variación alcanza hasta 20° de longitud.

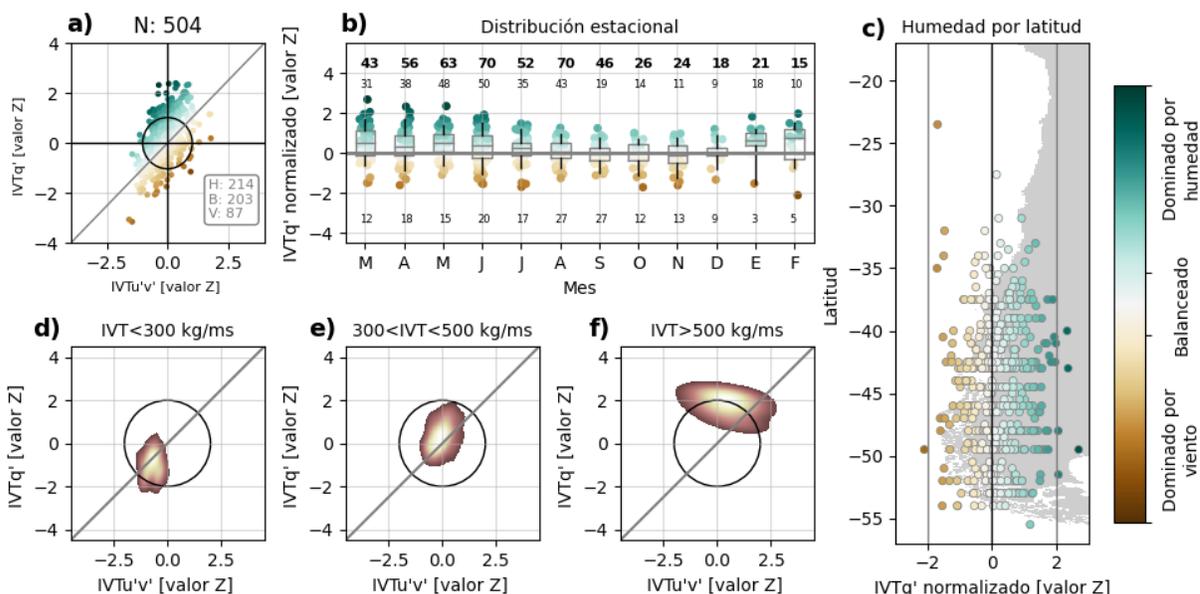


Figura 4.28. Caracterización de la composición vertical de los eventos de RA clasificados bajo el mecanismo de OR3. (a) distribución comparativa de las variables $IVTq'$ e $IVTu'v'$ normalizadas. (b) variación estacional de los valores de $IVTq'$. Se indica en cada diagrama de cajas el número total de eventos por mes (número en negrita), el número de eventos con $IVTq' > 0$ (número en el sector superior no en negrita) y el número de eventos con $IVTq'$ menor a 0. (c) distribución latitudinal de eventos y los valores $IVTq'$ asociados de cada uno de ellos. (d), (e) y (f) muestran la densidad de distribución específica de los valores de $IVTq'$ e $IVTu'v'$ para eventos débiles ($< 300 \text{ kg/ms}$), medios ($300 \text{ kg/ms} < IVT < 500 \text{ kg/ms}$) y fuertes ($> 500 \text{ kg/ms}$).

4.4.3 Evolución del clúster

La Figura 4.29 muestra la evolución de los compuestos de IVT y de anomalías de geopotencial en 500 hPa en los días de aterrizaje del RA, según los elementos clasificados en el clúster identificado como OR3, usando un número de grupos objetivo distintos.

A medida que se tienen más grupos objetivos disponibles, la evolución del clúster de anomalías de z_{500} muestran cambios en la posición de los núcleos negativos y positivos tras la refracción. A mayor cantidad de grupos, su posicionamiento tiende a un alineamiento meridional, mientras que en menor número se observa una “inclinación” en el ángulo de refracción por donde se transmite la onda. Adicionalmente, se observa que a mayor número tiene una intrusión de una anomalía positiva en el sector antártico. Se

considera que la evolución de este clúster queda condicionada a la mayor disponibilidad de grupos lo que permite una mayor separación de elementos en términos estacionales. Al existir una variación geográfica de este mecanismo función de su estacionalidad, se espera que un mayor número de clusters permita una segregación en función de esto, condicionando los compuestos de circulación atmosférica.

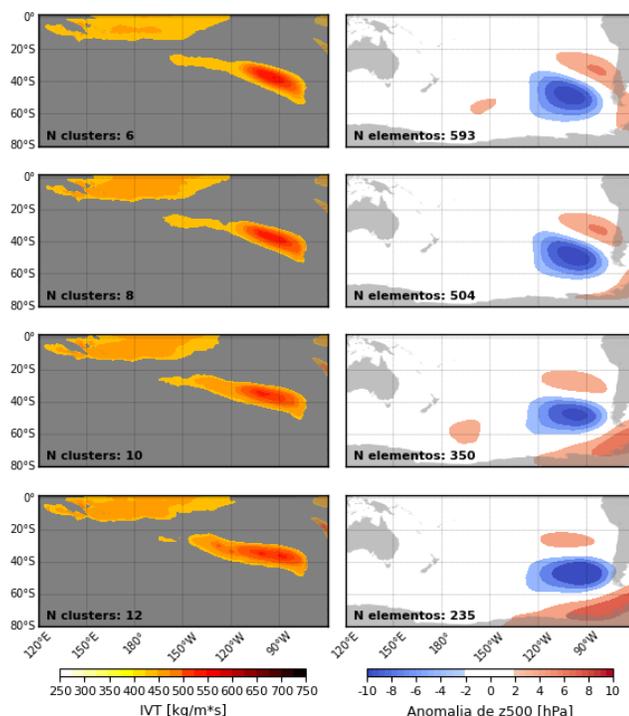


Figura 4.29. Evolución de los compuestos de IVT (panel izquierdo) y de anomalía de z500 (panel derecho) descritos por el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 3, en función del aumento de clusters objetivo definidos para el algoritmo de clasificación.

La Figura 4.30 confirma, al igual que en casos anteriores, que la inclusión de una mayor cantidad de grupos objetivos posibles solo remueve eventos de la clasificación realizada con 8 grupos, y que no se reclasifican o atribuyen eventos a este mecanismo adicionales a los identificados en instancias previas de clasificación.

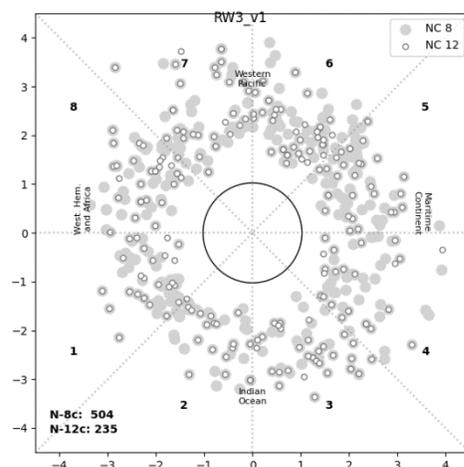


Figura 4.30. Comparación de los eventos identificados en el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 3 utilizando 8 y 12 clusters como objetivo en el algoritmo.

4.5 Ondas de Rossby $n=4$ (OR_{4n} y OR_{4s})

Este mecanismo corresponde al desarrollo de ondas de Rossby de número de onda en torno a 4 y presenta la particularidad de ocurrir en dos polaridades. Dependiendo de la “polaridad” de la onda, este mecanismo genera la ocurrencia de eventos de RA en distintos sectores geográficos del país:

- a) **Fase norte:** se genera eventos de RA en el sector de Chile central.
- b) **Fase sur:** se generan eventos en el extremo sur de la Patagonia.

Este mecanismo presenta similitudes en una de sus fases con el mecanismo anterior de número de onda de Rossby con número de onda 3, pero difiere en el número de onda y la evolución de esta. La actividad de los RA ha sido asociada previamente con la propagación y rompimiento de ondas de Rossby (Benedict et al., 2019)

4.5.1 Descripción del mecanismo

Este mecanismo se basa en ondas de Rossby con número de onda 4, es decir, con una longitud de onda cercana a 90° de distancia longitudinal. Estas ondas ocurren de forma natural en la circulación atmosférica, pero varían en sus fases y posicionamientos. Estas ondas generan condiciones que conducen a la ocurrencia de RA, debido a que facilitan la advección de humedad desde latitudes tropicales y un aumento de los vientos en niveles medios y bajos.

Se han identificado dos patrones de onda con número de onda 4, con fases opuestas y un leve desfase en su posicionamiento, que generan eventos de RA en distintos sectores geográficos de Chile. Para efectos de este trabajo, se denomina:

- a) **fase norte** al patrón de onda de Rossby con $n=4$ que genera eventos de RA cuya latitud de aterrizaje se ubica en torno a $40^\circ\text{S} \pm 10^\circ$. La fase norte se caracteriza por tener una anomalía de tipo positiva en el nodo de refracción ubicado en latitudes altas en torno a $110\text{-}120^\circ\text{W}$, con una latitud media de 60°S .
- b) **fase sur** a la configuración con un patrón similar de ondas, pero de polaridad inversa a la de fase norte, donde la anomalía donde pivotea el rayo de la onda es de tipo negativo, y que genera eventos de RA que impactan geográficamente en el sector de la Patagonia chilena, entre 44°S y 53°S .

La Figura 4.31 muestra las evoluciones de la anomalía de z_{500} para ambas fases de este mecanismo. Estos mecanismos, al tratarse del desarrollo de ondas atmosféricas, se rigen principalmente por perturbaciones de campos en altura. Sin embargo, son los efectos de estas perturbaciones en niveles más bajos los que finalmente gatillan el desarrollo de eventos de RA. A pesar de su similitud en el esquema de alternancia y el número de onda que condiciona sus posiciones geográficas, existe un leve desfase entre ambos modos de 10° .

Esto es particularmente notorio en la anomalía donde se genera la refracción al alcanzar latitudes polares: en la fase norte corresponde a una anomalía positiva, cuyo centro se ubica cerca de 120°W ; en el caso de la onda de fase sur, se trata de una anomalía negativa con su centro ubicado cerca de 110°W . La ubicación de estos centros condiciona el posicionamiento de la siguiente fase de la onda provocando, en el caso de la fase norte un núcleo de anomalías negativas frente a la costa de Chile, mientras que en el caso de la fase sur un núcleo de anomalías positivas sobre la región más austral de Sudamérica.

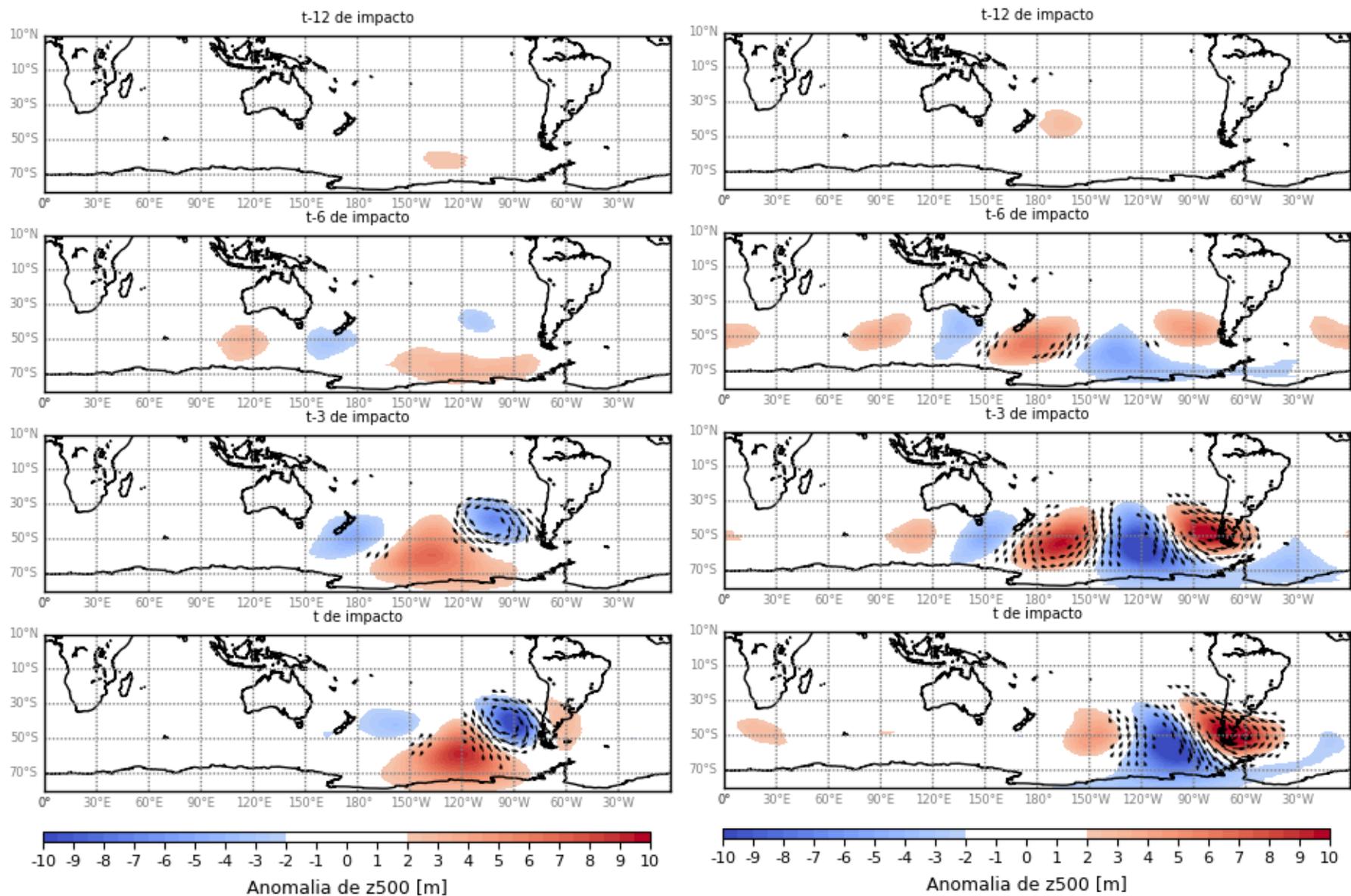


Figura 4.31. Evolución del compuesto de anomalía del geopotencial en 500 hPa, para los días t-12, t-6, t-3 y t de aterrizaje del día atmosférico para el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 4, en sus fases norte (panel izquierdo) y fase sur (panel derecho). Las flechas representan sectores donde las anomalías de viento son superiores a 5 m/s.

La ubicación de estos dos núcleos de anomalías son los que, de una forma similar al caso de onda de Rossby con número de onda 3, propician las condiciones para la generación de RA.

La Figura 4.32 muestra la evolución de los campos atmosféricos de IVT y de agua precipitable, para cada una de las fases de estos sub-mecanismos. Los paneles al costado izquierdo de dicha figura muestran como el posicionamiento de la anomalía negativa en el caso de la fase norte, genera advección de humedad desde latitudes tropicales y una intensificación de los vientos. Esto conduce a que se favorezcan condiciones para la ocurrencia de un RA, como lo demuestra por ejemplo la mayor disponibilidad de agua precipitable en la zona costera de Chile entre 35°S y 40°S.

El posicionamiento de esta anomalía frente a las costas condiciona así que el área afectada sea la zona centro-sur y sur de Chile. Sin embargo, y a diferencia de otros mecanismos anteriores como por ejemplo el de engranaje, no se observa un efecto sinérgico de circulaciones ciclónicas y anticiclónicas de manera que se canalice la advección de humedad y de aumento de viento, lo que genera que los eventos de este tipo de mecanismo presenten valores medios de IVT menores comparativamente al de otros mecanismos.

Análogamente, los paneles de la derecha de la Figura 4.32 muestran la evolución de los campos de IVT y agua precipitable para la fase sur de este mecanismo. En este caso, se observa que la configuración inversa de la polaridad de las anomalías respecto a la fase norte, favorece la advección de humedad hacia latitudes más altas, provocando eventos de RA primordialmente la zona de la Patagonia chilena.

Un factor adicional en este modo que contribuye al desarrollo de RA en este mecanismo es que el desfase que se observa de esta fase respecto al posicionamiento de la anomalía de refracción, conduce a que en este caso sí se tenga un efecto sinérgico entre las circulaciones ciclónicas y anticiclónicas para canalizar la humedad desde latitudes más bajas hacia esta zona, similar a lo observado en el mecanismo de engranaje. Adicionalmente, este mismo efecto sinérgico genera un aumento más intenso de los vientos, lo que conlleva un aumento de los valores de transporte de humedad y una mayor efectividad en la advección de humedad. Esto es evidente al notar como la evolución de las isohumas se encuentran notoriamente desplazadas hacia sectores más australes incluso 3 días antes del choque del RA con el continente, así como también en la intensificación progresiva del IVT. En particular, esta fase parece recibir contribuciones desde latitudes extra tropicales, debido a la circulación ciclónica propiciada por la anomalía negativa de refracción.

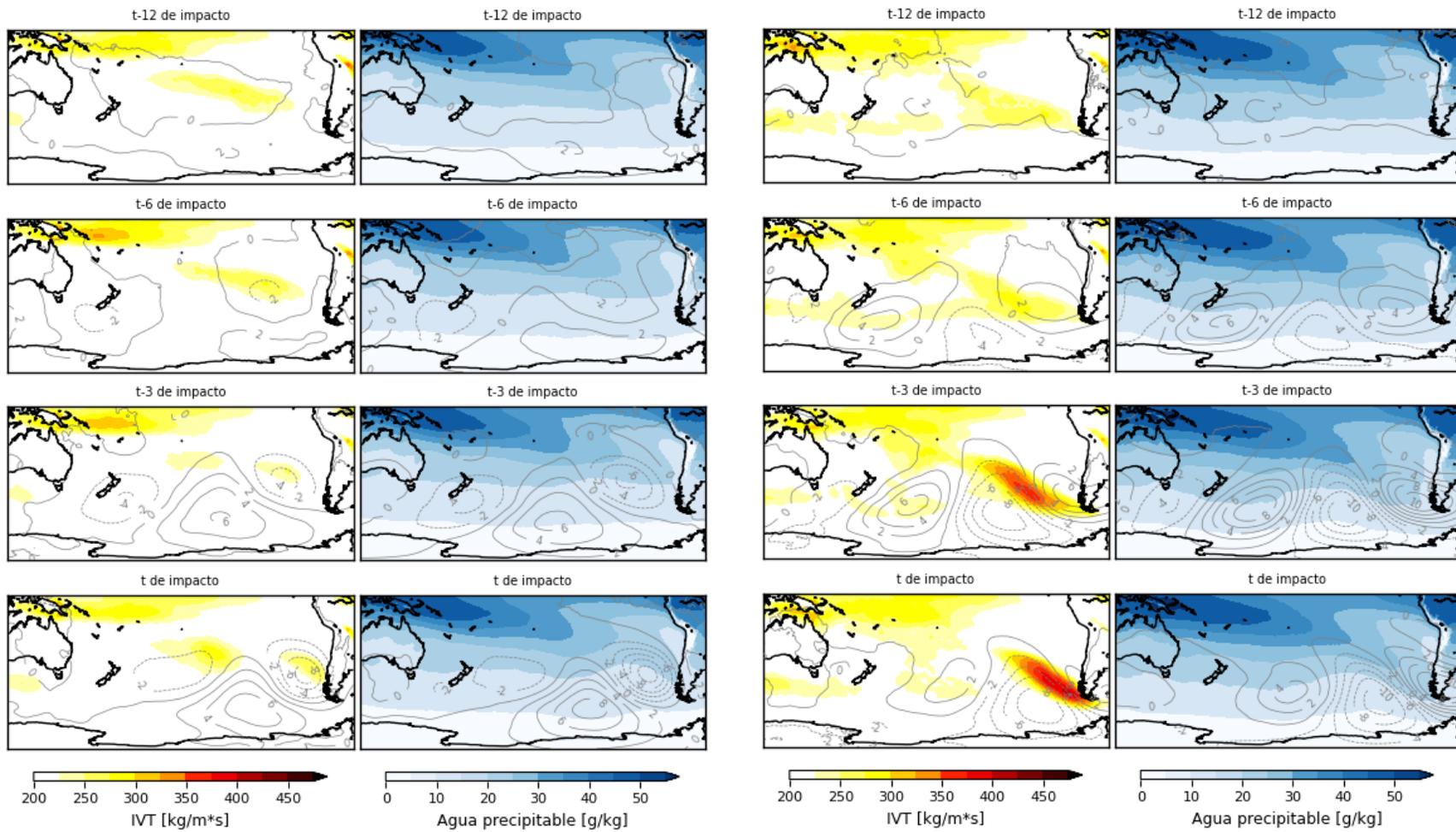


Figura 4.32. Evolución de los días t-12, t-6, t-3 y t de impacto de los campos de IVT (en colores) y anomalía de z500 (líneas) en los paneles del costado izquierdo y de agua precipitable y anomalía de presión superficial en los paneles del costado derecho para el mecanismo de onda de Rossby con número de onda, en su fase norte (paneles izquierdos) y en su fase sur (paneles derechos).

Las Figura 4.33 y Figura 4.34 muestran la evolución temporal en t-12d, t-6d, t-3d y t de impacto para las fases norte y sur respectivamente, de distintos campos que permiten relacionar lo que ocurre en niveles bajos y medios con las forzantes principales de su alteración correspondiente a las perturbaciones en niveles altos.

En los paneles de la izquierda, se muestra una comparación entre los campos de función corriente en 200 hPa (contornos de colores) y la presión superficial a nivel del mar. En ambos casos se observa que hasta el periodo t-6 el desarrollo de la onda se da de forma relativamente barotrópica. Sin embargo, tras esto, se genera una inestabilidad y la onda pasa a tener un comportamiento baroclínico.

A pesar de las similitudes de ambas fases, existe una diferencia fundamental entre ellas: la extensión de la onda y la cantidad de nodos activos que presentan. En el caso de la fase norte, el rayo de la onda es de un largo relativamente corto, donde se mantienen como máximo tres nodos activos de anomalías. En el caso de la fase sur, se registran cinco nodos activos en el desarrollo de la onda. Esta diferencia es notoria incluso en las perturbaciones percibidas en niveles medios (ver Figura 4.31).

La cantidad de nodos activos puede guardar relación con el origen de la onda, ya sea por modos de variabilidad natural de la atmósfera o teleconexiones asociadas eventos de alta convección, las que podrían eventualmente jugar un rol crítico, ya sea como gatillo inicial del desarrollo de estas ondas o bien como un factor que llega a reforzar un fenómeno de ocurrencia natural. La longitud de la onda en el caso de la fase sur genera como consecuencia que el tránsito de la onda se mantenga por más tiempo y se alcancen, por tanto, perturbaciones mayores en niveles inferiores. Esto se hace patente, por ejemplo, en las anomalías de z500 presentes en la Figura 4.31, donde se observa que las anomalías de la fase sur son mayores comparativamente a las de la fase norte. Esto genera un factor adicional a que esta última fase desarrolle eventos de RA más intensos que su contraparte norte, complementando el efecto sinérgico de canalización de humedad de las anomalías positiva y negativa

Los paneles centrales muestran en contornos de colores las anomalías de viento en altura (200hPa). Los valores de estas anomalías aumentan a medida que se aproxima el momento de impacto del RA, de forma similar a lo que ocurre en el mecanismo de onda de Rossby con número de onda igual 3, debido a que el desplazamiento longitudinal de la onda se ralentiza tras la refracción. Sin embargo, la intensificación de las anomalías es mayor en el caso de la fase sur que en el caso de la fase norte. La misma diferencia en intensidades se ve reflejada en la isohumas que se muestran en los paneles a la derecha de cada figura respectiva, donde los efectos de las circulaciones ciclónica (en el caso de la fase norte) y anticiclónica (en el caso de la fase sur) resultan evidentes en la forma en que se distribuyen estas curvas.

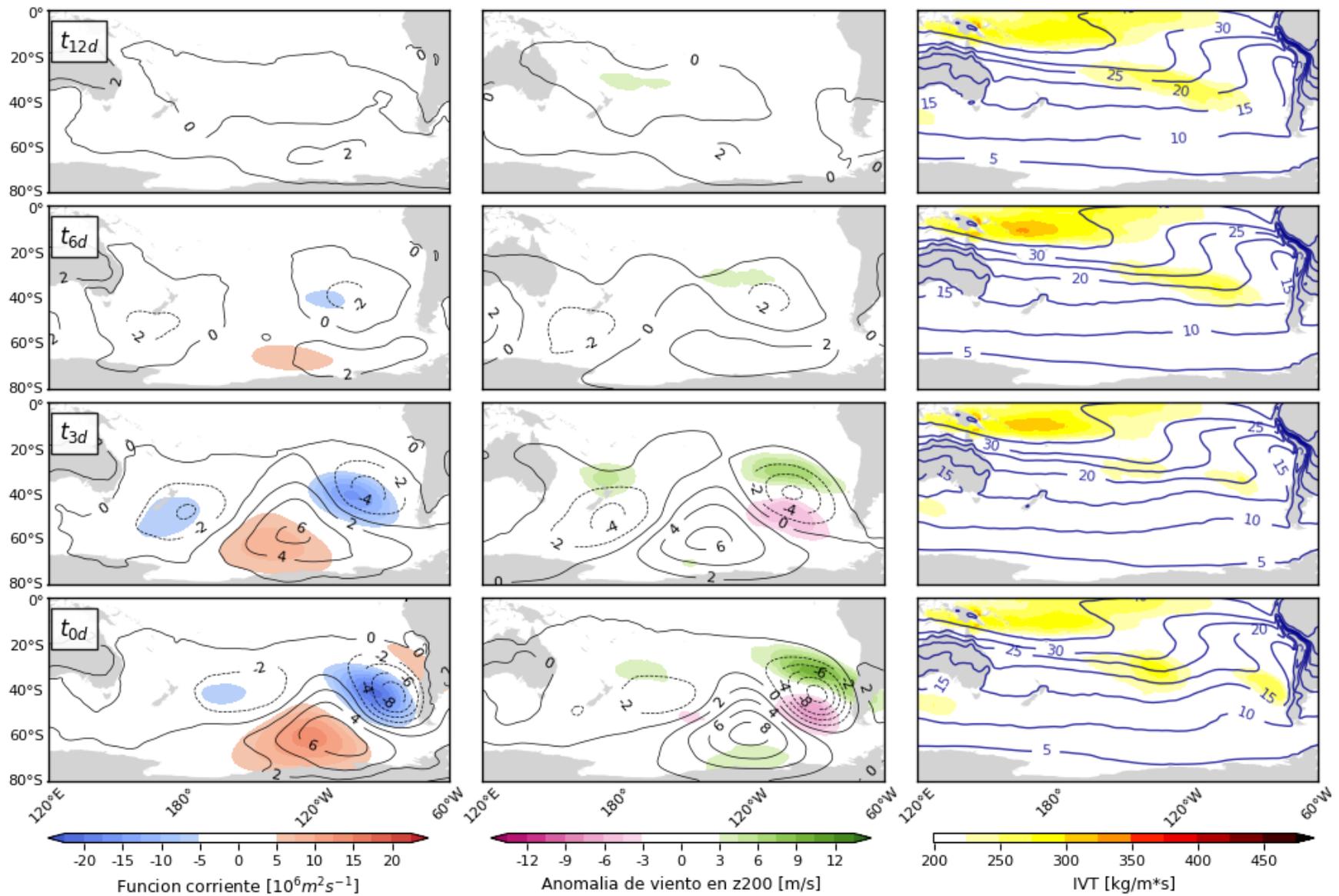


Figura 4.33. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de onda de Rossby con número de onda igual a 4, en su fase norte. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la función corriente en 200 hPa (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en z500 y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

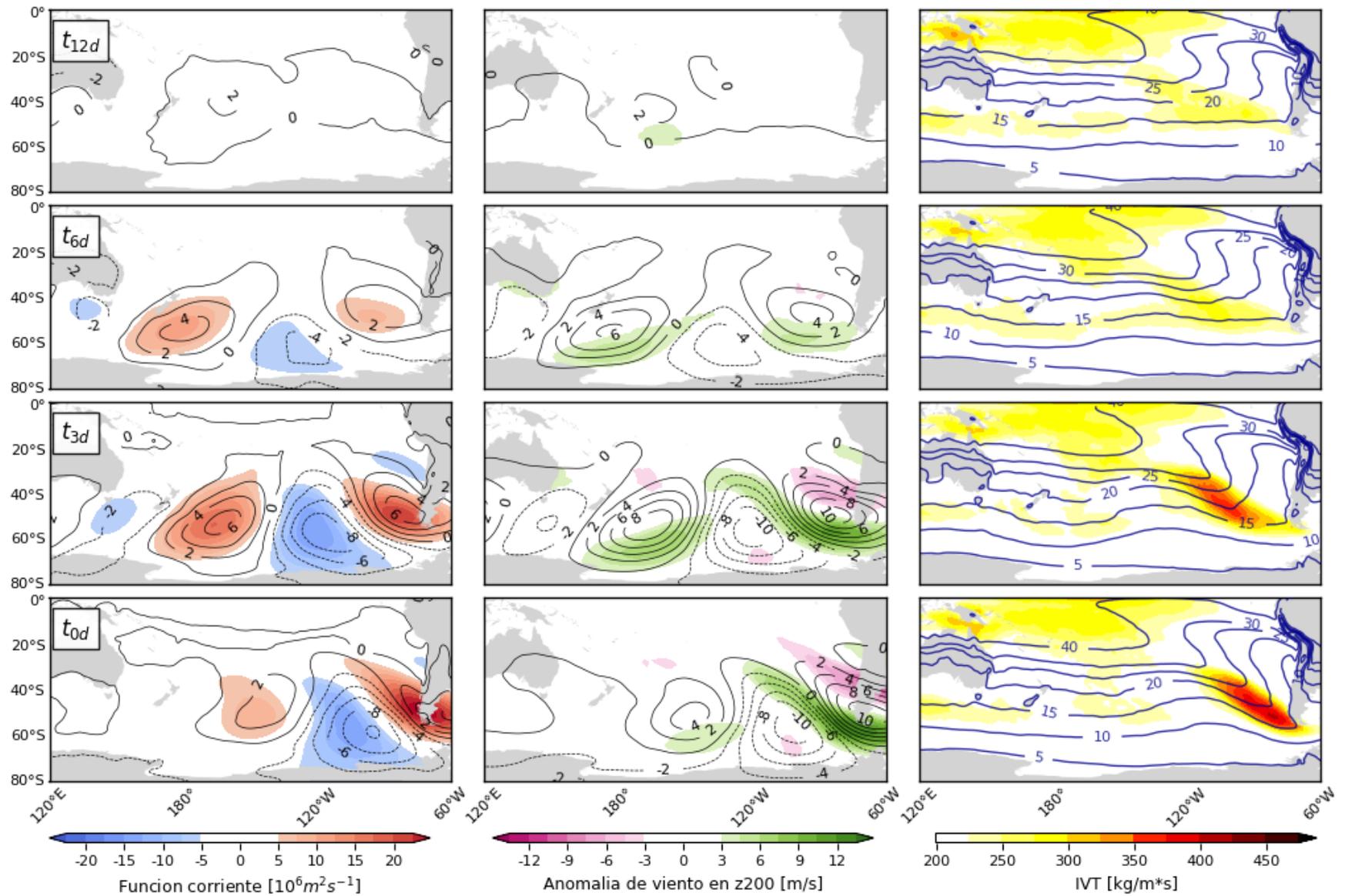


Figura 4.34. Descripción general de campos relevantes que permiten describir el mecanismo de onda de Rossby con número de onda igual a 4, en su fase sur. Se presenta la evolución de 12, 6, 3 días antes del aterrizaje del río atmosférico y en el día de contacto mismo. En los paneles de la izquierda se muestra la evolución de la función corriente (contornos coloreados) y presión en superficie (contornos de línea), en los paneles centrales se muestra la anomalía de viento en 200hPa (contornos coloreados) y anomalía de geopotencial en z500 y en los paneles del costado derecho se presenta la evolución de IVT (contornos coloreados) y de agua precipitable (contornos de líneas).

Las fuentes de influencia extra tropical en cada uno de estos mecanismos se pueden asociar a los valores máximos del índice de la MJO y su ubicación. En el caso de la fase norte se observa una leve concentración de puntos en el sector del Pacífico Occidental y el Hemisferio occidental, aunque existe una distribución general en las distintas fases de la MJO. En contraste, la fase sur muestra una mayor concentración de puntos en fases específicas de la MJO, en particular en las fases 5 y 6 en el sector del continente marítimo y el Pacífico Occidental, pero también coherentemente con el paso anterior en las fases 7 y 8. Sin embargo, a pesar de presentar una concentración de valores máximos en fases similares, la ocurrencia de estos máximos varía temporalmente entre fase norte y fase sur: en el caso de la fase norte, se observa que estos máximos en zonas 7 y 8 tienden a ocurrir con una mayor cantidad de días previos (en general, superior a 12 días), mientras que en el caso de la fase sur ocurren en tiempo más cercanos al impacto del RA (12 días o menos).

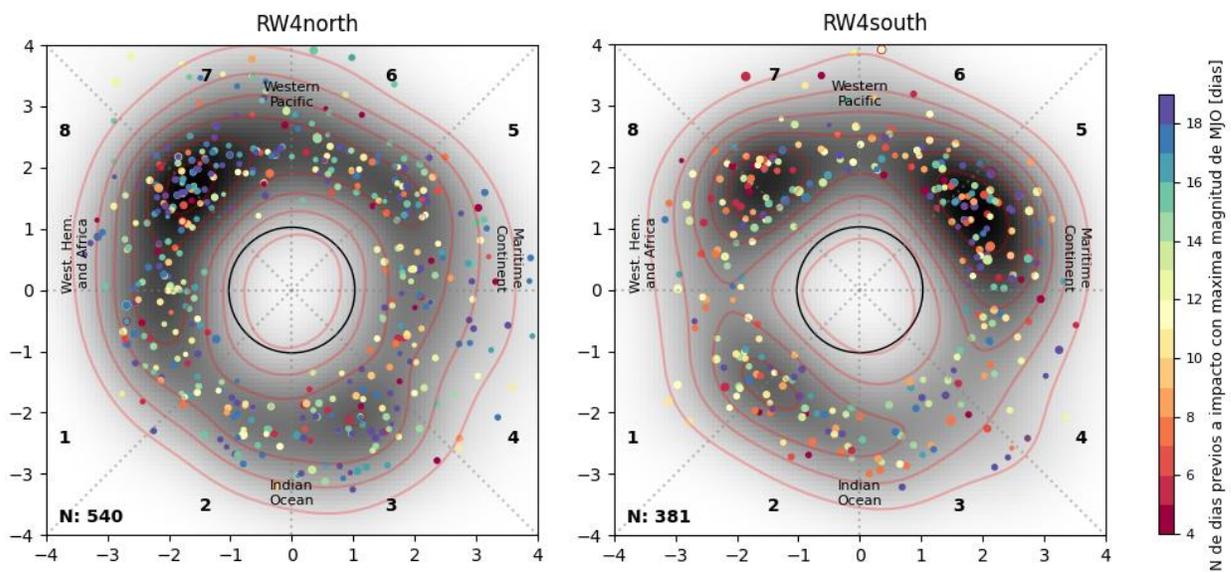


Figura 4.35. Distribución de valores máximos de MJO observados en los días previos al contacto continental del RA para el mecanismo de onda de Rossby con número de onda igual a 4, en sus fases norte (panel izquierdo) y fase sur (panel derecho).

En la Figura 4.36 se muestra los índices de ENSO y PDO en la fecha de ocurrencia de cada evento clasificado en los mecanismos de fase norte (panel izquierdo) y fase sur (panel derecho). En el caso de la fase norte, se observa que bajo condiciones de índice ENSO negativas y PDO positivas, la ocurrencia de eventos bajo este mecanismo se ve disminuida en frecuencia, mientras que otras combinaciones no presentan mayor diferencia en la frecuencia de eventos. En el caso de la fase sur, se observa la misma característica de frecuencia reducida bajo condiciones de ENSO negativas y PDO positivas, pero a diferencia del caso anterior, se observa un aumento de la frecuencia de este tipo de eventos bajo condiciones donde se tienen valores negativos tanto de PDO como de ENSO. Este tipo de configuración tiende a verse favorecida por la actividad convectiva en el sector del continente marítimo. A su vez, este tipo de convección se relaciona fuertemente con este mecanismo, como se presenta en la figura anterior, por lo que se puede suponer que este

tipo de convección favorece la ocurrencia de este tipo de ondas, de forma similar a lo que ocurre con el mecanismo de Engranaje.

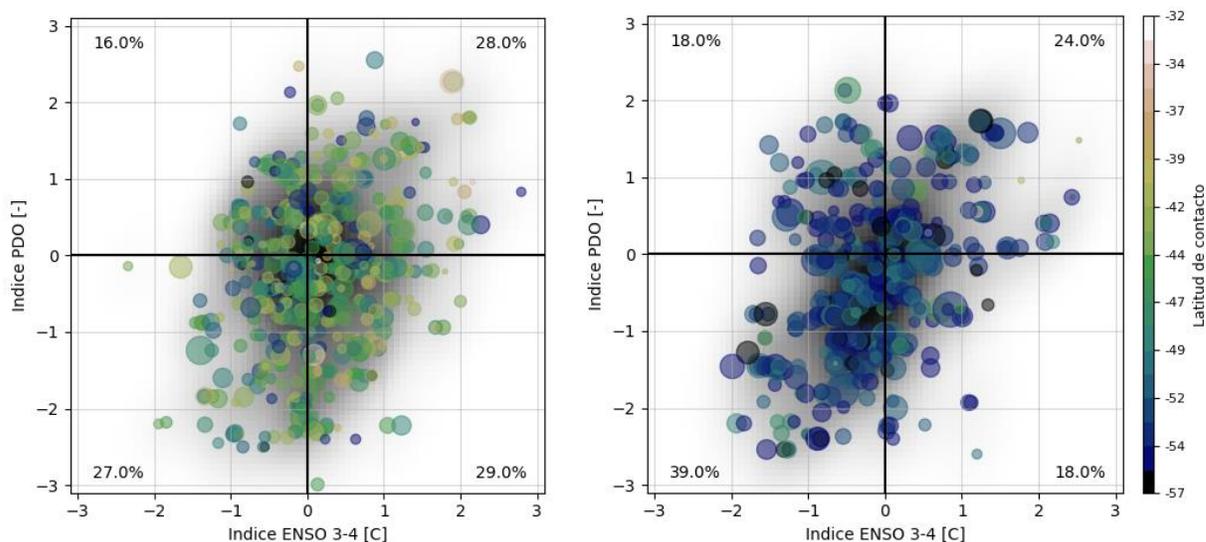


Figura 4.36. Correlación entre la ocurrencia de eventos de RA de tipo onda de Rossby con número de onda 4, en su fase norte (panel izquierdo) y fase sur (panel derecho), su intensidad (representada en el tamaño del punto) y latitud de impacto (representada en los colores), con valores del índice de ENSO y del índice de la PDO.

4.5.2 Caracterización de sus elementos

Las Tabla 4.6 y Tabla 4.7 describen mediante distintos estadísticos de características geométricas y de duración de los eventos clasificados bajo las fases norte y sur respectivamente cada este mecanismo.

Se observa claramente como el rango de latitudes de cada fase es más septentrional y austral según la fase correspondiente. Una característica en común corresponde al desarrollo de RA relativamente cortos, identificándose en más de la mitad de los eventos clasificados en cada sub-mecanismo una duración inferior a 1 día.

Sin embargo, difieren significativamente en sus otras características. En particular, el largo y la intensidad de IVT máximo de los eventos tiende a ser menor en aquellos de fase norte, a pesar de tener anchos similares. Esto guarda relación directa con los mecanismos que forman cada tipo de evento, según lo descrito. Resulta esperable que los eventos generados en la fase norte, solo en función solo de la anomalía negativa y su circulación ciclónica tengan intensidades y largos menores, que los generados de la canalización formada por la acción conjunta y sinérgica de una circulación ciclónica y una anticiclónica.

Adicionalmente, se suma el factor de que las intensidades de las anomalías en la fase sur son mayores que en la fase norte, provocando el desarrollo de anomalías de viento más intensos y advectando más humedad (a pesar de que las latitudes sean más altas y por tanto la capacidad de retención de agua de la atmósfera menor). La acción conjunta de estos dos factores explicaría por qué los eventos de fase sur presentan, en general, valores mayores de IVT que los de fase norte.

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	6	18	30	48
Largo [km]	2666.2	3318.0	4282.2	5681.6	7701.3
Ancho [km]	308.2	389.1	512.8	648.6	811.7
IVT máximo	264.0	325.1	389.8	461.4	563.1
Latitud de contacto	-51	-46.5	-42.5	-37.5	-34.5
Dirección de contacto [°]	109.5	127.4	142.7	157.3	167.1

Tabla 4.6. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo OR4n.

Característica	Percentil				
	10	25	50	75	90
Duración [h]	6	6	18	30	54
Largo [km]	3284.1	4502.9	5904.5	7600.9	9411.3
Ancho [km]	320.5	423.6	541.8	700.9	847.9
IVT máximo	356.4	401.3	478.9	563.2	677.3
Latitud de contacto	-53	-53	-52	-48	-44.5
Dirección de contacto [°]	93.515	108.247	122.536	135.754	147.337

Tabla 4.7. Caracterización del conjunto de eventos de RA que ocurren bajo el esquema propuesto del mecanismo OR4s.

Las Figura 4.37 y Figura 4.38 describen en mayor detalle la composición de los eventos de RA de cada uno de los sub-mecanismos. Estas figuras permiten apreciar el contraste que se tiene entre cada mecanismo.

En el caso de OR4n, los eventos representan un conjunto de RA de valores bajos con respecto a la muestra general, según lo que se muestra en la caracterización de sus valores IVTq' e IVTu'v' en el panel superior izquierdo de la figura (recordando que estos valores corresponden a una normalización con respecto a la muestra total del grupo que incluye los 3.589 eventos analizados en este estudio).

Temporalmente, la ocurrencia de este tipo de eventos se concentra en los meses del invierno austral, con una presencia no menor de este tipo de eventos también en los meses de otoño y primavera, siendo solo el periodo comprendido entre enero y febrero donde se casi no se registran este tipo de eventos. Otro aspecto temporal destacable corresponde a que parece existir una relación entre eventos con una mayor contribución de humedad en los meses de invierno, mientras que los de estaciones de transición tienden a una menor contribución de esta variable. La caracterización por contribuciones según variable separada según magnitud presenta en este caso dos paneles, ya que no existen eventos con un IVT mayor a 500 kg m⁻¹s⁻¹.

Diametralmente opuesto al mecanismo anterior, la Figura 4.38 muestra que los resultados para OR4s tienden a presentar valores de IVTq' e IVTu'v' mayores a cero (lo que lo se asocia a eventos que están por sobre la media de la muestra de análisis), y que, temporalmente, ocurren principalmente en meses estivales, pero también con un grado de ocurrencia en las estaciones de transición y, muy infrecuentemente, en meses de

invierno. Los eventos de este sub-mecanismo tienden a mostrar una distribución balanceada en lo que respecta a la componente dominante en eventos de intensidad baja y media, pero tienden a ser dominados por la humedad en el caso de los eventos de mayor intensidad.

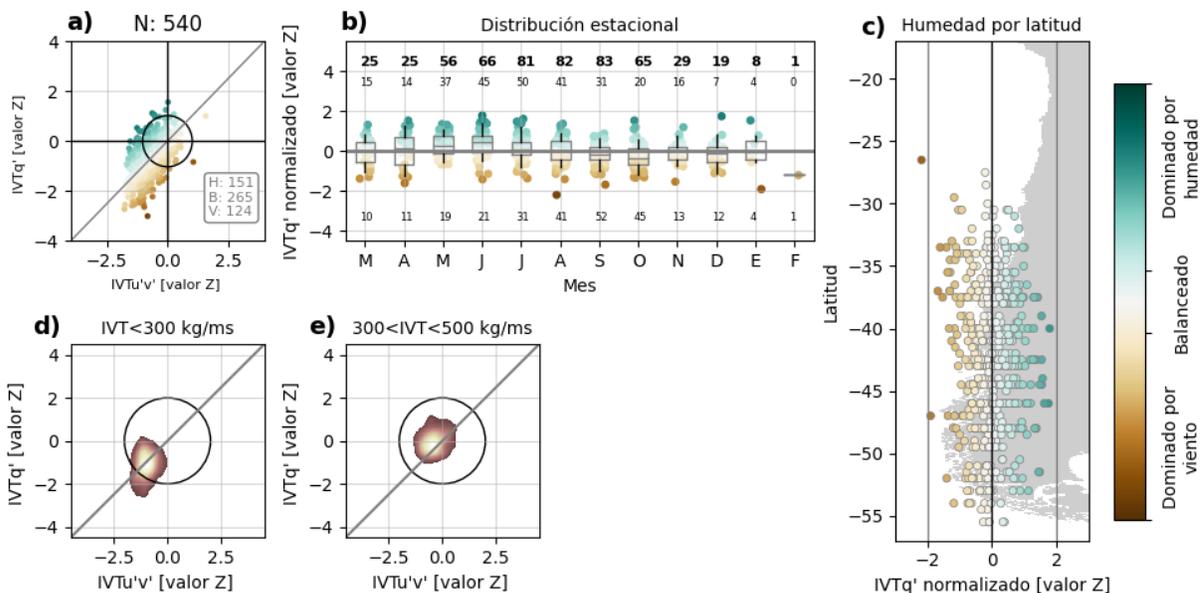


Figura 4.37. Caracterización de los eventos de RA catalogados en la fase norte del mecanismo onda de Rossby con número de onda igual a 4.

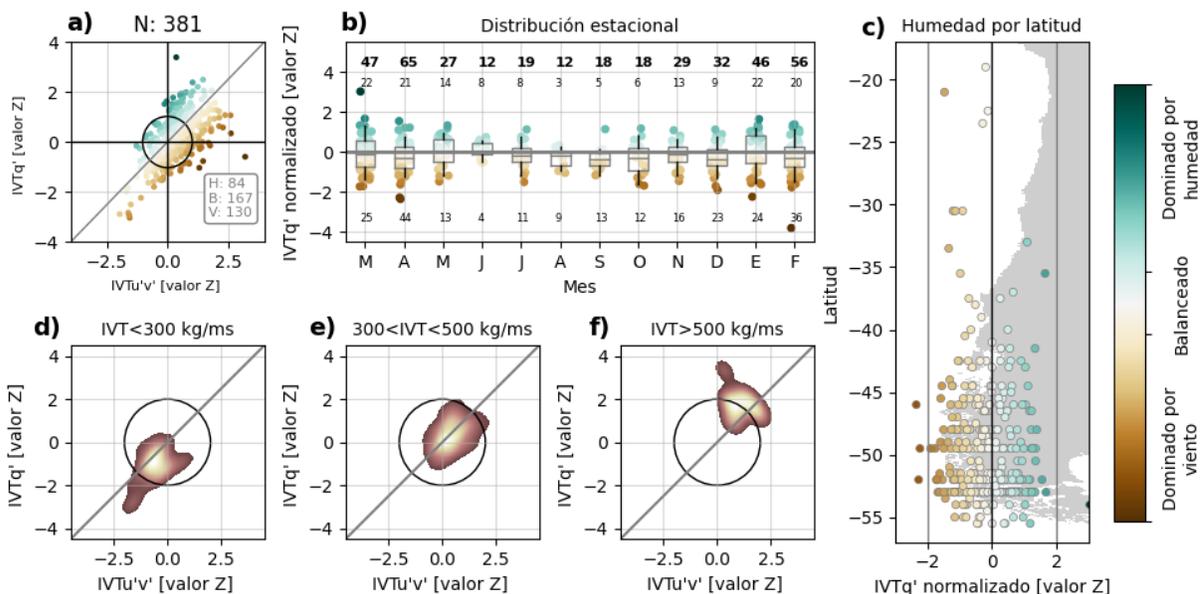


Figura 4.38. Caracterización de los eventos de RA catalogados en la fase sur del mecanismo onda de Rossby con número de onda igual a 4.

4.5.3 Evolución del clúster

La evolución de ambos mecanismos presenta una configuración estable, a pesar de que se realicen clasificaciones con un mayor número de grupos objetivos posibles.

La Figura 4.39 compara los compuestos de IVT y de anomalía de z_{500} en los días de impacto del RA para esta OR4n (paneles izquierdos) y OR4s (paneles derechos), considerando clasificaciones con 6, 8, 10 y 12 grupos objetivos.

En ambos casos, los compuestos obtenidos al usar solo 6 grupos objetivos no representan adecuadamente el mecanismo descrito en este capítulo, el cual sí aparece correctamente al tener como objetivo 8 grupos. Con el aumento progresivo de grupos objetivo, se observa que este mecanismo mantiene su patrón espacial geográfico, pero aumenta la magnitud de sus anomalías. Por ejemplo, en el caso de OR4n, la anomalía positiva donde se genera la refracción del rayo de la onda mantiene su centro relativamente constante en 60°S - 120°W , mientras que la anomalía negativa mantiene su centro en 40°S - 90°W , la que es la principal condicionante del desarrollo del RA y la latitud donde aterriza. En el caso de la fase sur, donde el centro de la anomalía donde ocurre la refracción de la onda es de carácter negativo, se observa que su centro se mantiene relativamente estable en 55°S - 105°W , incluso manteniendo el área afectada por esta anomalía. La anomalía positiva en este caso también mantiene su posición, intensidad y forma.

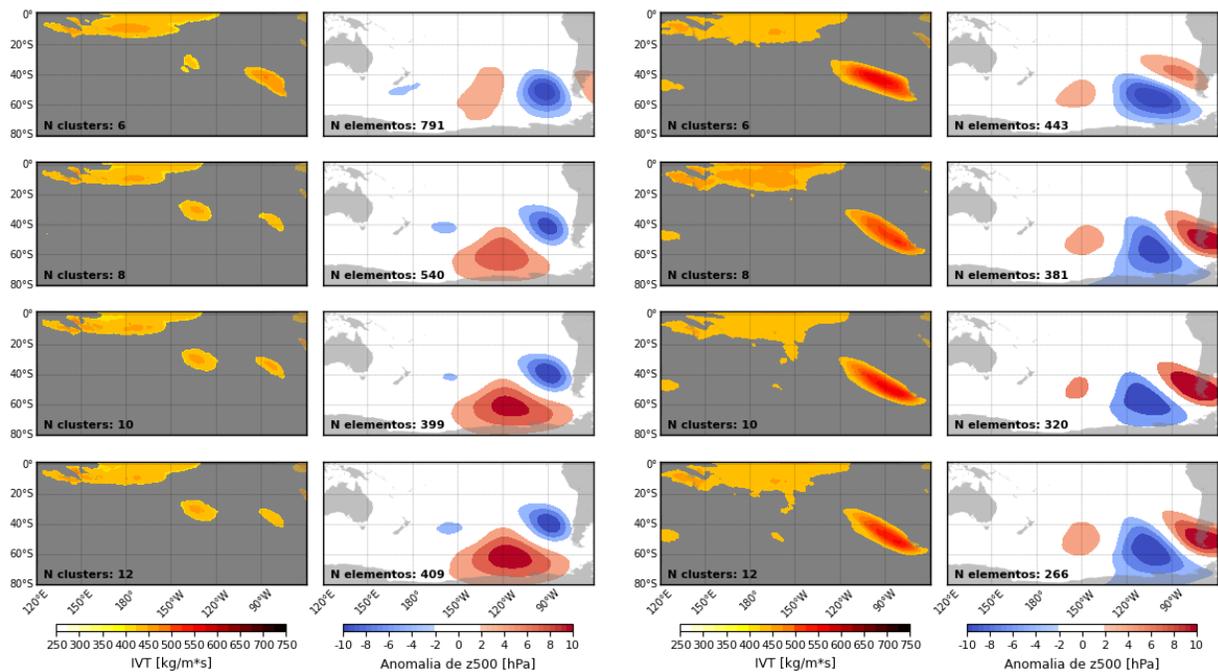


Figura 4.39. Evolución de los compuestos de IVT (panel izquierdo) y de anomalía de z_{500} (panel derecho) descritos por el mecanismo de onda de Rossby con número de onda 4, en función del aumento de clusters objetivo definidos para el algoritmo de clasificación. Los paneles izquierdos corresponden a la onda de Rossby 4 en fase norte, mientras que los paneles de la derecha corresponden a la fase sur.

La evolución del número de elementos también se mantiene relativamente estable en ambos casos, a pesar del aumento del número de grupos objetivos disponibles. Esto permite inferir que los eventos que son atribuidos a estos mecanismos se encuentran muy bien definidos por esta dinámica.

Para reforzar este punto, la Figura 4.40 muestra una comparación de los valores máximos de MJO observados días antes de cada RA, bajo esquemas de clasificación con 8 y 12 grupos objetivos, generados por OR4n (panel izquierdo) y OR4s (panel derecho). Los puntos grises representan los eventos que fueron atribuidos a este mecanismo en un esquema de 8 grupos objetivos, mientras que los puntos blancos son los eventos clasificados bajo este mecanismo teniendo 12 grupos objetivos.

En aquellos puntos donde existe coincidencia, es posible inferir que se trata del mismo evento. Esto ocurre en la mayoría de los puntos, tanto en el caso de fase norte como de fase sur. Los puntos grises que quedan sin coincidencia representan uno de los 131 o 115 eventos que no son reclasificados bajo este mecanismo, en sus fases norte y sur respectivamente. Se observa que no existe un factor común general para estos puntos en el gráfico presentado. A

sí mismo, la cantidad de eventos clasificados bajo estos mecanismos cuando se tienen 12 grupos objetivos que no son clasificados bajo este mecanismo cuando se tiene 8 grupos objetivos es despreciable y no superan una decena, lo que refuerza el concepto de coherencia interna de este mecanismo.

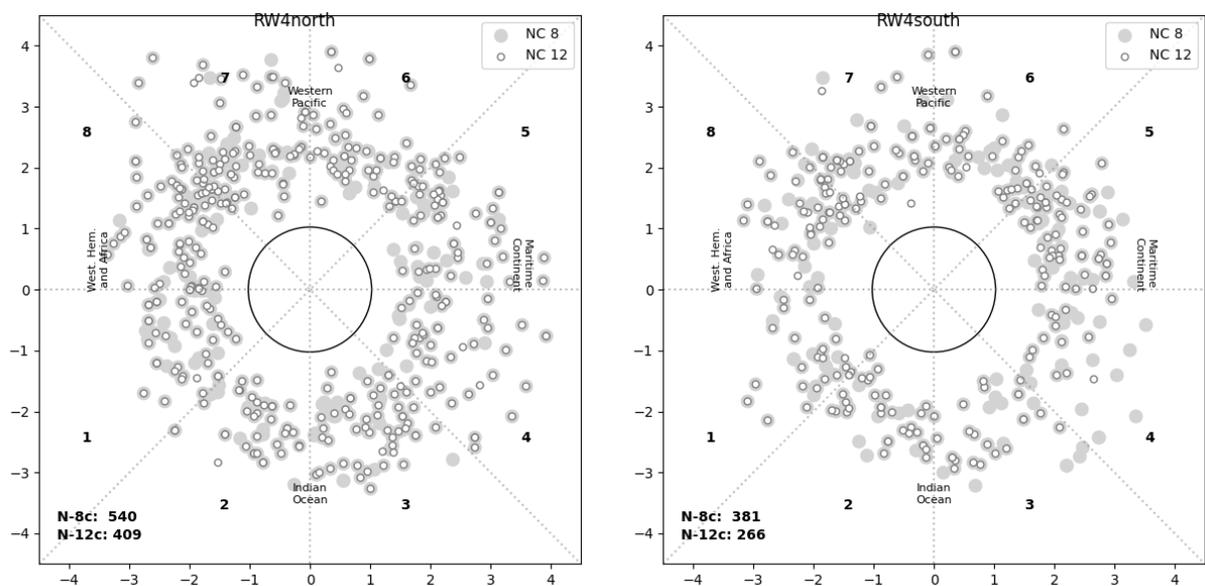


Figura 4.40. Comparación de los eventos identificados en el mecanismo OR4n (panel izquierdo) y OR4s (panel derecho) utilizando 8 y 12 clusters como objetivo en el algoritmo.

5 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Dada la importancia que tienen los eventos de RA sobre la climatología de las precipitaciones en Chile continental, se presenta en este capítulo un breve análisis de la relación que se tiene entre los eventos asociados a los mecanismos identificados y sus contribuciones climatológicas a esta variable.

Dado que la clasificación de eventos en los distintos mecanismos se concentra en la zona centro y sur de Chile, los análisis se realizan para latitudes mayores a 30°S. Los eventos en latitudes menores a esto son fenómenos infrecuentes y que no se asocian en general a los mecanismos presentados en este estudio y cuyo análisis particular escapa a los alcances de los objetivos propuestos. Los cálculos presentados en este capítulo se basan en realizar el cruce entre los campos de precipitación de CR2MET (v2.0) y los contornos definidos para cada RA en el catálogo de Guan & Waliser (2015) interpolado a una resolución equivalente a la de las precipitaciones.

Este capítulo se presenta en tres secciones: en una primera sección, se describe la importancia relativa de los mecanismos a las precipitaciones medias distribuidas geográficamente; en la segunda, la distribución temporal de estos aportes y, finalmente, en la tercera, se estudia la relación de los distintos mecanismos con eventos extremos de precipitación.

5.1 Relación con la precipitación media anual

La Figura 5.1 muestra el porcentaje de participación en el valor de la precipitación media anual de los eventos de RA. Se consideran todos los eventos clasificados en alguno de los mecanismos identificados en el capítulo anterior. El panel derecho de la figura muestra que la contribución de los RA llega a representar incluso más de un 60% de la precipitación media anual en algunas zonas, concentradas en la zona centro y sur de Chile, entre 30°S y 40°S, con una tendencia a ser mayores en la costa y la cordillera, donde se encuentran los cordones montañosos.

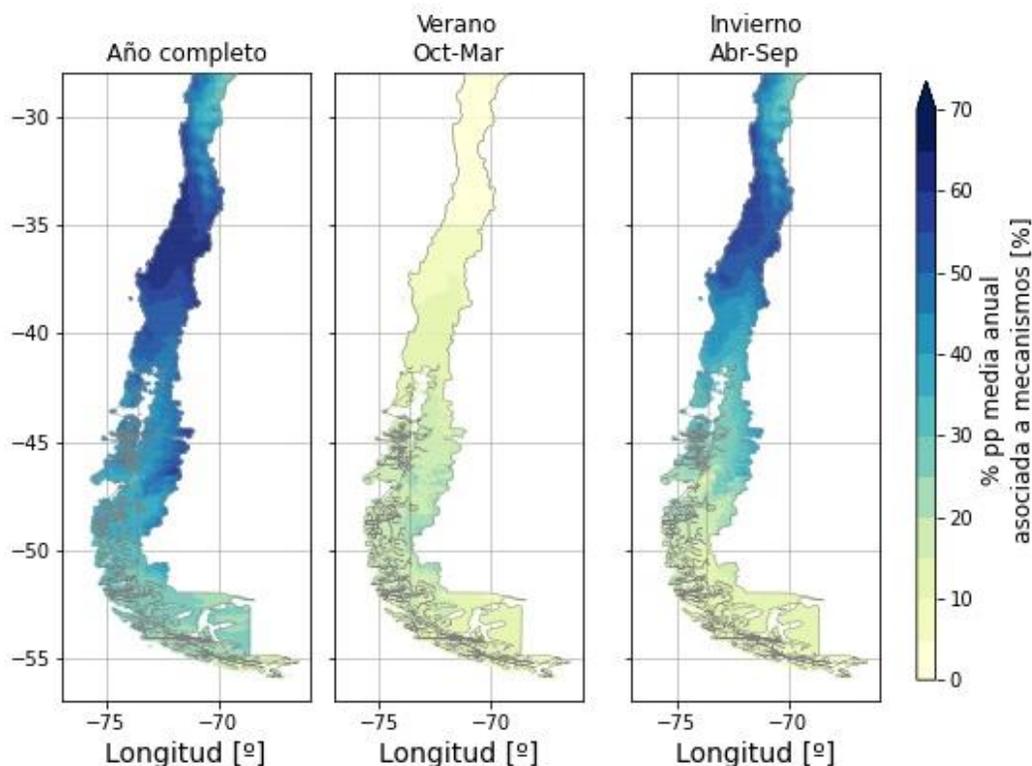
Los paneles del centro y derecho muestran una separación estacional de los valores presentados en el año completo, agrupando en un periodo estival (octubre a marzo) y un periodo invernal (abril a septiembre). Las contribuciones varían geográficamente según el periodo estacional.

En el caso del periodo estival, se observa un aumento gradual del porcentaje de contribución en sectores con latitudes más altas, llegando a valores que alcanzan incluso rangos entre un 20% y un 30% en el sector de la Patagonia, mientras que en la zona centro y sur de Chile los valores no superan un 10%. Esto resulta coherente con la distribución de climas en el territorio nacional, donde en las zonas centro-sur del país - latitudes entre 30°S y 40°S- las precipitaciones se concentran durante el periodo del invierno austral.

En el periodo invernal, los porcentajes de contribución de los RA son mayores que en el periodo estival significativamente, y replican el patrón espacial de la distribución anual con valores ligeramente menores, en especial en la zona centro sur de Chile, donde los eventos de RA están vinculados a más del 40% de la precipitación anual, llegando incluso al 60%. Las magnitudes de estas contribuciones en dicha zona son similares a resultados de estudios previos (Saavedra et al., 2020), a pesar de que no se consideran en este análisis

todos los eventos de RA, ya que se omiten los eventos que fueron clasificados en los clusters que no se asociaron a alguno de los mecanismos descritos en este trabajo.

De esta figura, es posible concluir que las contribuciones de los RA a la precipitación media anual se concentran mayormente en el periodo invernal para casi toda la zona de estudio, teniéndose un balance en las magnitudes de ambas estaciones solo en la zona de la Patagonia, en latitudes bajo los 47°S (coincidentalmente con la ubicación de los grandes campos de hielo de la Patagonia chilena).



X

Figura 5.1. Participación de eventos de RA en la precipitación media anual a nivel nacional. Se presentan los valores de porcentajes para el año completo (panel izquierdo), para el periodo estival (panel central) y para el periodo invernal (panel derecho).

La Figura 5.2 resume el análisis de los aportes de los RA a la precipitación anual, agregando los resultados en bandas de latitud de 1°. El panel izquierdo muestra el promedio de precipitación anual según lo estimado por CR2MET. En el panel derecho, se muestra el porcentaje que aporta cada mecanismo a la precipitación media de la banda de latitud, al valor de precipitación media latitudinal que se especifica en el centro de la figura.

Coherentemente con la clasificación geográfica obtenida, se observa que existen áreas preferenciales de afectación de cada mecanismo, asociado en parte a la latitud donde hace contacto inicialmente cada RA:

- La Onda Estacionaria del Pacífico (O.E.P.) y la Onda de Rossby con número de onda 4 en su fase norte (OR4n) alcanzan un máximo valor de contribución en torno a 36°S, representando en conjunto más del 40% de la precipitación anual de la

zona. Los valores de sus contribuciones disminuyen tanto en latitudes menores como mayores en torno a este valor.

- La onda de Rossby con número de onda 3 (OR3) contribuye entre un 10 y un 18% a la precipitación de la zona centro-sur, además de también presentar contribuciones relevantes en Patagonia norte (entre 40°S y 45°S). Destaca por presentar un amplio rango de latitudes donde su porcentaje de contribución permanece relativamente similar.
- el mecanismo de Baja Polar (BP), presenta un comportamiento similar, contribuyendo en un rango entre 5 y 10%, con la contribución máxima centrada en torno a 45°S
- los mecanismos de Engranaje (E) y Onda de Rossby con número de onda 4 en su fase sur (OR4s) concentran sus aportes en Patagonia sur, aunque sus contribuciones porcentuales resultan menores que las de otros mecanismos.

Los aportes de RA atmosféricos no clasificados en alguno de los mecanismos identificados varían entre un 7 y un 15% de la precipitación media anual variando según latitud, con contribuciones máximas centradas en torno a 45°S.

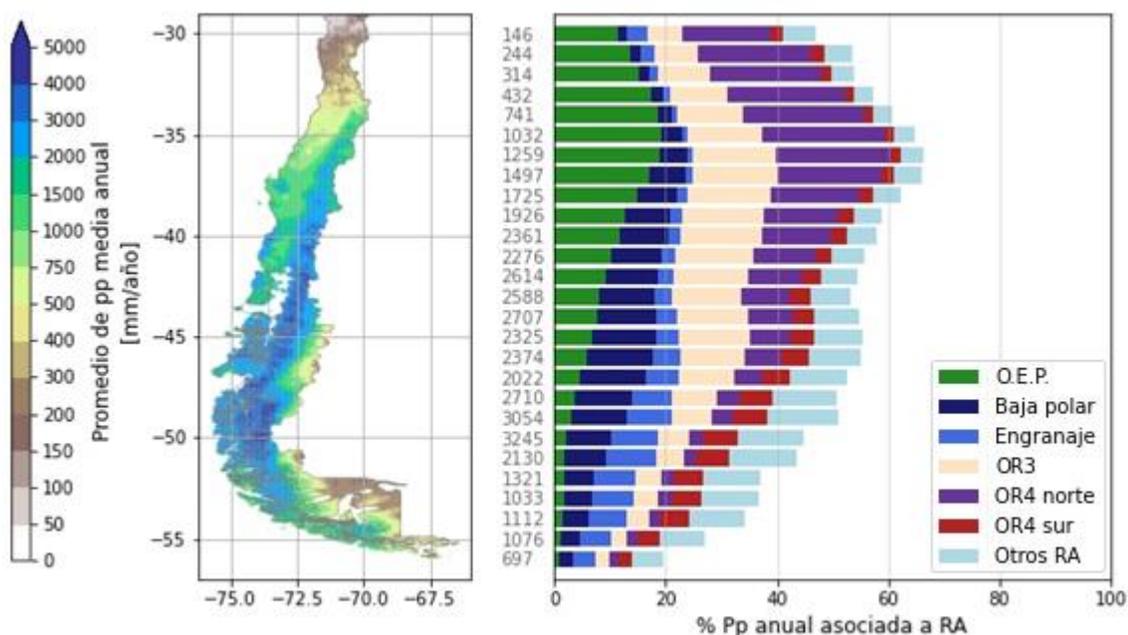


Figura 5.2. Participación de eventos de RA en la precipitación media anual a nivel nacional. En el panel izquierdo se presenta la distribución espacial de la precipitación media anual. En el panel derecho se muestra el porcentaje de participación medio de cada mecanismo a la precipitación media anual agrupada por latitud.

Adicionalmente, se presenta en el Anexo 0 un mayor detalle sobre la distribución espacial desagregada por mecanismo del porcentaje de eventos anuales que se asocia a RA.

La Figura 5.3 tiene la misma estructura que la figura anterior pero, en este caso, se analiza el número de días con tormenta y el porcentaje de ellas que se encuentran asociada a algún tipo de RA. La distribución del porcentaje de tormenta asociadas a cada mecanismo replica el comportamiento de los aportes a la precipitación media anual, pero en menor porcentaje. Esta similitud en comportamiento, pero diferencia en magnitudes, conlleva implícitamente una característica conocida de los RA: el promedio de precipitación

asociada a tormentas de RA es superior a los de días de tormenta que carecen de un RA asociado.

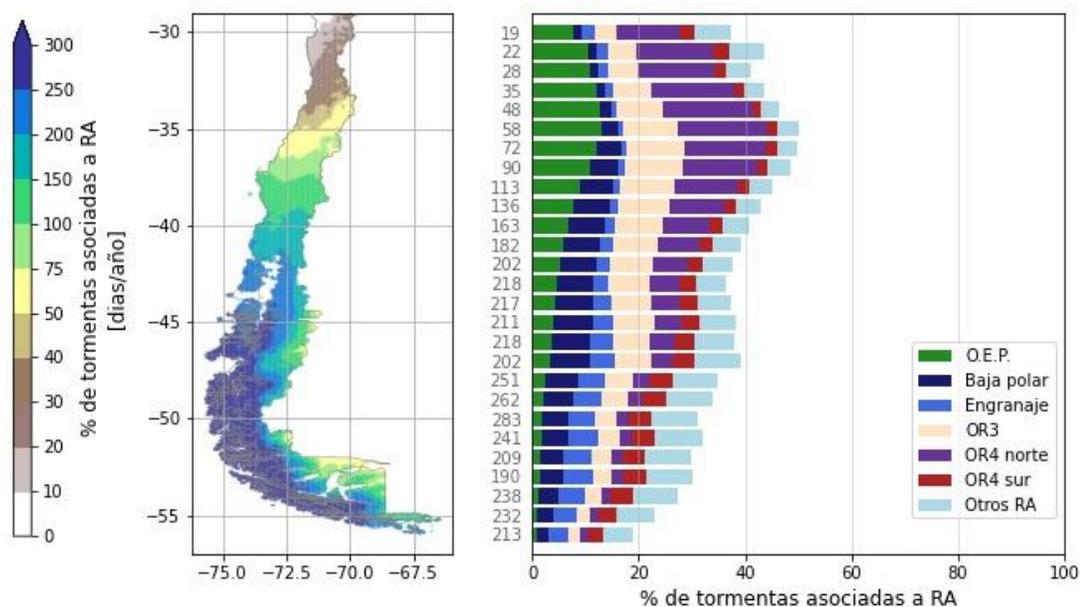


Figura 5.3. Participación de eventos de RA en el número de días con tormenta. En el panel izquierdo se presenta la distribución espacial de la frecuencia de tormentas según CR2MET. En el panel derecho se muestra el porcentaje medio de tormentas asociada a cada mecanismo agrupada por latitud.

La Figura 5.4 compara los valores de contribución de los tormentas asociadas a cada mecanismo con su respectiva frecuencia de tormentas. Es posible identificar las zonas donde los mecanismos desarrollan tormentas más fuertes, correspondiente a los sectores donde la diferencia entre los contornos y los rellenos son más grandes. Esto permite identificar las zonas donde los eventos de cada mecanismo tienen un mayor impacto.

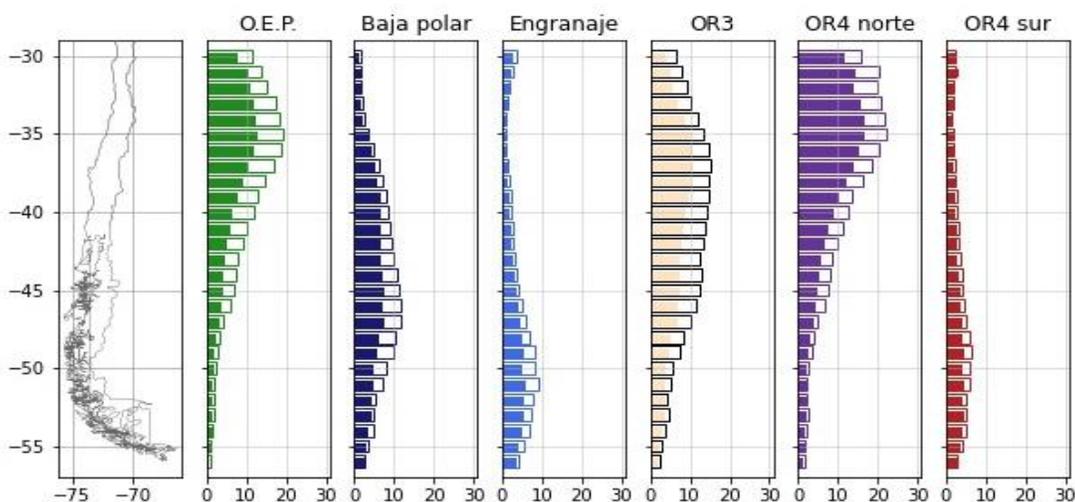


Figura 5.4. Comparación entre porcentajes de aporte a la media anual (barras de color blanco) y de aporte al número medio de tormentas anuales, por mecanismo. Barras similares representan valores medios cercanos a la media general, mientras que una mayor diferencia entre las barras se puede interpretar como un mayor valor medio de los eventos de precipitación asociado a cada mecanismo.

Es ampliamente reconocido en la literatura que los eventos de precipitación asociados a RA tienden a ser mayores en magnitud, en especial en zonas donde debido a la interacción

con el relieve se generan procesos de precipitación orográfica (Kingston et al., 2016; Smith et al, 2010; Ralph et al., 2006). Dicho esto, el análisis latitudinal, en su generalidad, no permite identificar potenciales variaciones asociadas a la interacción orográfica de los RA con las cordilleras presentes en Chile.

La Figura 5.5 muestra la precipitación media de días de tormenta a modo general (esto es, incluyendo todos los eventos de precipitación registrados en cada celda del campo de precipitaciones de CR2MET) y las precipitaciones medias en base a las tormentas que tienen relación con alguno de los mecanismos estudiados. Los mecanismos se presentan ordenados según el impacto que generan latitudinalmente.

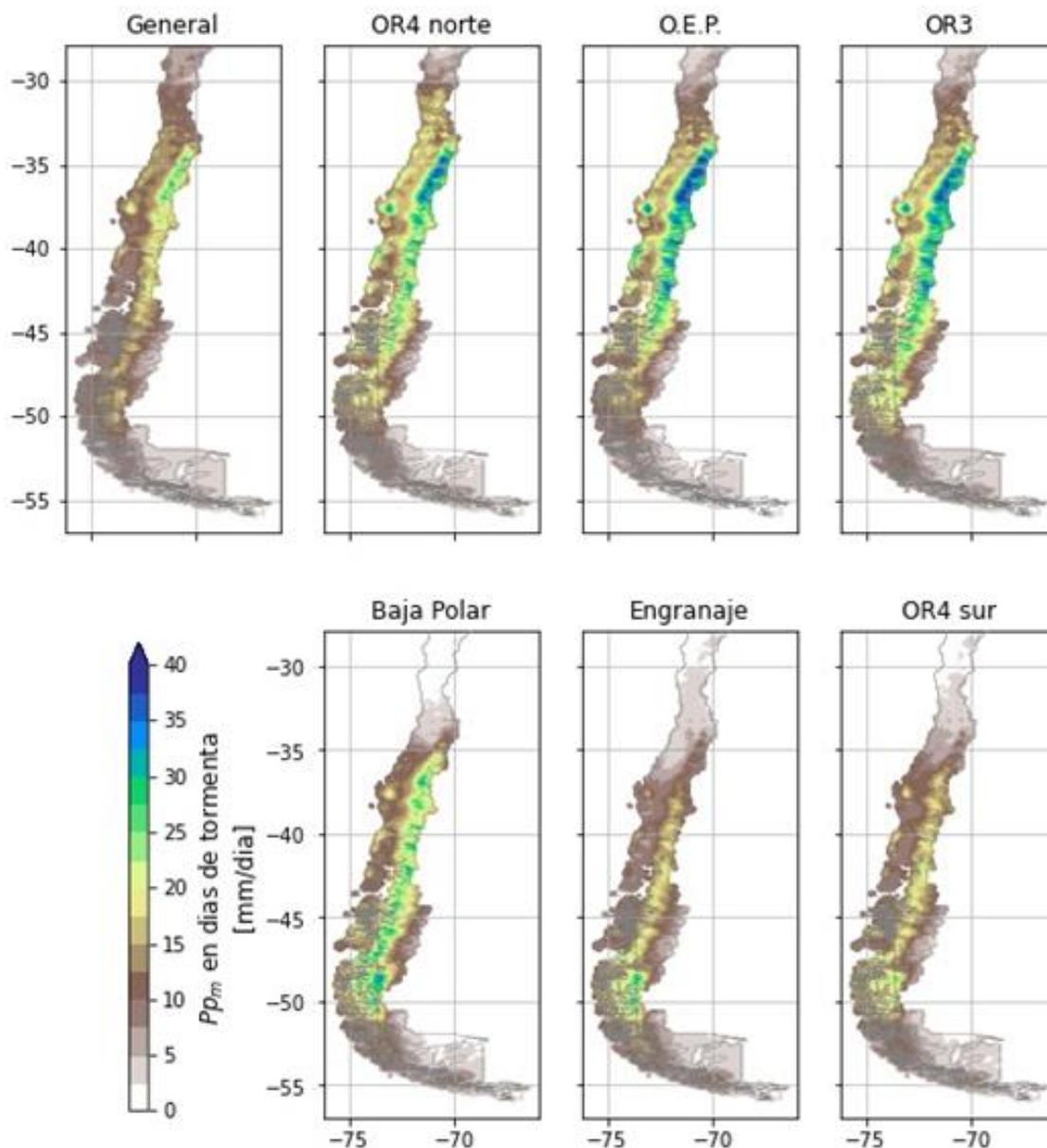


Figura 5.5. Precipitaciones medias diarias en días de tormenta de los campos de precipitación asociados a los distintos mecanismos identificados en este trabajo. El promedio general corresponde al promedio diario de todos los días de tormenta estimado por CR2MET.

En esta figura se observa la distribución espacial del efecto de cada tipo de RA, habiendo coherencia entre las áreas geográficas donde cada mecanismo afecta con mayor relevancia

y aumentos locales en las tormentas asociadas a cada mecanismo. Destacan en particular los aumentos de valores de precipitación en los sectores cordilleranos de los mecanismos OEP, OR4n, OR3 y BP. Los mecanismos En y OR4s no tienen grandes diferencias en los sectores cordilleranos con respecto al promedio de las tormentas, pero sí muestran un aumento local en torno a 50°S, coincidente con la ubicación de las masas de hielo glaciar que conforman Campo de Hielo Sur.

Al analizar los mecanismos predominantes en la zona centro y centro-sur, se observa que las precipitaciones asociadas al mecanismo OEP son mayores que las de OR4n, a pesar de tener áreas de afectación similares (esto se puede apreciar de forma más evidente en los campos de diferencias respecto al valor medio de precipitación en día de tormenta en la Figura 5.6). Esto puede estar asociado a la cantidad de IVT asociado a los eventos de cada mecanismo: mientras que OEP tiene un valor mediano cercano a $450 \text{ kg}^*(\text{ms})^{-1}$, los eventos de OR4n tienen un valor ligeramente inferior a $400 \text{ kg}^*(\text{ms})^{-1}$. En general, un mayor IVT de RA se asocia a mayores precipitaciones, lo que está en línea con los resultados que se presentan. Las precipitaciones asociadas a OEP resultan particularmente intensas en la cordillera de los Andes entre 33°S y 45°S.

El caso del mecanismo OR3 también presenta valores mayores de precipitación en sus días de tormenta, pero con valores que se encuentran entre las precipitaciones asociadas a OR4n y a OEP, a pesar de tener en general un valor mayor mediano de IVT al momento de contacto. Esto se debe a que este mecanismo, a diferencia de los otros dos, ocurre durante todos los meses del año, aunque con menor frecuencia en el periodo estival. Los RA de este mecanismo varían geográficamente de forma estacional, teniendo latitudes de choque más altas durante el periodo estival y menores durante el periodo invernal.

La Figura 5.6 muestra las diferencias entre los campos específicos de precipitación media diaria en días de tormenta y la media general de todos los días de tormenta en cada celda. Esta figura muestra que las tormentas asociadas a RA, independientemente del mecanismo, conllevan un aumento en la magnitud de las precipitaciones esperadas. Sin embargo, este aumento es claramente mayor en las zonas cordilleranas y con mayor elevación. Cabe destacar que, en la zona centro sur de Chile, los mecanismos predominantes con áreas de afectación similar tienen resultados similares, aun cuando provengan de patrones de circulación atmosférica distintos.

Sin embargo, esto no se replica en los patrones de la zona Patagónica, donde los tres mecanismos con más influencia (OP, En y OR4s), a pesar de tener valores de IVT medio similares al momento del choque con la masa continental, generan eventos de tormenta con precipitaciones de magnitudes muy distintas. Adicionalmente, bajo estos tres mecanismos, es posible observar que la precipitación media de los sectores más septentrionales se encuentra muy por debajo de la media de días con tormenta. Esto es coherente con que su área de ocurrencia y efecto es el sector de la Patagonia, usualmente en latitudes mayores a 40°S.

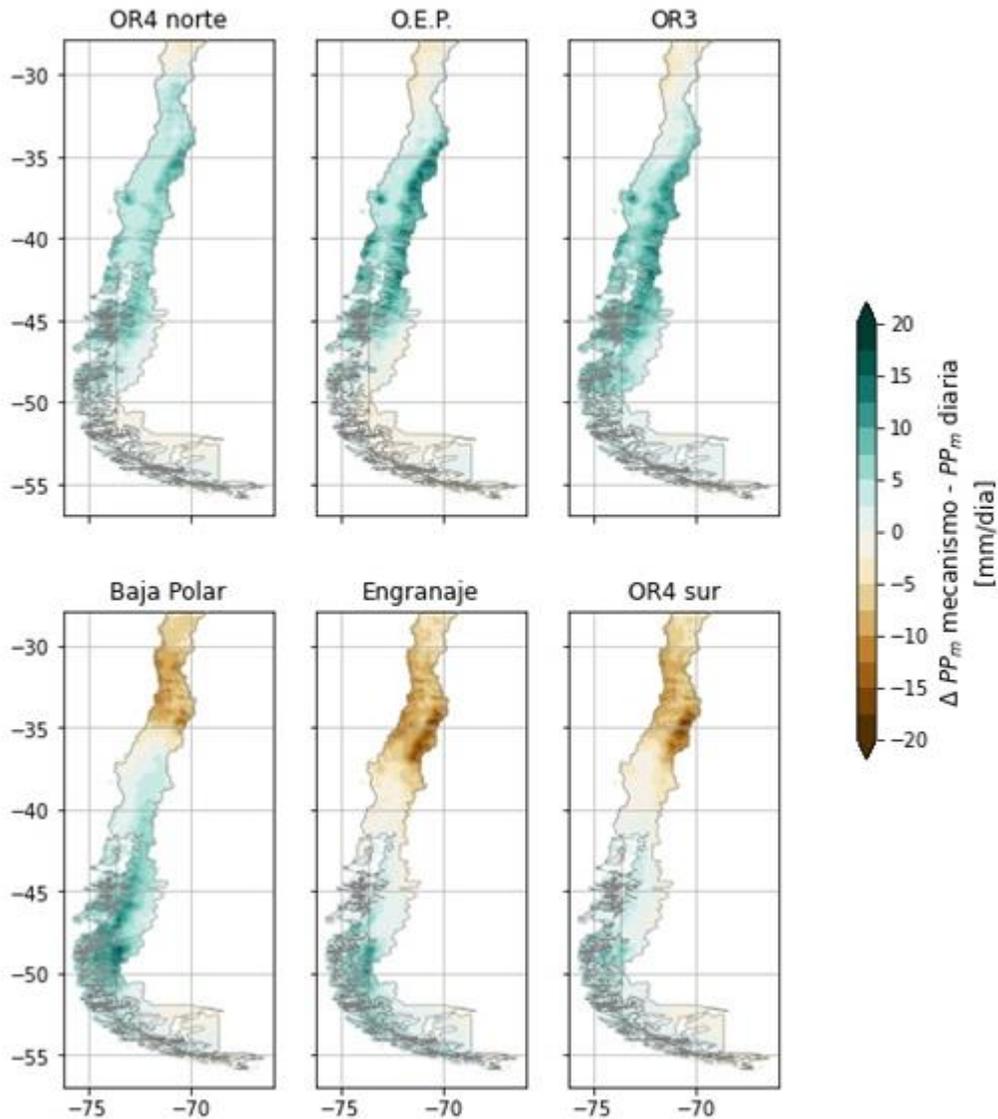


Figura 5.6. Diferencias entre las precipitaciones medias diarias en días de tormenta con presencia de RA (según mecanismo) respecto al promedio diario de precipitación en día de tormenta general.

Del análisis anterior, es posible agrupar entre mecanismos cuyos efectos se concentran en la zona centro-sur del país y otros que afectan mayormente la Patagonia. Con el objetivo de comparar los resultados de la interacción de cada mecanismo con la topografía, se presentan en la Figura 5.7 perfiles longitudinales de valores medios de precipitación en días de tormenta en función de la elevación. Se presentan resultados en torno a 35°S para los mecanismos que afectan principalmente a la zona centro-sur y 50°S para los que afectan la Patagonia.

Al comparar los resultados de OR4n y OEP, se observa que los valores diarios de precipitación en días de tormenta son menores en el primer caso que en el segundo, donde se superan frecuentemente valores de 40 mm/día lo cual se infiere guarda relación con los valores medios de IVT asociados a los eventos de cada mecanismo. En el caso de OR3 se tienen valores cercanos a lo que se observa para OR4n. Sin embargo, es importante notar que esta latitud no representa un máximo local para este mecanismo, debido a que sus

efectos más importantes se concentran en sectores más hacia el sur. A pesar de esto, se registran valores medios de precipitación superiores a 40 mm/día en algunas zonas.

En el caso de los mecanismos cuya zona de afectación principal corresponde a la Patagonia, resulta interesante notar que a pesar de que los valores IVT medio de los eventos de RA de cada mecanismo son similares (valores promedio en torno a $500 \text{ kg} \cdot (\text{ms})^{-1}$), los valores de precipitaciones medias de sus tormentas difieren. Mientras que los valores medios de eventos asociados a Engranaje superan frecuentemente los 25 mm/día en las laderas más pronunciadas de la topografía, en el caso de OR4s en muy pocas zonas supera dicho umbral. Los eventos asociados a BP representan un caso intermedio entre los dos anteriores. Se infiere que la razón de estas diferencias es la forma en que los eventos de cada mecanismo inciden sobre el relieve: mientras que los eventos asociados a En afrontan el perfil desde el norte con un cierto nivel de curvatura que favorece la interacción, los de OR4s lo hacen desde el sur con una trayectoria que tiene el efecto contrario. Los eventos de BP por otra parte tienden a presentar una trayectoria recta de incidencia sobre la zona analizada.

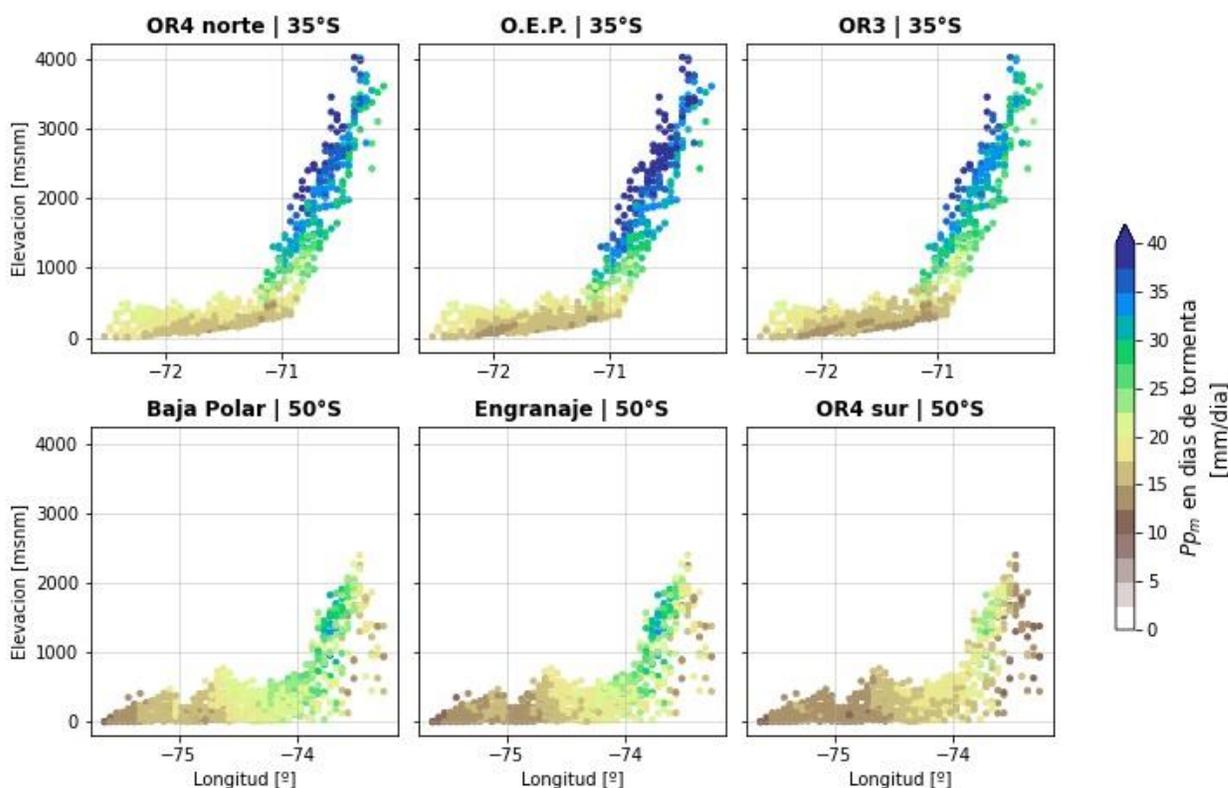


Figura 5.7. Perfil latitudinal de precipitación media diaria en eventos de tormenta asociadas al respectivo mecanismo. Los paneles superiores representan la situación en torno a 35°S para los mecanismos OR4n, OEP y OR3, mientras que los paneles inferiores representan un caso equivalente en torno a 50°S para los mecanismos de BP, E y OR4s.

Finalmente, un punto interesante a destacar es el efecto que tiene la topografía con la que interactúan los distintos mecanismos y el efecto que esto tiene en las precipitaciones. Al comparar las precipitaciones asociadas a OR4n con las generadas por RA de BP, se observan diferencias del orden de 15 mm/día de mayor magnitud en el caso del primer mecanismo respecto al segundo. Esto ocurre a pesar de que los RA de OR4n tienen un valor promedio de IVT casi $100 \text{ kg}/(\text{ms})^{-1}$ menor que los de BP. Esto confirma que no solo

la cantidad de humedad que trae un RA es definitiva en los eventos de precipitación que genera, si no que la topografía con que se enfrenta al chocar con las masas de tierra juega un papel fundamental.

5.2 Variación estacional de contribución a las precipitaciones

La Figura 5.8 muestra curvas de variación estacional de porcentaje de aporte a la precipitación media anual en distintos perfiles latitudinales. Este conjunto de latitudes fue seleccionado en base a las zonas de mayor afectación de cada mecanismo y se utiliza una agrupación espacial de $\pm 0.5^\circ$ en torno a la latitud descrita para obtener los valores medios. Se incluye adicionalmente 40°S como latitud de análisis para mayor representatividad espacial.

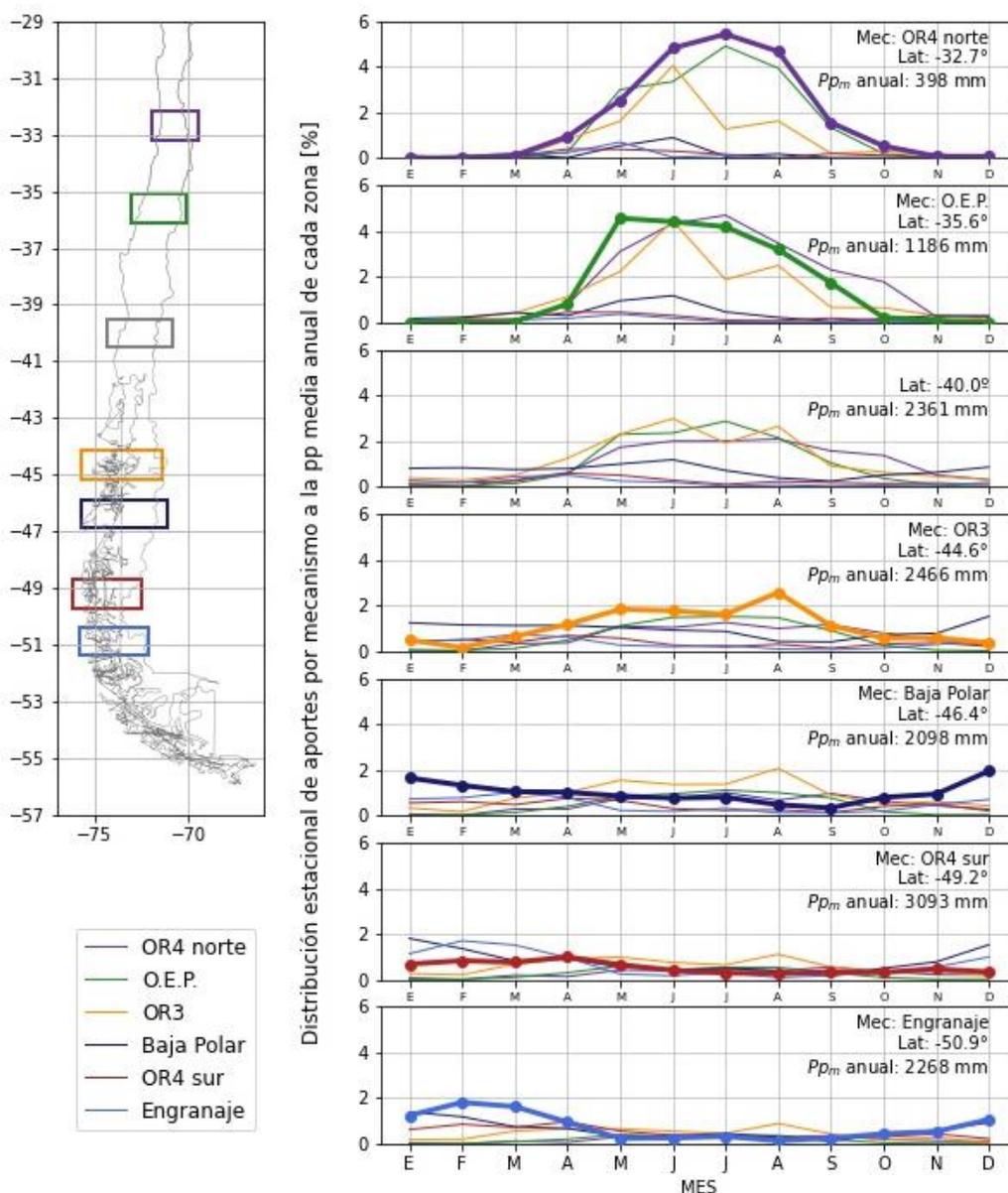


Figura 5.8. Distribución estacional de las contribuciones a la precipitación anual de cada mecanismo, agregadas longitudinalmente en torno a la latitud donde cada uno de ellos presenta el máximo valor de contribución.

En la Figura 5.8 se observa el comportamiento de los distintos mecanismos, con un análisis espacio-temporal de su comportamiento a lo largo del año. Por ejemplo, los eventos de OR4n realizan sus contribuciones principalmente durante los meses de invierno, durante con un máximo en el mes de julio, al menos para el sector entre 32°S y 35°S. Este máximo local a la contribución de la precipitación anual va disminuyendo a medida que se avanza hacia latitudes más altas, hasta que no representa un factor mayor (notar como el panel asociado a la latitud 44.6°S ya no representa un gran aporte a la precipitación media anual, coherente con la distribución espacial presentada en el sector anterior).

El comportamiento de los eventos de OEP es similar en su distribución espacial, pero presenta variaciones en su periodo de máxima contribución según la latitud, lo que sugiere un cierto grado de dependencia estacional al posicionamiento de los RA de este mecanismo. Esta variación puede eventualmente estar relacionada con la variación de la posición del *jet stream*, que es fundamental para la ocurrencia de eventos de este tipo de mecanismo.

Otro mecanismo que presenta variaciones espaciales en la distribución temporal de sus aportes corresponde al mecanismo OR3, el cual tiene un amplio rango de efectos (ver Figura 5.5). Dado que este tipo de ondas se propagan asociadas a los vientos zonales de la atmósfera, y que la posición de estos presenta una variación geográfica estacional que afecta en particular a los sectores de latitudes medias, es esperable que los eventos de RA de este tipo de mecanismo varíen en su contribución a las precipitaciones dependiendo de la zona. Así, es posible ver como los eventos de este mecanismo contribuyen más durante los meses de invierno en los sectores más al norte del área analizada, y más hacia el sur durante las estaciones de transición. Este mecanismo no presenta aportes significativos durante los meses de verano. Se presenta en la Figura 5.9 la distribución espacio-temporal de este mecanismo a la precipitación media anual. Cabe destacar que en el Anexo 0 se presentan figuras de distribución estacional según distintos periodos donde se muestran resultados equivalentes a la Figura 5.9, pero para todos los mecanismos y en distintas agrupaciones temporales.

Por el contrario, los mecanismos cuya zona de afectación corresponde principalmente al sector de la Patagonia, concentran sus contribuciones a la precipitación durante los meses de verano. Sin embargo, presentan un cierto grado de variación temporal: el mecanismo BP concentra sus aportes en torno al mes de diciembre, el mecanismo En durante el mes de febrero, y el mecanismo de OR4s durante el mes de abril.

Una particularidad del mecanismo BP es que, a pesar de tener un máximo local, sus contribuciones, a pesar de ser menores, ocurren durante gran parte del año, al igual que en el caso de OR4s. En el caso del mecanismo de En, sus contribuciones durante el periodo invernal son despreciables, principalmente asociado al hecho de que este mecanismo no ocurre durante esos meses.

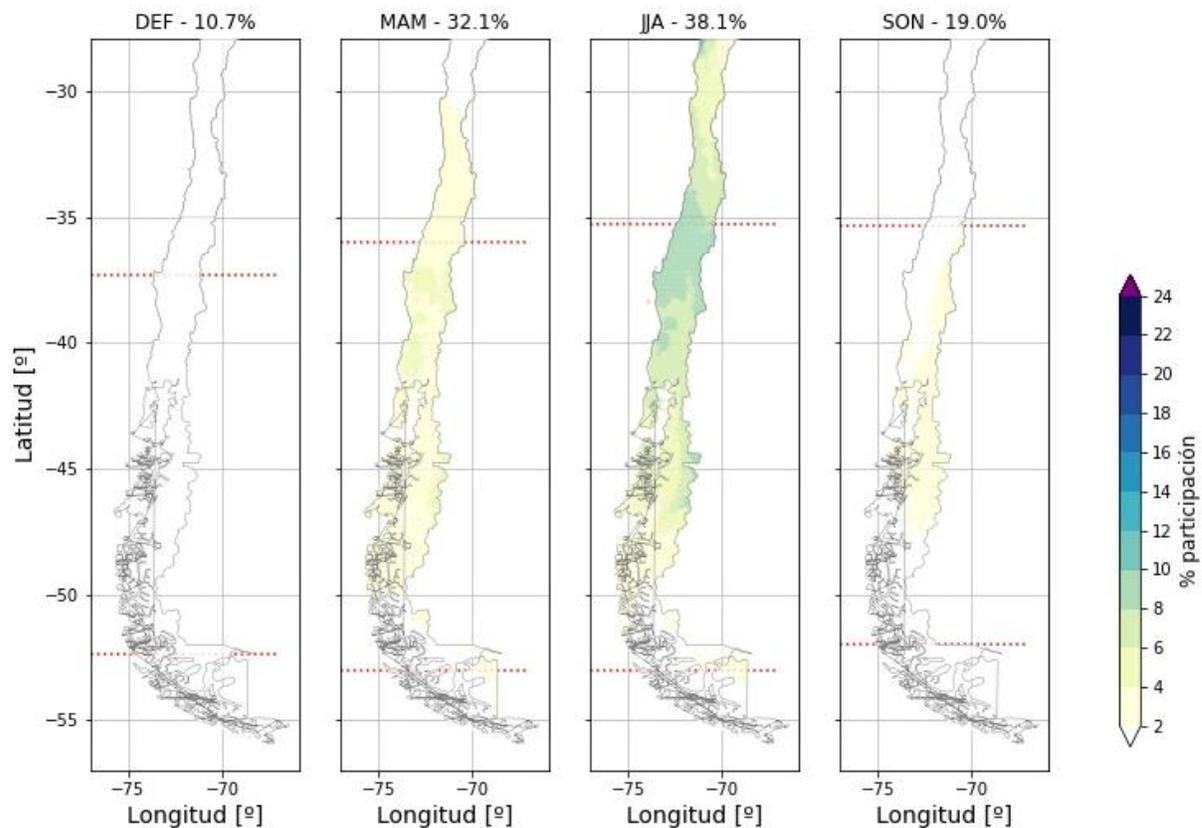


Figura 5.9. Distribución estacional de los aportes a la precipitación media anual del mecanismo OR3. Se presentan las agrupaciones por periodo trimestral de año calendario.

5.3 Relación con eventos extremos de precipitación

Se encuentra bien documentado que los RA están relacionados a eventos extremos de precipitación, en particular en zonas donde interactúan con zonas de topografías escarpadas y de grandes alturas (Guan et al., 2010; Hatchett et al., 2017; Kingston et al., 2016).

Dicho esto, resulta interesante realizar una revisión sobre si es que existen diferencias en los efectos que pueden producir los distintos mecanismos identificados en este trabajo. Como una primera aproximación, se presentan en la Figura 5.10 el porcentaje de eventos que están asociados a RA vinculados con alguno de los mecanismos de este estudio, considerando distintos umbrales. En cada panel se analiza un cierto porcentaje de los eventos más extremos. Así, en el primer panel, se analiza cuántos de los eventos de precipitación pertenecientes al 1% superior se encuentran relacionados a un RA de alguno de los mecanismos. Los paneles sucesivos representan otros porcentajes de la muestra (el 5% de los mayores eventos, el 10% y así sucesivamente).

Los resultados muestran que existen sectores de la zona centro-sur del país donde la totalidad de los eventos en el 1% de los valores se asocian a alguno de los mecanismos identificados. Incluso en el sector de Patagonia, hasta latitudes de incluso 50°S, se tiene una participación de un 70% de los eventos más extremos, a pesar de que las contribuciones a las precipitaciones medias anuales en esta zona no son tan relevantes (en contraste con lo que ocurre en la zona centro-sur)

Considerando el 5% de los eventos superiores, aún existen zonas donde el porcentaje de eventos relacionados a RA es superior al 80%, como, por ejemplo, la Cordillera de Nahuelbuta (en torno a 38°S). Los patrones en el sector de la Patagonia no difieren mucho respecto a los del primer panel, disminuyendo con respecto al panel anterior pero solo en una magnitud menor. Sin embargo, se observa que en los sectores cordilleranos de la zona centro (entre 30°S y 35°S), la participación disminuye drásticamente.

El último panel se tienen los resultados del 33% superior, es decir, el tercio de eventos con mayores valores. Aun tomando este amplio conjunto de valores, en la zona geográfica entre 34°S y 50°S, se observa una tendencia a que la participación de los RA sea mayor al 50%. Esto evidencia el sesgo que tienen los eventos de precipitación asociados a RA a ser mayores en magnitud que los carecen de este fenómeno.

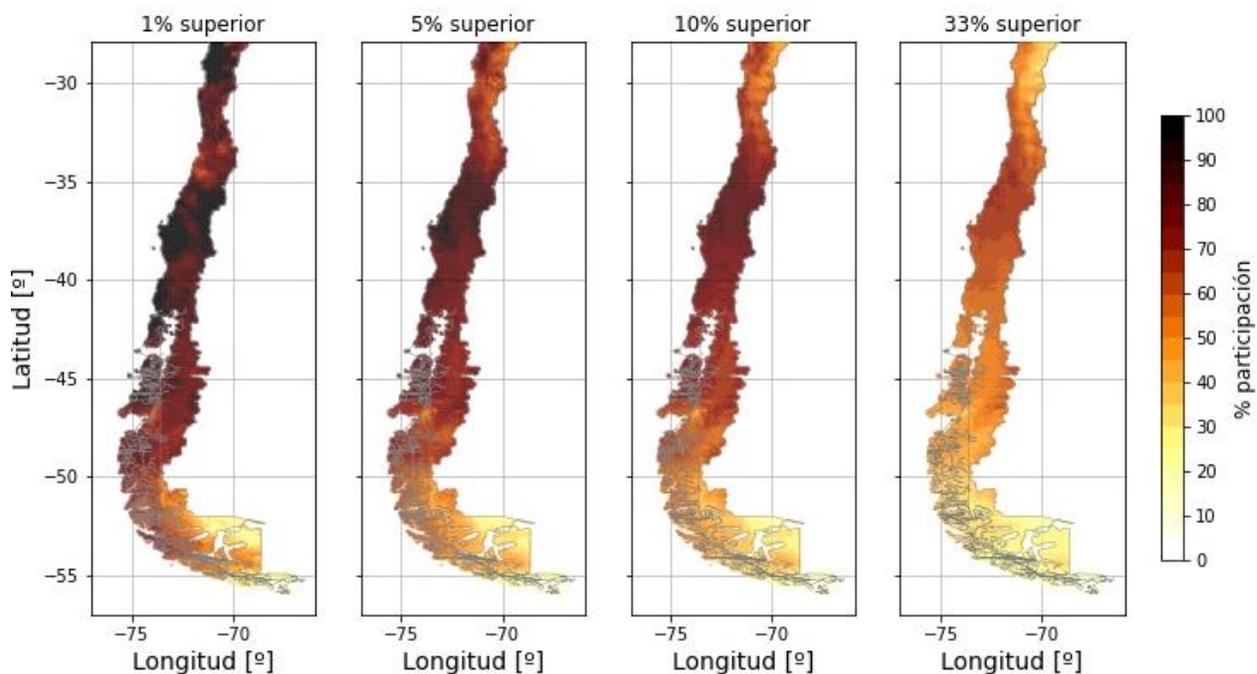


Figura 5.10. Porcentaje de participación de eventos de RA en el 1% de los eventos más intensos a nivel nacional, con escala temporal anual.

La Figura 5.11 describe el detalle de la contribución de cada mecanismo a cada uno de los umbrales representados en la figura anterior, agrupando por latitud de forma similar a lo realizado en las Figura 5.2 y Figura 5.3.

Se observa que, si bien las zonas de afectación son similares a lo que ocurre con las contribuciones a las precipitaciones medias anuales, distintos mecanismos presentan diferentes zonas preferenciales en donde se asocian a eventos extremos de precipitación. Por ejemplo, los eventos asociados a OR3, si bien no representan la mayor contribución a la precipitación media anual en la zona entre 30°S y 32°S, sí son la principal fuente de eventos extremos (con un umbral de 1%) en esa región, seguido por el mecanismo OR4n, el cual contribuye mayormente a la precipitación media anual de la zona en comparación a los otros mecanismos. O, por ejemplo, los eventos asociados a OEP tienen una región específica muy marcada donde se asocian a los eventos extremos de precipitación, incluso considerando todos los umbrales.

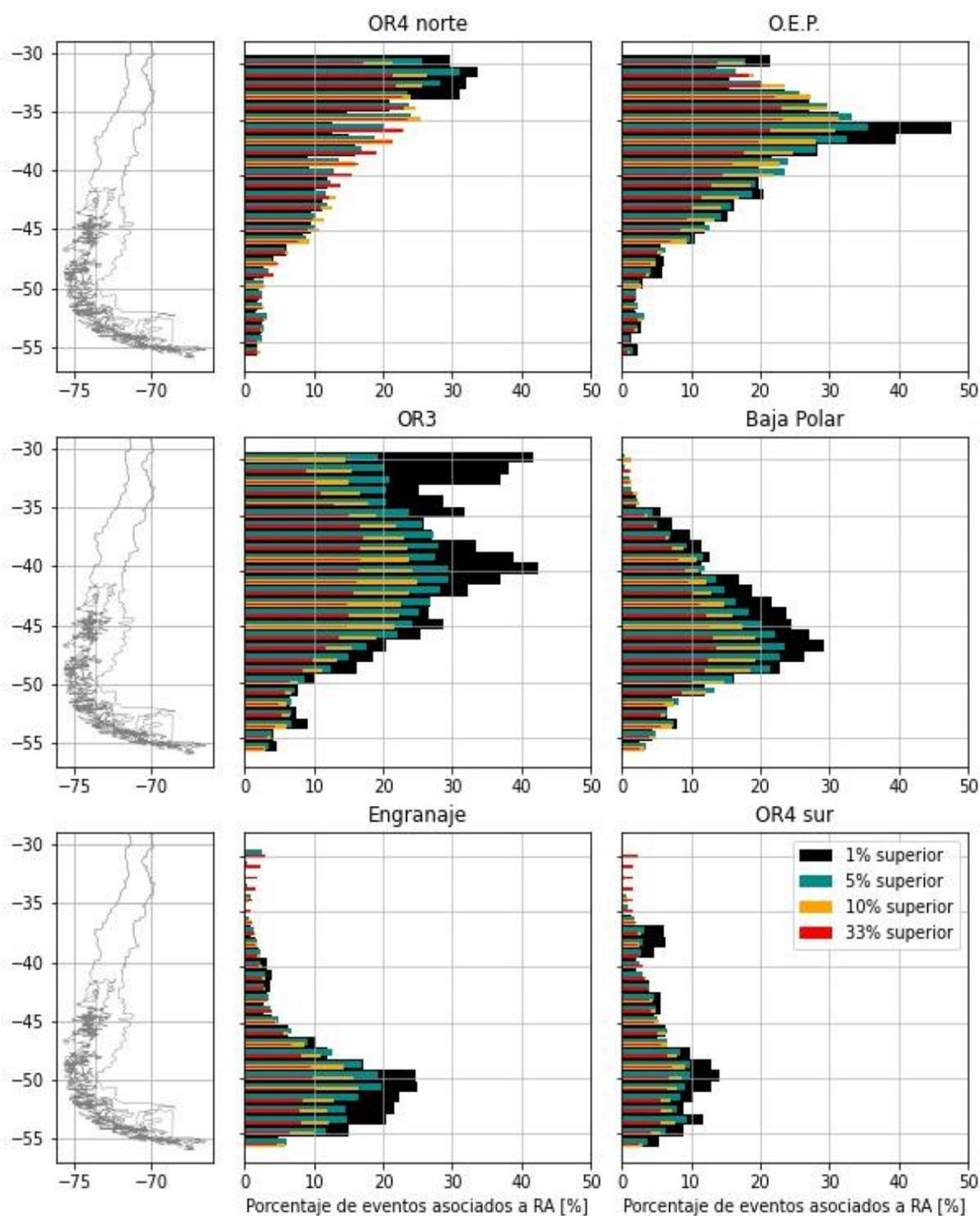


Figura 5.11. Porcentaje de eventos extremos de precipitación, definidos según distintos umbrales de muestra, asociados a cada uno de los mecanismos identificados en este trabajo.

Algunas características interesantes a destacar de este análisis son las siguientes:

- Existe una tendencia a que mientras mayor sea el umbral para definir el conjunto de eventos extremos, menor sea la participación de los eventos de RA de cada mecanismo en dicho conjunto. Esto apunta a una concentración de los eventos de precipitación asociados a los mecanismos a ser mayores que los eventos promedios.

- Solo el mecanismo OR4n aumenta su participación a medida que se aumenta el umbral para definir la muestra de eventos extremos. Esto puede estar relacionado con las características de los eventos de RA que conforman este mecanismo, donde los valores de IVT tienden a ser menores que los del promedio de los RA del conjunto total estudiado.
- Una excepción al punto anterior lo representa el mecanismo OR4s, el cual mantiene una proporción relativamente constante en los distintos umbrales. Este mecanismo no destaca por la generación de eventos de grandes magnitudes, e incluso, en los valores medios diarios se asimila a los valores medios generales.
- En general, los mecanismos tienden a presentar una zona preferencial donde generan eventos extremos de precipitación, directamente ligado a las zonas donde realizan sus mayores contribuciones a las precipitaciones medias anuales y evidentemente asociados a su lugar de ocurrencia. De estos máximos locales comienza una disminución a medida que se aumenta la distancia de dicho foco.
- Destacan por particularidades, sin embargo, el mecanismo de OEP, que presenta una zona muy marcada donde la participación en eventos extremos supera el 40% e incluso casi llega al 50% en una banda latitudinal de 2° y el mecanismo Engranaje, el cual presenta una amplia banda de 4° donde tiene un máximo relativamente constante.
- El mecanismo de OR3 es una excepción al punto anterior, presentando una distribución bimodal, generando máximos en latitudes alrededor de 30°S y de 40°S. Este mecanismo en particular se caracteriza por una variación estacional de impacto geográfico.
- El mecanismo de BP es uno de los principales responsables de los eventos extremos en la región de Patagonia Norte (entre 40°S y 50°S), con un máximo en torno a 47°S, ubicación donde se encuentra el campo glaciario de Campo de Hielo Norte. Adicionalmente, este mecanismo participa en hasta un 10% de los eventos más extremos en zonas hasta 37°S hacia el norte.

6 CONCLUSIONES

6.1 Comentarios generales

En el presente trabajo se estableció como objetivo la identificación objetiva de uno o más mecanismos físicos precursores de Ríos Atmosféricos presentes en Chile continental. En este aspecto se identificaron 6 mecanismos distintivos, expuestos en el capítulo 4 de este trabajo.

La identificación de estos mecanismos se hizo mediante el uso de técnicas de clasificación no supervisadas de campos relevantes de los ríos atmosféricos. Mediante el uso de modelos de mezcla gaussiana, fue posible establecer categorizaciones de elementos de características similares bajo un criterio objetivo netamente basado en una base matemática. Esta clasificación, realizada en base a campos de IVT observados en días con ocurrencia de un evento de RA, permitió asignar una etiqueta a cada evento y el posterior cálculo de compuestos basados en esta categorización.

La categorización de las fechas de cada evento fue utilizada adicionalmente para el cálculo de compuestos de múltiples campos atmosféricos e índices climáticos relevantes (como, por ejemplo, campos de geopotencial o el valor del índice de MJO), permitiendo así identificar y describir mecanismos de circulación asociados a la ocurrencia de RA que realizaran contacto con continental de Chile.

Así, la metodología planteada de clasificación representa una alternativa para abordar fenómenos sobre los cuales no se tienen nociones concretas o desconocidas a priori. El uso de esta técnica es una alternativa para la generación de compuestos con el objetivo de identificar patrones no evidentes. Esto se comprueba en los resultados obtenidos, que agrupan eventos de RA que comparten ubicación y temporalidad, con resultados similares a lo que se obtendría de una clasificación arbitraria según estos criterios, pero con la ventaja de identificar otros grupos que no necesariamente comparten alguno de estos criterios.

Al usar esta metodología se debe poner atención a la información por agrupar, ya que, para obtener una clasificación adecuada, el fenómeno estudiado este debe quedar bien representado. Algunos de los puntos más relevantes se enumeran a continuación:

- a) Acotada y precisar el fenómeno de estudio adecuadamente, (en este caso los *eventos de ríos atmosféricos que impactan sobre Chile continental*). Los resultados podrían variar drásticamente en el caso de considerar, por ejemplo, los eventos de RA que alcancen cierta distancia de la costa o aquellos que *no* hacen contacto.
- b) Identificar la información más representativa del fenómeno estudiado, geográfica y temporalmente. Se recomienda realizar análisis de sensibilidad y revisar coherencia de los resultados. En este estudio, se incorporó la evolución temporal, a través de la *traza* de IVT (la acumulación de días sucesivos de esta variable). Además, la selección del área de influencia atribuido desde los campos atmosféricos debe ser adecuada, cuidando no incluir fenómenos que podrían comprometer los resultados al incluir variabilidad no relevante.

- c) Resulta conveniente apoyarse en nociones específicas sobre algún mecanismo ya conocido como punto de referencia en el proceso de determinación e identificación de resultados.

Ante la falta de antecedentes, fue necesario definir un protocolo que facilite la correcta identificación de los mecanismos buscados. Se definieron ciertos criterios que, al cumplirse, permiten considerar el compuesto resultado de una categorización como candidato mecanismo. Estos criterios son:

- i. Se identifica el mismo compuesto bajo clasificaciones que utilizan distintas separaciones de la muestra de eventos. En este caso, se realizó una separación geográfica de los eventos en dos subgrupos (al norte y sur de 42°S), sobre los cuales se buscó coherencia con la clasificación general realizada, identificándose así los mecanismos presentados en este trabajo.
- ii. Se identifican compuestos equivalentes a partir de un cierto número de categorías objetivo, y en iteraciones posteriores de clasificación, donde se tenga un número objetivo de categorías mayor.
- iii. Los elementos que componen un clúster bajo un esquema de clasificación con n grupos objetivos son clasificados juntos nuevamente bajo otro esquema con $n+1$ grupos objetivos, manteniendo de forma general los elementos que lo conformaban en la sección anterior. Esto se interpreta como que un mismo mecanismo es identificable, de forma coherente, aun al aumentar los grupos objetivos de clasificación.

Resulta necesario en la aplicación de los criterios anteriores mantener una perspectiva del objetivo que se tiene. Dado que este estudio se orienta a mecanismos de tipo general, analizando todo el territorio continental, el número de grupos objetivos analizado fueron desde 2 hasta 12 categorías, al analizar la totalidad de la muestra y desde 2 hasta 7 en el caso de las subdivisiones geográficas.

Utilizando la metodología plantada, se cumple el objetivo general de este estudio al identificar 6 mecanismos atmosféricos que conducen a la generación de eventos de RA que impactan sobre Chile continental. Los resultados obtenidos en base a la clasificación automática no supervisada logran identificar de forma exitosa no solo patrones de circulación, sino que además se obtiene una clasificación espacial y temporal de los eventos de forma coherente y totalmente independiente.

En las Figura 6.1 y Figura 6.2 se presentan esquemas conceptuales de cada uno de los mecanismos planteados. El capítulo 4 presenta una descripción detallada de las características esperables de un evento generado según cada mecanismo. Sin embargo, resulta particularmente destacable que la mayoría de los mecanismos presentan elementos de teleconexión con convección tropical en alguna magnitud. En algunos casos, es posible vincular el origen de los eventos de RA (baja polar) con esta actividad y en otras funciona como un factor complementario que puede intensificar fenómenos de ocurrencia natural (onda Rossby 3).

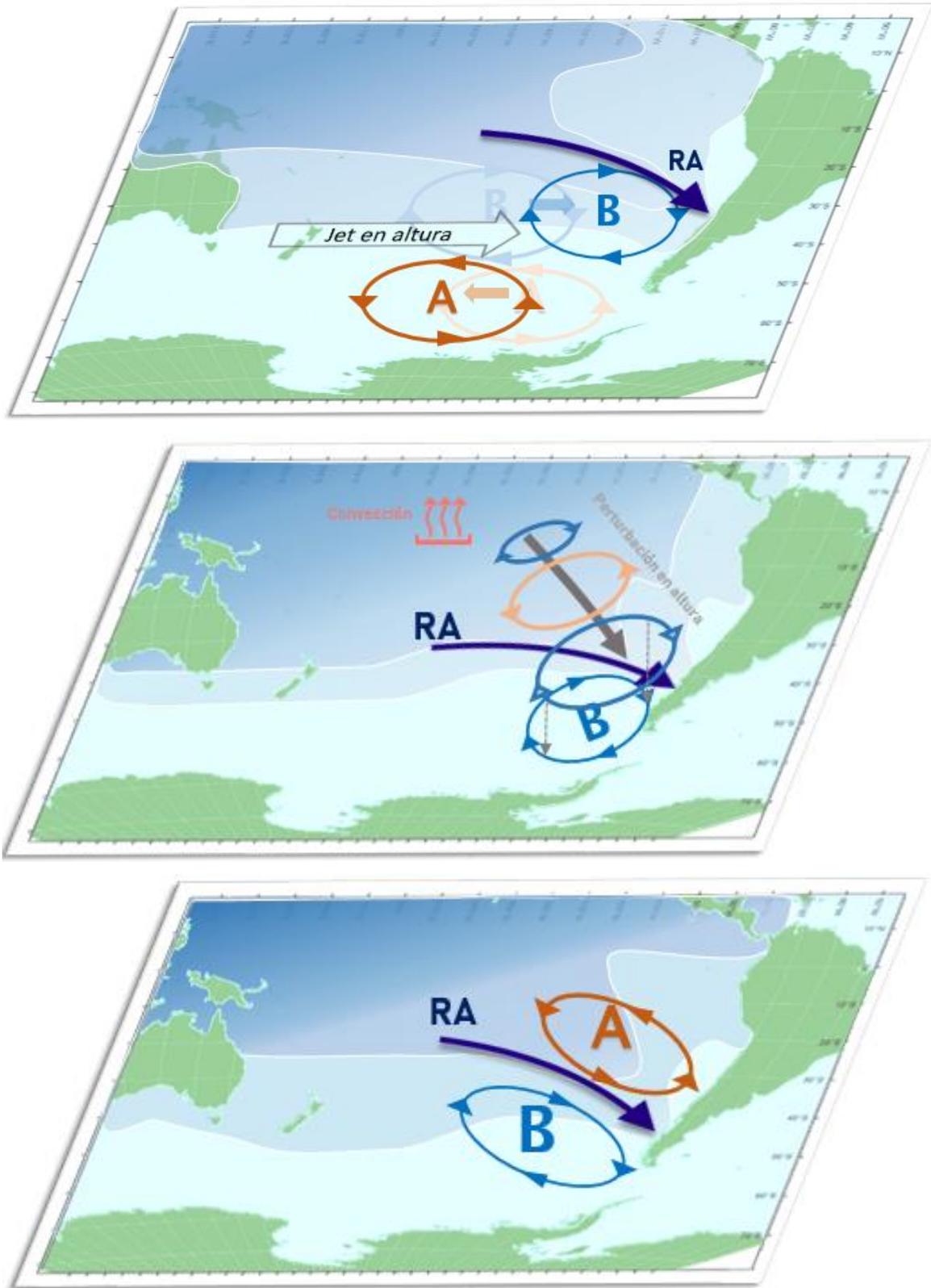


Figura 6.1. Esquemas conceptuales de los mecanismos Onda Estacionaria del Pacífico, Baja Polar y Engranaje.

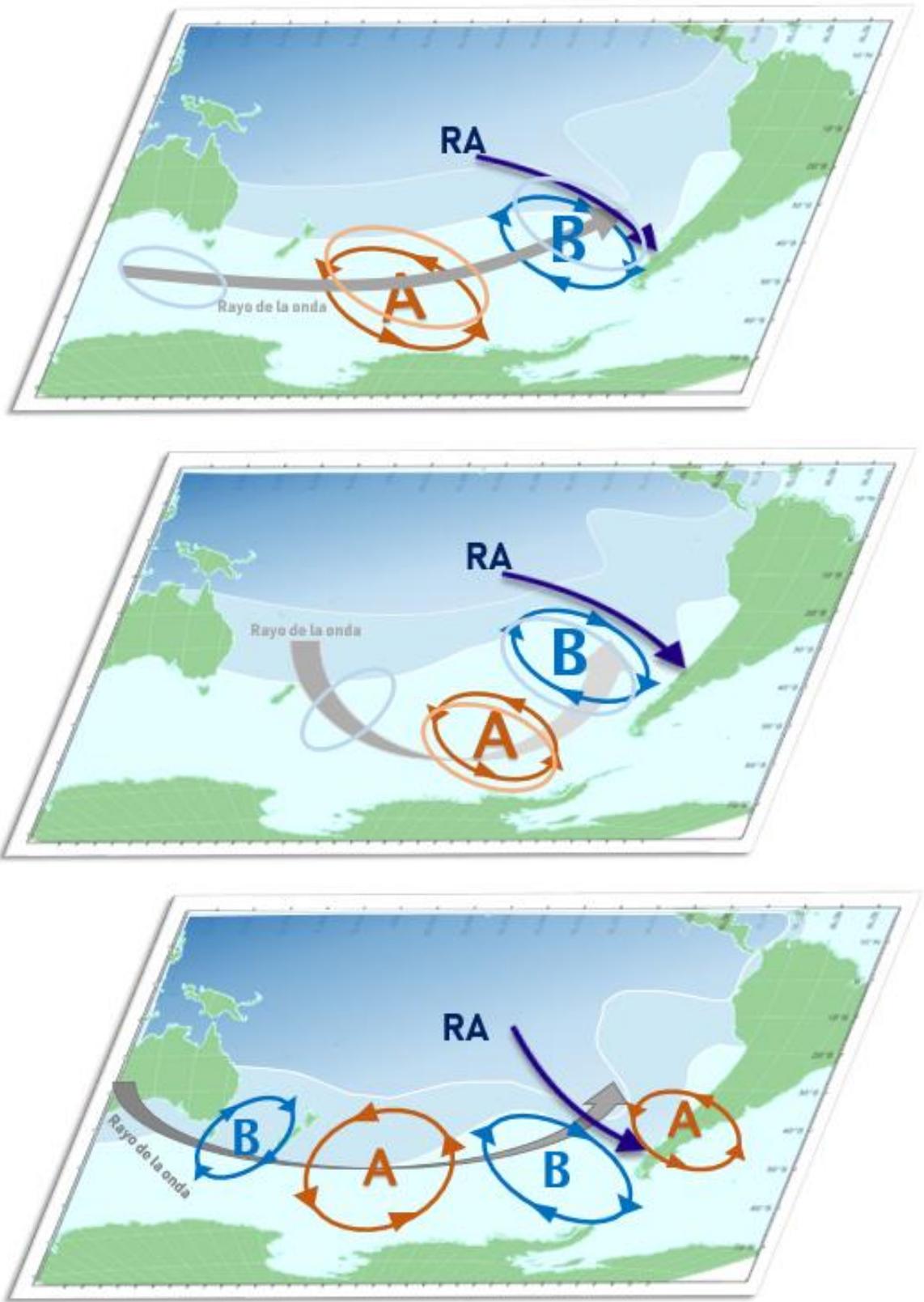


Figura 6.2. Esquemas conceptuales de los mecanismos onda de Rossby con número de onda 3 (panel superior), de onda de Rossby y con número de onda 4 en sus fases norte (panel central) y sur (panel inferior).

Los mecanismos de ocurrencia de RA identificados presentan características particulares, que permiten identificarlos como tal de forma contundente. Cada uno de ellos presenta una zona geográfica preferencial, reconociéndose algunos enfocados que afectan principalmente a la zona centro-sur del país (OR4n, OEP), otros en el sector de la Patagonia (OR4s, En) y otros que presentan un rango mayor de afectación, al desplazarse estacionalmente (OR3, BP).

En general, todos los mecanismos presentan algún grado de teleconexión con alguna onda tropical, ya sea como principal forzante (como es el caso de las ondas de Rossby), o bien como un potencial complemento en caso de ocurrir (como el mecanismo de BP). Sin embargo, el origen de estas perturbaciones varía en su ubicación longitudinal. Es posible identificar que el desarrollo de algunos mecanismos es un fenómeno propio solo de lo que ocurra en la cuenca del Océano Pacífico (OEP, BP en su mayor parte), mientras que otros tienen teleconexiones más lejanas, llegando a identificarse relaciones incluso con el océano Índico. Esto se ven reflejado en la correlación que tienen cada uno de los mecanismos con los valores del índice MJO.

Los mecanismos identificados se pueden clasificar en fenómenos pseudo estacionarios o transientes. Mecanismos tales como la Onda Estacionaria del Pacífico o la Baja Polar generan perturbaciones que, en general, tienen poco desplazamiento geográfico y que generar condiciones favorables para la ocurrencia de RA de forma incremental, al disponibilizar humedad en zonas de latitudes medias, la cual eventualmente es transportada sujeto a la ocurrencia de algún evento que genera una inestabilidad. Por otro lado, existen mecanismos de carácter transiente, como las Ondas de Rossby (en sus distintas configuraciones), que responden perturbando la atmósfera de forma tal que eventualmente, según lo descrito en este trabajo, generan eventos de RA.

Independiente de la clasificación previa, las configuraciones atmosféricas de los distintos mecanismos están altamente vinculadas a la forma en que se configuran los RA característicos de cada uno. Es posible identificar algunos mecanismos que generan una condición sinérgica entre anomalías positivas y negativas, las cuales favorecen la advección de humedad y dado el fuerte gradiente de presiones, la ocurrencia de vientos más intensos, lo que conduce a eventos con mayores valores de IVT (como, por ejemplo, el mecanismo de Engranaje, como lo dice su nombre, o el mecanismo OR4s). Por el contrario, mecanismos como la OR3 o la OR4n, donde la ocurrencia del RA se asocia a un solo núcleo de anomalías tienden a presentar valores menores.

Sin embargo, mayores valores de IVT no necesariamente generar efectos de mayor impacto sobre las precipitaciones que efectivamente se generan producto de la interacción entre los RA de cada mecanismo y la topografía con que chocan. Así lo demuestran los resultados de los valores de precipitación asociadas a las tormentas por ejemplo del mecanismo OR4n, que presenta el menor valor promedio de IVT. A pesar de esta característica, es un mecanismo que genera tiene precipitaciones medias diarias de 40 mm en sus días de tormenta, muy superiores a los valores obtenidos por los eventos de precipitación de BP (del orden de 30 mm/día), obtenidos en la zona de la Patagonia en base a RA con valores de IVT en promedio mayores. Sin embargo, los valores de IVT claramente de cada RA claramente influyen los valores de precipitación, como se aprecia al hacer la comparación entre los resultados de los eventos de OEP y OR4n. Se destaca que tres de los mecanismos identificados (OR3, OR4n y OEP) son responsables de una parte muy importante de la precipitación media anual de la zona centro-sur de Chile.

Complementario al punto de las consecuencias de un RA en función de su IVT, pero extendiendo el análisis, el ángulo de incidencia y desplazamiento que tienen los eventos de cada mecanismo condicionan fuertemente los efectos que tienen sobre las precipitaciones en el territorio nacional. Esto queda evidentemente demostrado en los resultados obtenidos para los mecanismos más australes: OR4s, Engranaje y BP. Mientras que los mecanismos BP (el que tiene una ligera curvatura con un eventual desplazamiento hacia el norte) y En (el que se traslada de forma relativamente recta debido a la configuración que le da origen) tienden a interactuar más con la topografía, el mecanismo OR4s en general tiene una trayectoria que lo desplaza más hacia el sur, evitando la interacción continental.

Finalmente, es importante reforzar que los mecanismos planteados bajo ningún concepto pretenden declararse los responsables exclusivos de eventos de ríos atmosféricos, existiendo un conjunto de elementos no clasificados no asociados a estos mecanismos. Sobre los elementos de aquellos grupos, es posible elaborar dos hipótesis: por un lado, puede que representen eventos de RA sin un mecanismo claro, donde pueden mezclarse dos o más condiciones de los mecanismos identificados en este trabajo, o bien, responden a mecanismos que presentan una frecuencia menor y que no logran ser identificados bajo las condiciones de clasificación aplicadas.

6.2 Trabajos Futuros

En base al trabajo y la metodología de este trabajo de tesis, y a la luz de los resultados obtenidos, surgen de forma natural aristas a desarrollar, tanto para profundizar como para ampliar el enfoque y resolver otras interrogantes surgidas durante el desarrollo de este trabajo. Se enumeran a continuación algunas de estas ideas en líneas generales como sugerencias para eventuales trabajos futuros:

6.2.1 Aplicación de la metodología sobre zonas más acotadas

Durante el desarrollo de este trabajo, alternativamente a la sectorización en dos grandes zonas al norte y al sur de 42°S, se aplicó el algoritmo de clasificación en regiones geográficas de menor extensión, con distintos números de grupos como objetivos.

Si bien los resultados en las zonas del centro-sur del país resultaron relativamente coherentes y mostraron resultados similares a los presentados, en el caso del ejercicio de agrupación automática en el sector norte con un número alto de grupos como objetivo se identificó un clúster con un patrón espacial de eventos de RA que se caracterizaba por encontrarse en el extremo norte del país. Uno de los eventos que componían este clúster fue tema de estudio en Vicencio (2020), donde se revisa como caso de estudio el desarrollo de un evento de RA en el sector norte del país asociado a la intrusión de humedad en la atmosfera proveniente desde latitudes subtropicales.

Considerando esto, se identifica un gran potencial del algoritmo de clasificación utilizado en la detección de mecanismos particulares de regiones acotadas, si es que se utiliza bajo condiciones más acotadas o en contextos más específicos (por ejemplo, se podría plantear la interrogante de identificar cuáles son los patrones que generan un evento de RA en una ciudad en particular, o cuales son los que generan precipitación en un cierto periodo estacional). Incluso, podría aplicarse en la identificación de patrones conducentes a eventos extremos de precipitación e incluso, a otro tipo de eventos no necesariamente asociados a RA, como por ejemplo olas de calor o de frío.

6.2.2 Evaluación de la correcta representación de estos mecanismos en modelos de circulación general

Dada la importancia de los RA para el suministro de agua a nivel nacional, resulta relevante revisar si es que los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) logran reproducir los mecanismos que conllevan a la ocurrencia de ellos. Estos modelos son usados para evaluar los efectos del cambio climático, y podrían por tanto dar luces de los efectos de este sobre la ocurrencia e intensidad de los RA, si es que estos logran ser representados adecuadamente. Algunos aspectos a considerar en esta evaluación sería una adecuada representación de la posición espacial, la longitud temporal y la intensidad de los eventos, comparando climatologías y una adecuada representación de los mecanismos identificados en este trabajo.

Este tipo de análisis contribuiría profundamente a evaluar la confianza que se puede entregar a estas herramientas de modelación, y a las proyecciones realizadas con ellos, en particular en estudios de cambio climático donde resultan una herramienta fundamental. En la literatura, Benedict et al. (2019) realiza un estudio en estas líneas, donde evalúa el desempeño del modelo CESM2 para representar los eventos de RA en la costa oeste de América del Norte, donde los ríos atmosféricos quedan sub-representados entre un 5% y un 20% en intensidad y frecuencia. En dicho estudio, se revisan las causas dinámicas de las falencias del modelo. Cabe destacar que este estudio contribuye entregando información base sobre los aspectos y mecanismos atmosféricos que se debiesen desarrollar.

6.2.3 Sensibilización de resultados en función de otros catálogos

Todo el trabajo desarrollado se basa en la utilización de un catálogo de RA, en base a un reanálisis en particular. Si bien los resultados presentados presentan un buen nivel de coherencia, resultaría interesante realizar un análisis de la incertidumbre de ellos en base a repetir el proceso considerando otras fuentes de información base.

Así, por ejemplo, podrían realizarse esfuerzos utilizando catálogos de identificación de RA distintos al usado en este trabajo, tanto de carácter mundial (Rutz et al., 2014) como local y específico a la región (Viale et al., 2018), o que bien realicen otro tipo de agrupamiento temporal como por ejemplo Pan & Lu (2019). Realizar el mismo procedimiento utilizando estos distintos catálogos permitiría estimar adecuadamente un rango de incertidumbre de los resultados.

6.2.4 Identificación de patrones de eventos de precipitación extremos

A la luz de los resultados obtenidos de la interacción de los mecanismos de RA tanto con la precipitación media anual, como los eventos extremos de precipitación, surge la alternativa de utilizar la metodología de estudio en conjunto con la información de campos de precipitaciones para estudiar condiciones atmosféricas que podrían resultar de interés. La inclusión en un estudio con metodología similar de variables como la topografía, el agua precipitable o la evolución de la trayectoria del RA tras realizar contacto podrían ser elementos adicionales de gran aporte en la determinación de mecanismos de eventos de precipitación extrema.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723.
- Benedict, I., Ødemark, K., Nipen, T., & Moore, R. (2019). Large-Scale Flow Patterns Associated with Extreme Precipitation and Atmospheric Rivers over Norway. *Monthly Weather Review*, 147(4), 1415–1428. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0362.1>
- Benedict, J. J., Clement, A. C., & Medeiros, B. (2019). Atmospheric Blocking and Other Large - Scale Precursor Patterns of Landfalling Atmospheric Rivers in the North Pacific: A CESM2 Study Journal of Geophysical Research : Atmospheres. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 124(21), 11330–11353. <https://doi.org/10.1029/2019JD030790>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 19739.
- Budiarto, A., Mahesworo, B., Hidayat, A. A., Nurlaila, I., & Pardamean, B. (2021). Gaussian Mixture Model Implementation for Population Stratification Estimation from Genomics Stratification Data. *Procedia Computer Science*, 179, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.12.026>
- Campos, D. (2020). Variabilidad interanual del transporte de humedad en el Pacífico Sur y su relación con la precipitación en Chile. *Universidad de Chile, Tesis para*.
- Cheng, X., & Wallace, J. M. (1993). Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field: Spatial patterns. *Journal of Atmospheric Sciences*, 50(16), 2674–2696.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Deser, C., Trenberth, K., & Staff, N. (2016). The Climate Data Guide: Pacific Decadal Oscillation(PDO): Definition and Indices. *NCf. A. Research, Ed.*
- Dettinger, M. D. (2013). Atmospheric Rivers as Drought Busters on the U . S . West Coast. *Journal of Hydrometeorology*, 14(6), 1721–1732. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-02.1>
- Dettinger, M. D., Ralph, F. M., Das, T., Neiman, P. J., & Cayan, D. R. (2011). Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. *Water (Switzerland)*, 3(2), 445–478. <https://doi.org/10.3390/w3020445>
- DGA. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro.
- DGA. (2019a). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la macrozona austral e Isla de Pascua. In *SIT N° 444*.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

- DGA. (2019b). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas sur y parte norte de la macrozona austral. In *SIT N° 441. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de*.
- Garreaud, R., & Battisti, D. S. (1999). Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation. *Journal of Climate*, 12(7), 2113–2123.
- Garreaud, R. D. (2013). *Warm Winter Storms in Central Chile*. (2011), 1515–1534. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0135.1>
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., ... Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- GJ McLachlan, K. B. (1988). *Mixture models: Inference and applications to clustering*.
- Gonzales, K. R., Swain, D. L., Barnes, E. A., & Diffenbaugh, N. S. (2020). Moisture vs. Wind Dominated Flavors of Atmospheric Rivers. *Geophysical Research Letters*, 47(23). <https://doi.org/10.1029/2020GL090042>
- Gorodetskaya, I. V, Tsukernik, M., Claes, K., Ralph, M. F., Neff, W. D., & Lipzig, N. P. M. Van. (2014). *The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica*. (July 2012), 6199–6206. <https://doi.org/10.1002/2014GL060881.Abstract>
- Goyal, R., Jucker, M., Gupta, A. Sen, Hendon, H., & England, M. (2021). *Zonal Wave 3 Pattern in the Southern Hemisphere generated by tropical convection*.
- Grotjahn, R., & Faure, G. (2008). Composite predictor maps of extraordinary weather events in the Sacramento, California, region. *Weather and Forecasting*, 23(3), 313–335.
- Guan, B., Molotch, N. P., Waliser, D. E., Fetzer, E. J., & Neiman, P. J. (2010). Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements. *Geophysical Research Letters*, 37(20), 2–7. <https://doi.org/10.1029/2010GL044696>
- Guan, B., Molotch, N. P., Waliser, D. E., Fetzer, E. J., & Neiman, P. J. (2013). *The 2010 / 2011 snow season in California 's Sierra Nevada : Role of atmospheric rivers and modes of large-scale variability*. 49(January), 6731–6743. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20537>
- Guan, B., & Waliser, D. E. (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *Journal of Geophysical Research*, 120(24), 12,514–12,535. <https://doi.org/10.1002/2015JD024257>
- Hatchett, B. J., Burak, S., Rutz, J. J., Oakley, N. S., Bair, E. H., & Kaplan, M. L. (2017). Avalanche fatalities during atmospheric river events in the Western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 18(5), 1359–1374. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0219.1>

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ...
Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal
Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Kysel, J., & Tveito, O. E. (2008).
Classifications of Atmospheric Circulation Patterns Recent Advances and
Applications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 105–152.
<https://doi.org/10.1196/annals.1446.019>
- Jiang, Y., & Frank Leung, H. F. (2019). Gaussian Mixture Model and Gaussian Supervector
for Image Classification. *2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal
Processing, 2018-Novem*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICDSP.2018.8631558>
- Kayano, M. T., Andreoli, R. V., Augusto, R., & Souza, F. De. (2019). *El Niño – Southern
Oscillation related teleconnections over South America under distinct Atlantic
Multidecadal Oscillation and Pacific Interdecadal Oscillation backgrounds : La
Niña*. (October 2018), 1359–1372. <https://doi.org/10.1002/joc.5886>
- Kim, H. M., Zhou, Y., & Alexander, M. A. (2019). Changes in atmospheric rivers and
moisture transport over the Northeast Pacific and western North America in response
to ENSO diversity. *Climate Dynamics*, 52(12), 7375–7388.
<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3598-9>
- Kingston, D. G., Lavers, D. A., & Hannah, D. M. (2016). Floods in the Southern Alps of
New Zealand: the importance of atmospheric rivers. *Hydrological Processes*, 30(26),
5063–5070. <https://doi.org/10.1002/hyp.10982>
- Kuyuk, H. S., Yildirim, E., Dogan, E., & Horasan, G. (2012). Application of k -means and
Gaussian mixture model for classification of seismic activities in Istanbul. *Nonlinear
Processes in Geophysics*, 19(4), 411–419. <https://doi.org/10.5194/npg-19-411-2012>
- Lanjewar, R. B., Mathurkar, S., & Patel, N. (2015). Implementation and Comparison of
Speech Emotion Recognition System using Gaussian Mixture Model (GMM) and K-
nearest Neighbo (K-NN) techniques. *Procedia Computer Science*, 49, 50–57.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.226>
- Lau, K. M., Sheu, P. J., & Kang, I.-S. (1994). Multiscale low-frequency circulation modes
in the global atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(9), 1169–1193.
- Lavers, D. A., & Villarini, G. (2015). The contribution of atmospheric rivers to
precipitation in Europe and the United States. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 522,
382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.010>
- Lavers, D. A., Villarini, G., Allan, R. P., Wood, E. F., & Wade, A. J. (2012). The detection
of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter
floods and the large-scale climatic circulation. *Journal of Geophysical Research
Atmospheres*, 117(20), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012JD018027>
- Lee, K. J., Guillemot, L., Yue, Y. L., Kramer, M., & Champion, D. J. (2012). Application of
the Gaussian mixture model in pulsar astronomy - pulsar classification and
candidates ranking for the Fermi 2FGL catalogue. *Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society*, 424(4), 2832–2840. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21413.x>
- Lejenas, H. (1988). Southern Hemisphere planetary-scale waves and blocking. *Journal of
the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 66(5), 777–781.

- Li, K., Ma, Z., Robinson, D., & Ma, J. (2018). Identification of typical building daily electricity usage profiles using Gaussian mixture model-based clustering and hierarchical clustering. *Applied Energy*, 231(May), 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.050>
- Liu, J. S., Zhang, J. L., Palumbo, M. J., & Lawrence, C. E. (2003). Bayesian Clustering with variable and transformation selections. *Bayesian Statistics*, 7, 249–275.
- Maćkiewicz, A., & Ratajczak, W. (1993). Principal components analysis (PCA). *Computers & Geosciences*, 19(3), 303–342.
- Mantua, N J. (1999). *The Pacific Decadal Oscillation. A brief overview for non-specialists, to appear in the Encyclopedia of Environmental Change.*
- Mantua, Nathan J, Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069–1080.
- Miao, Y., Guo, J., Liu, S., Liu, H., Li, Z., Zhang, W., & Zhai, P. (2017). Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), 3097–3110.
- Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., & Scott, C. (1992). Tropospheric rivers? A pilot study. *Geophysical Research Letters*, 19(24), 2401–2404.
- O'Brien, T. A., Risser, M. D., Loring, B., Elbashandy, A. A., Krishnan, H., Johnson, J., ... Collins, W. D. (2020). Detection of atmospheric rivers with inline uncertainty quantification : TECA-BARD v1 . 0 . 1. *Geoscientific Model Development*, 13((12)), 6131–6148.
- Pan, M., & Lu, M. (2019). A novel atmospheric river identification algorithm. *Water Resources Research*, 55(7), 6069–6087.
- Payne, A. E., & Magnusdottir, G. (2015). *An evaluation of atmospheric rivers over the North Pacific in CMIP5 and their response to warming under RCP 8 . 5.* 173–190. <https://doi.org/10.1002/2015JD023586>. Received
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... Dubourg, V. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Peng, W. (2017). Model selection for Gaussian mixture model based on desirability level criterion. *Optik*, 130, 797–805. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.10.125>
- Pernin, J., Vrac, M., Crevoisier, C., Chédin, A., Saclay, É. De, & Merisiers, O. (2016). Mixture model-based atmospheric air mass classification : a probabilistic view of thermodynamic profiles. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 2(2), 115–136. <https://doi.org/10.5194/ascmo-2-115-2016>
- Pittock, A. B. (1980). Patterns of climatic variation in Argentina and Chile—I Precipitation, 1931–60. *Monthly Weather Review*, 108(9), 1347–1361.
- Ralph, F. M., Neiman, P. J., Kiladis, G. N., Weickmann, K., & Reynolds, D. W. (2011). A multiscale observational case study of a Pacific atmospheric river exhibiting tropical–extratropical connections and a mesoscale frontal wave. *Mon. Wea. Rev.*, 139(4), 1169–1189.

- Ralph, F. M., Neiman, P. J., Wick, G. A., Gutman, S. I., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., & White, A. B. (2006). Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, *33*(13), 3–7. <https://doi.org/10.1029/2006GLO26689>
- Ralph, F. M., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., ... Smallcomb, C. (2019). A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *100*(2), 269–289.
- Raphael, M. N. (2004). A zonal wave 3 index for the Southern Hemisphere. *31*(December), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GLO20365>
- Raphael, M. N. (2007). The influence of atmospheric zonal wave three on Antarctic sea ice variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*(D12).
- Raphael, M. N., & Hobbs, W. (2014). The influence of the large-scale atmospheric circulation on Antarctic sea ice during ice advance and retreat seasons. *Geophysical Research Letters*, *41*(14), 5037–5045.
- Rutz, J. J., & Steenburgh, W. J. (2012). Quantifying the role of atmospheric rivers in the interior western United States. *261*(July), 257–261. <https://doi.org/10.1002/asl.392>
- Rutz, J. J., Steenburgh, W. J., & Ralph, F. M. (2014). Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western United States. *Monthly Weather Review*, *142*(2), 905–921.
- Saavedra, F., Cortés, G., Viale, M., Margulis, S., & McPhee, J. (2020). Atmospheric Rivers Contribution to the Snow Accumulation Over the Southern Andes (26.5° S–37.5° S). *Frontiers in Earth Science*, *8*(July), 1–11. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00261>
- Shin, M. S., Sekora, M., & Byun, Y. I. (2009). Detecting variability in massive astronomical time series data-i. application of an infinite gaussian mixture model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *400*(4), 1897–1910. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15576.x>
- Smith, B. L., Yuter, S. E., Neiman, P. J., & Kingsmill, D. E. (2010). Water Vapor Fluxes and Orographic Precipitation over Northern California Associated with a Landfalling Atmospheric River. *Monthly Weather Review*, *138*(1), 74–100. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2939.1>
- Smyth, P., Ghil, M., Ide, K., & Roden, J. (1997). Detecting Atmospheric Regimes Using Cross-Validated Clustering. *KDD*, 61–66.
- Smyth, P., Ide, K., & Ghil, M. (1999). Multiple Regimes in Northern Hemisphere Height Fields via Mixture Model Clustering. *Journal of Atmospheric Sciences*, *56*(21), 3704–3723.
- Turner, J., Hosking, J. . S., Bracegirdle, T. J., Phillips, T., & Marshall, G. J. (2017). Variability and trends in the Southern Hemisphere high latitude, quasi-stationary planetary waves. *International Journal of Climatology*, *37*(5), 2325–2336.
- Ullah, I., & Mengersen, K. (2019). Bayesian mixture models and their Big Data implementations with application to invasive species presence-only data. *Journal of Big Data*, *6*(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0188-1>
- Valenzuela, R. A., & Garreaud, R. D. (2019). Extreme daily rainfall in central-southern

- Chile and its relationship with low-level horizontal water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9), 1829–1850. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0036.1>
- van Loon, H., & Jenne, R. L. (1972). The zonal harmonic standing waves in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, 77(6), 992–1003.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. (2018). Impacts of atmospheric rivers on precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671–1687. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0006.1>
- Vicencio Veloso, J. M. (2020). *Análisis de un evento extremo precipitación ocurrido en Enero de 2020 en el Desierto de Atacama y su relación con un río atmosférico en la Costa Occidental de Sudamérica.*
- Vrac, M., Hayhoe, K., & Stein, M. (2007). *Identification and intermodel comparison of seasonal circulation patterns over North America.* 27(5), 603–620. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Zhu, Y., & Newell, R. E. (1998). A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*, 126(3), 725–735. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2)

ANEXOS

A.1 Porcentaje de eventos relacionados a RA con respecto a la climatología de frecuencia anual

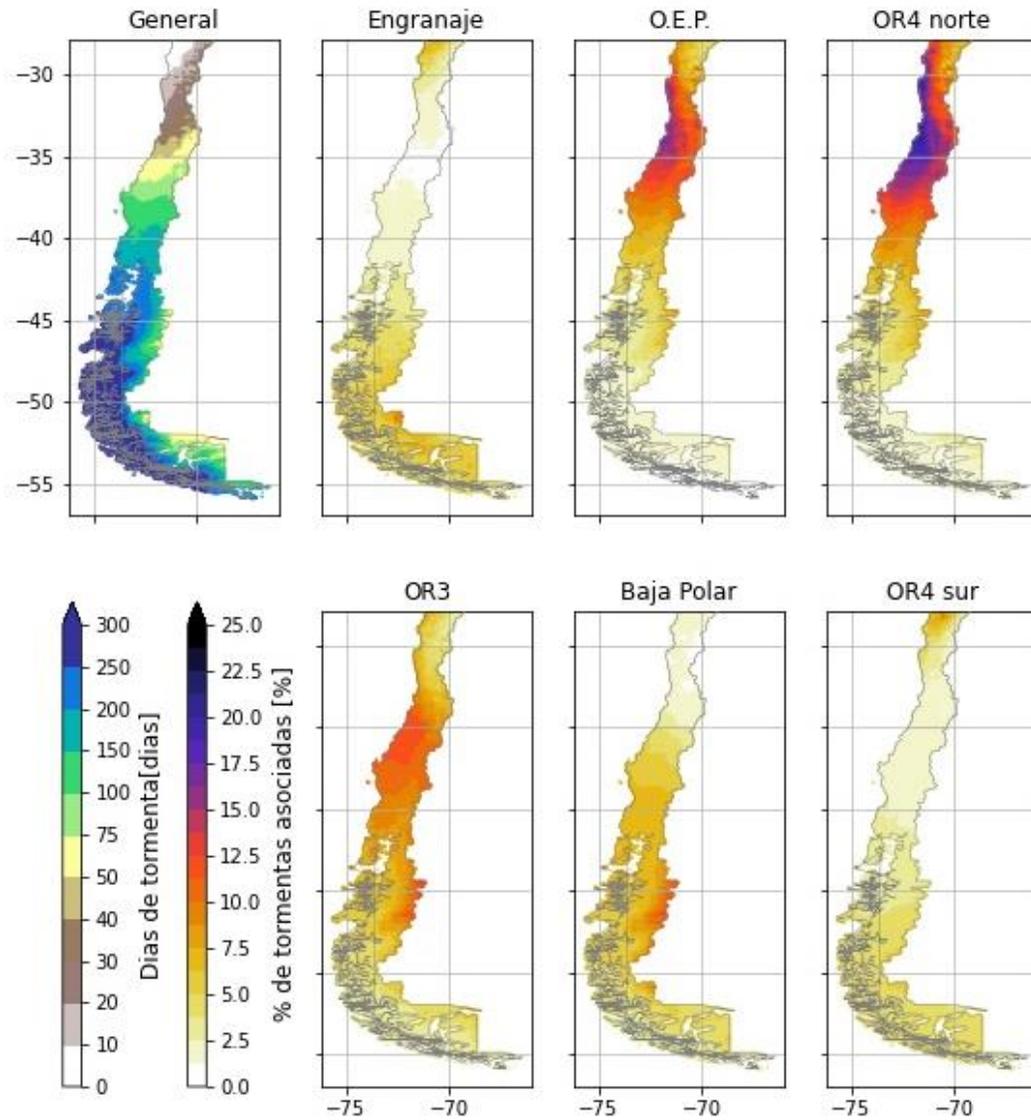
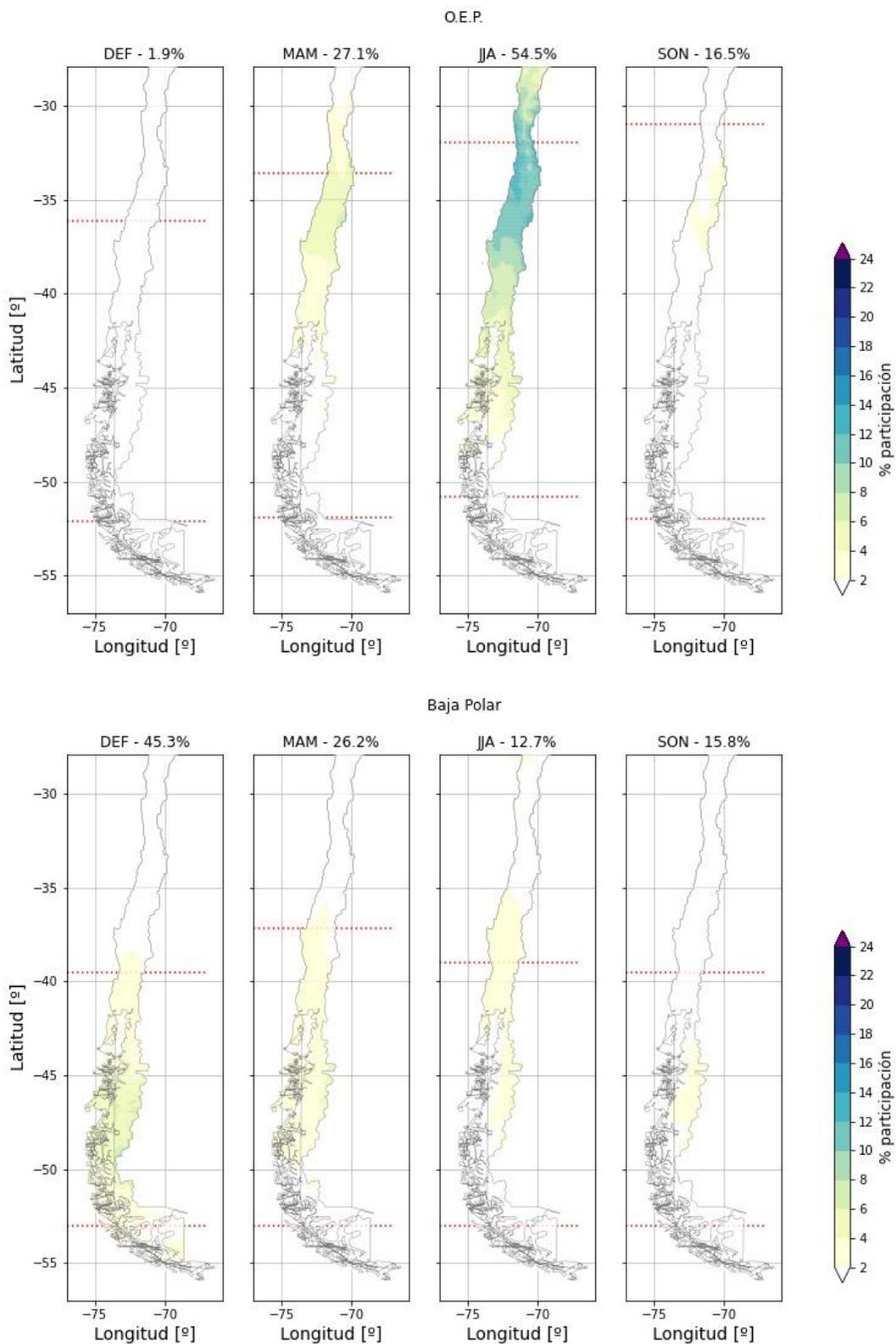
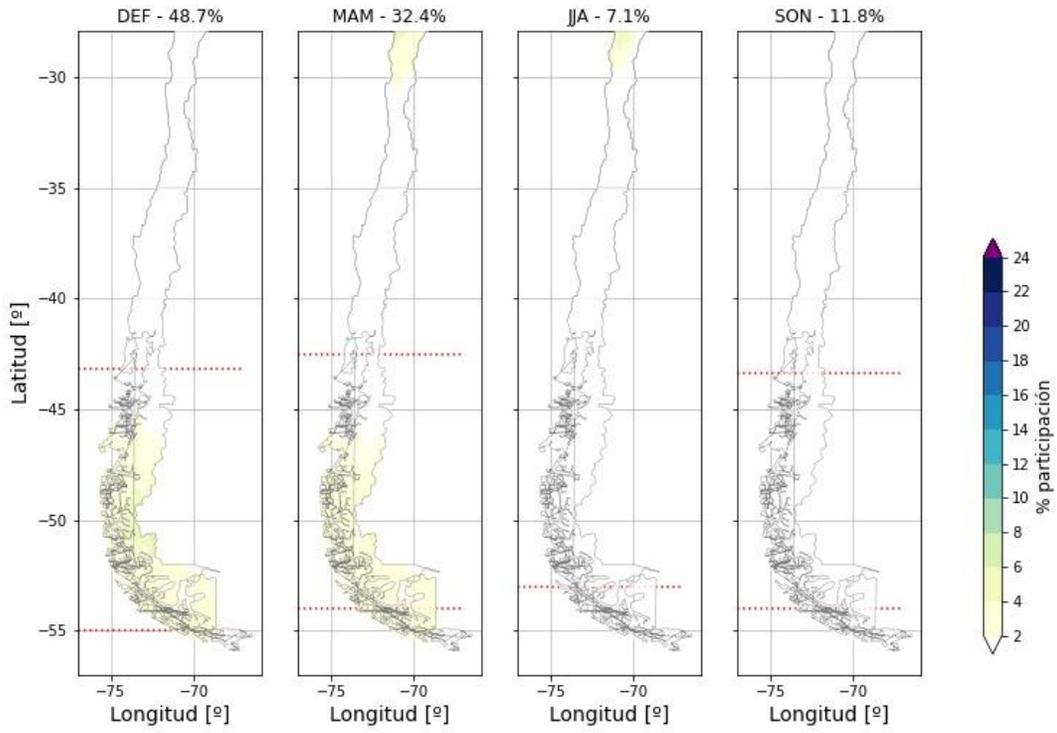


Figura 0.1. Frecuencia de días con tormenta según CR2MET (panel superior izquierdo) y porcentaje de aquellos días que está relacionado con cada mecanismo.

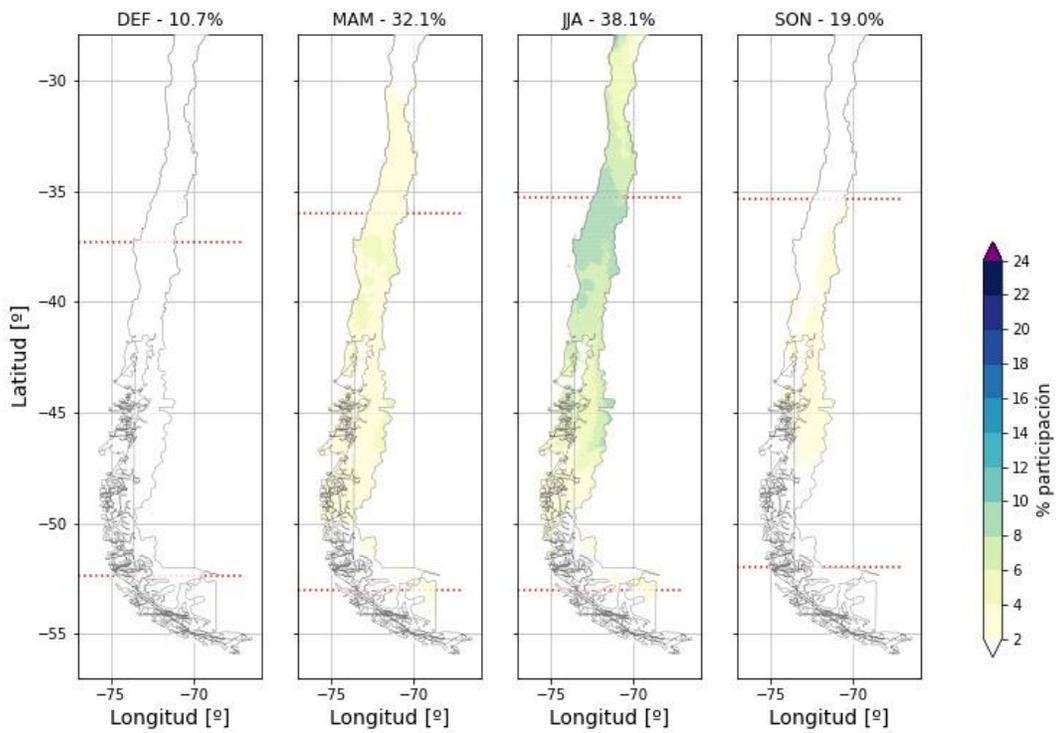
A.2 Contribuciones estacionales distribuidas espacialmente de cada mecanismo a la precipitación media anual



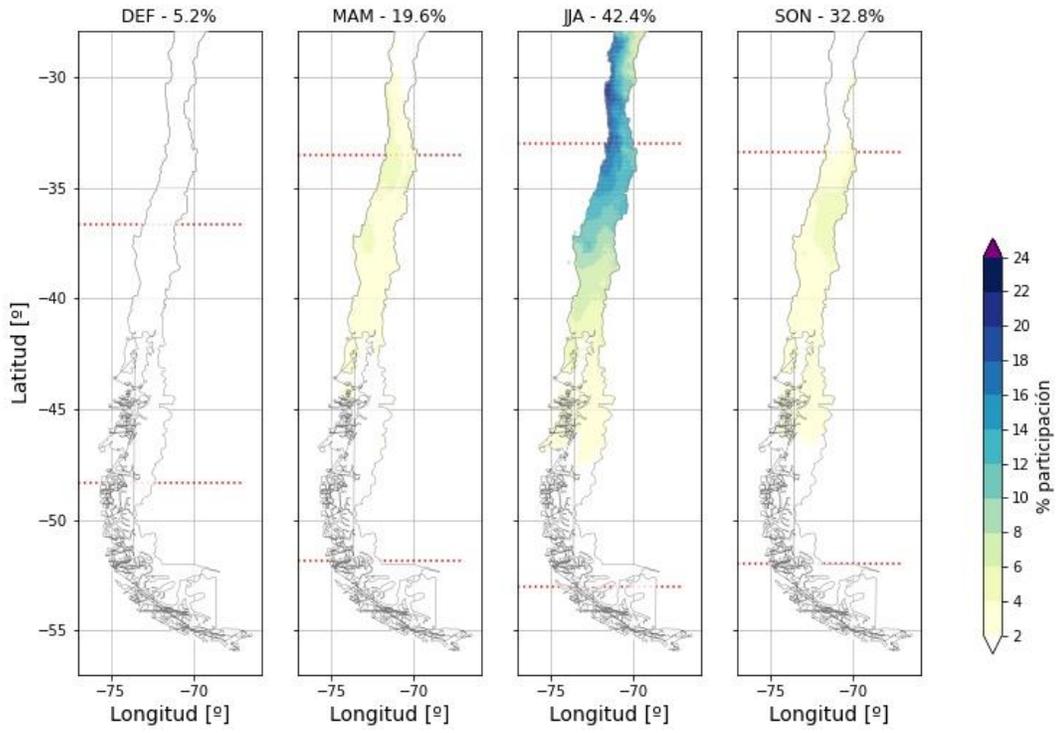
Engranaje



OR3



OR4 norte



OR4 sur

