



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Tesis presentada para obtener el grado académico de
Licenciada en Meteorología y Ciencias de la Atmósfera

*Análisis de la relación entre los sistemas
frontales y la precipitación extrema en el sur
de Sudamérica*

Téc. **Florencia Ilusión Solari**

Directora: Dra. Josefina Blázquez

Codirectora: Dra. Silvina Solman

La Plata, Buenos Aires, Argentina

Diciembre de 2020



“IT’S THE QUESTIONS WE CAN’T ANSWER THAT TEACHES US THE MOST. THEY TEACH US HOW TO THINK. IF YOU GIVE A MAN AN ANSWER, ALL HE GAINS IS A LITTLE FACT. BUT GIVE HIM A QUESTION AND HE’LL LOOK FOR HIS OWN ANSWERS. [...] THAT WAY, WHEN HE FINDS THE ANSWERS, THEY’LL BE PRECIOUS TO HIM.”

Patrick Rothfuss, *The Wise Man’s Fear*.

⚡

A Sybil y Zafira, no existen en este mundo mejores compañeras de estudio.

Resumen

En este trabajo de tesis, se analizó la relación entre los frentes y los eventos de precipitación extrema en el sur de Sudamérica, para el invierno extendido y la primavera extendida, en el período 1979-2017 a partir de datos diarios. La precipitación extrema se caracterizó a partir del percentil-95 y los frentes se identificaron por medio de un índice de frentes (FI) objetivo que combina características dinámicas (vorticidad ciclónica) y termodinámicas (gradiente de temperatura) propias de estos sistemas.

Se analizó el desempeño del índice FI y se encontró que en zonas con terreno elevado la eficiencia se ve comprometida por la existencia de gradientes de temperatura casi permanentes; se exploraron distintas condiciones para mejorar su rendimiento. La actividad frontal se encuentra confinada al sur de 20°S (latitudes medias) y su frecuencia de ocurrencia sobre el continente es cercana al 10 %, aunque tiene un desplazamiento estacional. Se caracterizó la precipitación extrema en cada estación y se evaluaron criterios de asociación entre la precipitación extrema y los frentes, encontrando que los resultados son robustos cuando se detecta la presencia de un frente (a través de FI) en al menos el 20 % de los puntos de retícula cercanos (120 km o menos) al evento de precipitación. Se encontró que en invierno, alrededor del 50 % de la precipitación extrema es frontal, mientras que en la primavera, el valor es cercano al 40 %; el porcentaje de precipitación total explicada por frentes tiene una distribución espacial similar, pero el porcentaje explicado es menor. Se analizaron las posibles características distintivas de los frentes que generan precipitación extrema (comparados con los frentes que generan precipitación) como potencial herramienta para el pronóstico de eventos extremos y se encontró que, aunque en promedio no hay mayores diferencias en el gradiente de temperatura, los frentes que producen precipitación extrema tienen una vorticidad ciclónica más intensa y están asociados con mayor humedad disponible.

Este trabajo se realizó en el marco de una “**Beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas**” del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN).

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
2. Datos y metodología	4
2.1. Datos	4
2.2. Metodología	4
2.2.1. Precipitación extrema	5
2.2.2. Índice de frentes (FI)	5
2.2.3. Anomalía de humedad específica.	6
3. Índice de frentes	7
4. Precipitación extrema frontal	11
5. Frentes forzantes de precipitación extrema	19
6. Conclusiones	24
Bibliografía	27

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El continente sudamericano tiene una gran extensión meridional y una compleja topografía -de la cual se destaca la Cordillera de los Andes, paralela a la costa oeste, y con una elevación superior a 4 km en la mayor parte de su extensión-, por lo que exhibe diversos patrones de tiempo y climáticos (Garreaud et al., 2009). En este continente ocurren varios tipos de perturbaciones transientes, tanto de origen tropical como extratropical, desde escala sinóptica y mesoescala hasta convección organizada y no organizada, siendo los frentes fríos el tipo de perturbación más frecuente sobre el continente (Satyamurty et al., 1998).

Los eventos de precipitación extrema son de gran importancia debido a su alto impacto económico y social. Las inundaciones, producto de la ocurrencia de estos eventos, representan uno de los impactos más relevantes, ya que pueden producir pérdidas materiales y humanas y afectar a una gran variedad de actividades, como la agricultura y la ganadería, el transporte, el turismo, y la generación y distribución de energía. Vörösmarty et al. (2013) evaluaron el riesgo por eventos extremos de precipitación e inundaciones en zonas rurales y urbanas de Sudamérica y determinaron que el factor que más contribuye al aumento del riesgo es el crecimiento poblacional en las áreas urbanas, en las cuales se duplicó el riesgo entre 1960 y 2000 debido al éxodo rural y el crecimiento rápido y con poca planificación de la infraestructura; sin embargo, de acuerdo a Vörösmarty et al. (2013), el impacto de otros factores, como el cambio y la variabilidad climática, contribuye (especialmente en décadas futuras) al aumento y la complejización del riesgo, el cual se da como una combinación de factores sociales y naturales .

Varios trabajos han estudiado, en los últimos años, el comportamiento de la precipitación extrema sobre diversas regiones de Sudamérica, encontrando -en general- que se produjo un aumento (disminución) de la precipitación extrema en las regiones en donde la precipitación media ha aumentado (disminuido) (Haylock et al., 2006; Penalba y Robledo, 2010; Wu y Polvani, 2017). Sobre la Cuenca del Plata, Re y Barros (2009) encontraron que, en las últimas décadas (1959-2002) la precipitación copiosa se volvió más frecuente y más intensa, aunque la significancia estadística de estas tendencias fue ambigua debido a que los índices sobre precipitación intensa que utilizaron tienen gran variabilidad, especialmente al trabajar con series temporales que fueron obtenidas, cada una, de un único registro pluviométrico; también conjeturaron que el aumento en la precipitación -que es más marcado en la precipitación abundante que en la total- podría deberse a un aumento en la humedad disponible (que es posible debido al aumento de temperatura, especialmente la temperatura mínima) y a una mayor inestabilidad atmosférica. Para la misma región y en un período similar (1961-2000), Penalba y Robledo (2010) encontraron que hay una tendencia positiva en la frecuencia de eventos de precipitación, aunque este aumento es más marcado para el total de días de precipitación (mayor a 0,1 mm) que para la precipitación extrema (percentil-75 de los días de precipitación). Por otro lado, Wu y Polvani (2017) analizaron factores no termodinámicos para explicar el aumento de la precipitación extrema en el sudeste de Sudamérica (SESA), y concluyeron que hay una fuerte relación entre este aumento y la disminución del ozono estratosférico. Haylock et al. (2006) evaluaron las tendencias (1960-2000) de precipitación a través de varios índices (referidos

a la frecuencia, el acumulado y la duración de eventos de precipitación total -mayor a 1 mm- y extrema) y encontraron resultados consistentes entre las distintas métricas a nivel regional, observando un aumento sobre el centro-norte de Argentina, Paraguay, Uruguay y sur de Brasil, y una disminución en el sur de Chile y el sudoeste de Argentina.

Los frentes son uno de los forzantes más importantes para la generación de precipitación, especialmente en latitudes medias (entre 30° y 60° de latitud, en ambos hemisferios). Los sistemas frontales provocan ascenso de aire, nubosidad, y posterior precipitación -dependiendo de las condiciones de estabilidad, disponibilidad de humedad, y otros factores- (Bjerknes y Solberg, 1922; Browning y Roberts, 1994; Lackmann, 2011). Simmonds et al. (2012) y Schemm et al. (2015) caracterizaron la actividad frontal a partir de distintas métricas y encontraron que, en el Hemisferio Sur, la máxima frecuencia de ocurrencia de frentes se da entre 40°S y 60°S. Para Sudamérica, Satyamurty et al. (1998) observaron (entre 40°S y 5°S) que ocurren pasajes frontales en todas las estaciones del año pero que la frecuencia de ocurrencia disminuye hacia latitudes más bajas.

Tradicionalmente, los frentes se trazan mediante el análisis manual (subjetivo) de distintas cartas meteorológicas, pero también pueden identificarse a partir de métodos automáticos (objetivos); la identificación objetiva de frentes basada en variables atmosféricas fundamentales que sean bien representadas por los modelos facilita la creación de climatologías de sistemas frontales (Hewson, 1998). Los criterios automáticos más utilizados (Hewson, 1998; Berry et al., 2011; Catto et al., 2012; Catto y Pfahl, 2013; Catto et al., 2014; Hope et al., 2014; Schemm et al., 2015; Dowdy y Catto, 2017) se basan en gradientes horizontales de variables termodinámicas que pueden contener información de la humedad (como la temperatura potencial equivalente y la temperatura potencial de bulbo húmedo), típicamente evaluadas en la superficie isobárica de 850 hPa, aunque recientemente han comenzado a utilizarse criterios dinámicos basados en cambios temporales del viento horizontal, comúnmente evaluado a 10 m o sobre el nivel de 850 hPa (Simmonds et al., 2012; Hope et al., 2014; Schemm et al., 2015; Rudeva et al., 2019); también existen criterios que combinan características dinámicas (como la vorticidad) y termodinámicas (como el gradiente de temperatura) para la detección de frentes (Solman y Orlanski, 2010; Solman y Orlanski, 2014; Blázquez y Solman, 2016; Blázquez y Solman, 2017; Parfitt et al., 2017), a los que se les puede agregar la humedad (Blázquez y Solman, 2018; Blázquez y Solman, 2019). Algunos autores (Berry et al., 2011; Hope et al., 2014; Schemm et al., 2015) agregan además una condición de longitud mínima, como 3 puntos de retícula adyacentes o 500 o 1000 km de extensión. Schemm et al. (2015) encontraron que existen discrepancias en la identificación de frentes según el criterio automático que se utilice -dependiendo si se basa en características dinámicas o termodinámicas-, especialmente en el Hemisferio Sur, en donde la posición de los frentes fríos identificados mediante la variación temporal del viento (criterio dinámico) se observa en latitudes más altas que en el caso de la identificación mediante la temperatura potencial equivalente (criterio termodinámico); estas diferencias se deben, en parte, a la posición de los *storm tracks* (recorrido de las tormentas) y, en parte, a que los índices diseñados a partir de características termodinámicas (como en Hewson, 1998) se corresponden mejor con las características sinópticas del Hemisferio Norte. Berry et al. (2011) observaron que existen fronteras reales en la temperatura potencial de bulbo húmedo -variable que se utiliza para detectar frentes- que no se deben a sistemas frontales, sino que son ocasionadas por zonas baroclínicas persistentes asociadas a cambios en el tipo de superficie o en la elevación del terreno (terreno con pendiente), pero no definieron algún procedimiento para evitar su detección o diferenciarlas de los sistemas frontales.

En los últimos años, diversos trabajos han estudiado la relación entre los frentes y la precipitación, como Catto et al. (2012), quienes encontraron que más del 90 % de la precipitación que ocurre en las principales regiones de *storm tracks* (recorrido de las tormentas) está asociada a sistemas frontales y que existe una variación regional y estacional en la proporción de precipitación asociada a estos sistemas; Blázquez y Solman (2018) también estudiaron la relación entre frentes y precipitación, encontrando que en latitudes medias entre el 40 % y el 60 % de la precipitación tiene forzante frontal, mientras que en algunas regiones (como entre 60°S y 70°S y en el sudeste de Sudamérica) superan el 60 %. Por otro lado, Solman y Orlanski (2014) documentaron que el corrimiento hacia el polo de la actividad frontal en el Hemisferio Sur es consistente con el secamiento en latitudes subtropicales y el aumento de la precipitación en latitudes medias, mostrando una relación entre los frentes y la precipitación. Recientemente, Blázquez y Solman (2016) y Blázquez y Solman (2017) analizaron cómo los

principales patrones de variabilidad de la circulación atmosférica en escalas intraestacional e interanual afectan la variabilidad de los frentes y, en consecuencia, las anomalías de precipitación en diversas regiones en el sur de Sudamérica. No obstante, la relación entre los sistemas frontales y la precipitación extrema no ha sido muy estudiada. Cavalcanti (2012) analizó eventos extremos de precipitación e inundaciones en el siglo XXI sobre el continente sudamericano y concluyó que, en muchos casos de precipitación extrema, las zonas frontales están presentes durante días, pero la mayor parte de esta precipitación ocurre en asociación a complejos convectivos de mesoescala que se encuentran acoplados a sistemas sinópticos; Hirata y Grimm (2016) y Hirata y Grimm (2017) estudiaron los eventos de precipitación extrema mediante anomalías sinópticas e intraestacionales y también concluyeron que en muchos casos son generados por perturbaciones sinópticas al este de los Andes -que avanzan hacia el norte o noreste del continente- asociadas con intensos sistemas frontales e incursiones de aire frío. A nivel global, Catto y Pfahl (2013) encontraron que los frentes son el mecanismo más importante -en latitudes medias- para explicar los eventos de precipitación extrema, pudiendo atribuírseles hasta el 90 % de estos eventos; esta relación no ha sido explorada en profundidad en el sur de Sudamérica.

1.2. Objetivos

Dada la compleja topografía del continente sudamericano y la falta de estudios a nivel regional, el objetivo general de este trabajo es estudiar la relación entre los sistemas frontales y la ocurrencia de eventos de precipitación extrema sobre el sur de Sudamérica. Dentro del planteo general se abordan cuatro objetivos específicos:

1. Revisar y optimizar la detección automática de frentes y caracterizar la actividad frontal en el sur de Sudamérica.
2. Caracterizar la precipitación extrema en el sur de Sudamérica para distintas estaciones del año.
3. Explorar la proporción de precipitación extrema asociada a frentes en distintas estaciones del año.
4. Analizar las características distintivas de los frentes que generan precipitación extrema (magnitud del gradiente de temperatura, intensidad de la vorticidad ciclónica, humedad disponible).

Esta tesis se encuentra organizada en capítulos: en el capítulo 2 se describen los datos y metodologías (generales) utilizados; en el capítulo 3 se explora y refina la identificación de frentes, culminando en una caracterización estacional de los mismos (objetivo específico 1); en el capítulo 4 se caracteriza la precipitación extrema (objetivo específico 2) y se analiza su relación con los sistemas frontales (objetivo específico 3); en el capítulo 5 se analizan las características distintivas de los frentes que generan precipitación extrema (objetivo específico 4); por último, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas en el presente trabajo.

Capítulo 2

Datos y metodología

2.1. Datos

La región de estudio considerada en el presente trabajo abarca el sur de Sudamérica, entre las longitudes 33°O a 83°O y las latitudes 10°S a 60°S. El período considerado se extiende desde 1979 hasta 2017, lo que significa un total de 39 años, por lo que este estudio tiene relevancia climatológica. Se utilizan datos diarios, en puntos de retícula, pertenecientes a dos bases de datos distintas, según las variables consideradas.

Los datos de precipitación diaria acumulada provienen de la base de datos *CPC Global Unified Precipitation* de la NOAA/OAR/ESRL (Xie et al., 2010) y cuentan con una resolución horizontal de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, únicamente sobre masas continentales (no se cuenta con datos sobre los océanos).

Se utilizan también datos de ERA5 (Urraca et al., 2018; Hersbach et al., 2020), que es la quinta generación de reanálisis del *European Centre of Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)*. Esta base de datos cuenta con una alta resolución espacial ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$) y temporal (datos horarios). En este trabajo se utilizan datos diarios -calculados como la media diaria de los datos horarios- dado que, por un lado, carece de sentido trabajar con una resolución temporal tan alta siendo que el objetivo es relacionarlos con datos diarios de precipitación, por lo que esta mayor resolución en los datos de ERA5 no se traduce en un mejor detalle sobre los sistemas frontales precipitantes; por el otro, el costo computacional aumenta rápidamente, y no se dispone de los recursos necesarios para manejar el volumen de datos que implicaría el aumento de la resolución temporal. Se utilizan cuatro variables meteorológicas en la superficie isobárica de 850 hPa: temperatura, componentes zonal y meridional del viento, y humedad específica. También se utilizan datos sobre la elevación del terreno, medida como geopotencial (unidad empleada en la base de datos de ERA5).

La resolución horizontal de los datos de ERA5 es 4 veces más alta que la de los datos de precipitación; sin embargo, todos los puntos de retícula del campo de precipitación coinciden con algún punto de retícula de las otras variables. Debido a esto, y considerando que al relacionar la precipitación con los frentes no se trabaja “punto a punto” sino en un entorno cercano a cada punto, no resulta necesario unificar las resoluciones horizontales de las dos bases de datos. Por consiguiente, puede trabajarse con la resolución espacial nativa de cada base de datos sin perder información ni generar datos interpolados, manteniendo la calidad de los datos y evitando una posible fuente de ruido o error.

2.2. Metodología

Se trabaja con dos estaciones del año: invierno extendido o MJJA (mayo, junio, julio, agosto) y primavera extendida o SOND (septiembre, octubre, noviembre, diciembre). Según Blázquez y Solman (2018), el invierno extendido es el período en cual se espera que la relación entre frentes y precipitación sea más fuerte. En la primavera extendida, si bien se espera que la importancia relativa de los frentes disminuya debido al aumento en la ocurrencia de otros forzantes para la precipitación -como los forzantes térmicos-, se espera que la precipitación

acumulada sea mayor. Los análisis realizados para cada estación son independientes, aunque siguen la misma metodología.

2.2.1. Precipitación extrema

Se define como día de precipitación a aquellos días en los que el acumulado diario es mayor o igual a 1 mm. Se calculan, en cada punto de retícula y para cada estación, los percentiles 95 y 99 del acumulado diario, considerando únicamente las series temporales conformadas por los días de precipitación (mayor a 1 mm). Estas series tienen distinta longitud, debido a que la cantidad de días de precipitación no es necesariamente igual en cada punto de retícula. En esto difiere de otros trabajos, como Catto y Pfahl (2013), que consideran los ceros como parte de las series de precipitación, por lo que todas las series tienen la misma longitud; sin embargo, aunque pueda resultar conveniente tener la misma cantidad de elementos en cada serie, en otros aspectos se caracteriza mejor la variable considerando solo los días de precipitación, dado que los percentiles calculados refieren únicamente a los acumulados mayores a 1 mm/día, en lugar de obtenerse un valor más bajo debido a la inclusión de los ceros y valores traza (menores a 1 mm). La precipitación extrema se define estadísticamente, en cada punto, como aquella que supera el umbral dado por el percentil correspondiente; en este caso, luego de analizar las dos opciones (percentiles 95 y 99 de los días de precipitación), se decide utilizar el percentil-95 ya que con el percentil-99 la cantidad de días con precipitación extrema resulta muy escasa. Con esta definición puede verse la utilidad de definir el extremo a partir de series de días de precipitación, ya que los valores más grandes de precipitación acumulada así como la cantidad de días de precipitación extrema se obtienen en referencia al total de precipitación y no al total de días del período analizado.

2.2.2. Índice de frentes (FI)

Los frentes son caracterizados de manera objetiva mediante un índice que combina dos características fundamentales de estos sistemas de latitudes medias: la vorticidad ciclónica y el contraste térmico. El índice FI se calcula, en el nivel de 850 hPa, de acuerdo a Solman y Orlanski (2010) como

$$FI = -\zeta * |\nabla T| > 0 \quad (2.1)$$

donde ζ es la vorticidad relativa y $|\nabla T|$ es el módulo del gradiente de temperatura. Dado que solo se consideran los casos en los que la vorticidad relativa es ciclónica, y que esta es negativa en el Hemisferio Sur, se agrega el factor -1 en la ecuación 2.1, de modo que FI resulte siempre positivo. Es importante notar que este índice representa tanto aspectos dinámicos (a través de la vorticidad) como termodinámicos (gradiente de temperatura) de los sistemas frontales.

Para calcular los dos factores de FI se computan primero las anomalías zonales de temperatura y de las componentes zonal y meridional del viento, lo que permite resaltar los patrones de onda de los sistemas meteorológicos. Luego se calcula la componente vertical del rotor de la anomalía zonal de viento horizontal (vorticidad relativa) y el módulo del gradiente de la anomalía zonal de temperatura, mediante diferencias finitas centradas, empleando coordenadas esféricas. Las ecuaciones empleadas son las siguientes:

$$|\nabla T| = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \approx \left[\left(\frac{\Delta T_{y=cte}}{\Delta \lambda * R_T * \cos(\phi)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{x=cte}}{\Delta \phi * R_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{\Delta v_{y=cte}}{\Delta \lambda * R_T * \cos(\phi)} - \frac{\Delta u_{x=cte}}{\Delta \phi * R_T} \quad (2.3)$$

donde λ , ϕ son, respectivamente, la longitud y la latitud -medidas en radianes-, R_T es el radio medio terrestre (el valor utilizado es $6,37 * 10^3 km$), u y v representan la anomalía zonal de las componentes zonal y meridional del viento, y T es la anomalía zonal de temperatura. Se agrega una cota mínima para el gradiente de temperatura ($|\nabla T| \geq 1^\circ C/100km$), siguiendo a Blázquez y Solman (2018), para eliminar los contrastes térmicos suaves que no

se corresponden con los sistemas frontales, y otra para la vorticidad ($|\zeta| \geq 5 * 10^{-6} s^{-1}$), para que sus valores no sean menores que el orden de magnitud de la vorticidad relativa en escala sinóptica.

Este índice de frentes, o versiones muy similares al mismo, ha demostrado su eficacia en la identificación de frentes a nivel hemisférico en varios trabajos de la última década, como Solman y Orlanski (2010), Solman y Orlanski (2014), Blázquez y Solman (2016), Blázquez y Solman (2017), Blázquez y Solman (2018), Blázquez y Solman (2019) y Parfitt et al. (2017).

La frecuencia de ocurrencia de frentes se calcula, para cada punto, como la cantidad de días en los que $FI > 0$ sobre la cantidad total de días, es decir, cantidad de días en los que hubo frente sobre cantidad de días en la estación considerada (4797 días en MJJA, 4758 días en SOND).

2.2.3. Anomalía de humedad específica.

Se utiliza la humedad específica en 850 hPa como medida de la humedad disponible para los frentes que producen precipitación, permitiendo explorar las características distintivas de los sistemas frontales que producen precipitación extrema. Para eliminar la fuerte dependencia meridional de la humedad específica, se calcula su anomalía respecto de la media climatológica mensual. Esto es, se calcula para cada punto de retícula un único valor medio por mes para el período de estudio, y luego se le resta a cada valor diario la media correspondiente. En este caso, se trabaja con medias mensuales, en lugar de medias estacionales, debido a la gran variabilidad en la humedad específica a lo largo del año.

Capítulo 3

Índice de frentes

Antes de relacionar la precipitación extrema con los sistemas frontales, es necesario explorar y refinar la caracterización de estos sistemas a través del índice de frentes FI (descrito en la sección 2.2.2) debido a la compleja topografía que presenta el continente sudamericano y siendo que en trabajos anteriores sobre la identificación objetiva de sistemas frontales no se ha focalizado sobre esta región de estudio ni utilizado datos con tan alta resolución espacial.

Como primera aproximación, se calcula FI en el nivel de 850 hPa, solo para aquellos puntos en los cuales este nivel no se encuentre por debajo de la superficie terrestre, dado que carece de sentido físico evaluar parámetros atmosféricos por debajo de la superficie. Para esto, considerando la altura típica del nivel de 850 hPa, se enmascaran los puntos en los que la altura del terreno es mayor a $15000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\sim 1500 \text{ m}$) antes de calcular la vorticidad y el gradiente de temperatura.

Al analizar la frecuencia de ocurrencia de frentes (Fig. 3.1), se observa que, en ambas estaciones, existen regiones en las cuales la frecuencia supera el 50 % (en la figura 3.1 se muestra solo hasta el 30 %), lo que sería equivalente a que ocurra, en promedio, un frente cada dos días. Estos valores exceden ampliamente una probable cota máxima de 33 % (un frente cada tres días) obtenida de observaciones de sistemas frontales (Satyamurty et al., 1998); una frecuencia tan alta no parece una adecuada representación de la actividad frontal. Estas regiones se encuentran inmediatamente alrededor de la porción más alta de la Cordillera de los Andes, sobre pequeñas áreas en el oeste de la Patagonia, y en líneas paralelas a la costa este de Brasil; resulta llamativo observar frecuencias tan elevadas en zonas tropicales, siendo que los frentes son sistemas típicos de latitudes medias, y también la abrupta variación espacial y la focalización en pequeñas regiones, dado que los frentes tienen una escala longitudinal típica de 1000 km y resulta extraño pensar en fluctuaciones no graduales en su ocurrencia.

A fin de indagar sobre estos resultados, se calcula la frecuencia de ocurrencia de los dos factores de FI, es decir, la vorticidad ciclónica ($\zeta < 0$, acotada por $|\zeta| \geq 5 * 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) y el módulo del gradiente de temperatura, siempre que sea mayor o igual a $1^\circ\text{C}/100\text{km}$. Para este último (Fig. 3.2) se observa que su frecuencia de ocurrencia en las regiones con mayor cantidad de días con frente supera el 60 %, alcanzando el 90 % en algunos puntos, mientras que en el resto del área de estudio los valores son cercanos al 20 %. Es evidente que este comportamiento no puede ser explicado exclusivamente por la ocurrencia de frentes; entonces, en estas regiones, el gradiente de temperatura -casi permanente- no es adecuado para discernir frentes, dado que -según la definición utilizada- alcanza con que la vorticidad sea ciclónica para que se considere que hay un frente ($\text{FI} > 0$). Para la vorticidad ciclónica (figura no mostrada), el comportamiento es semejante al del gradiente de temperatura en la delimitación espacial: en las regiones en las que es muy frecuente que el gradiente de temperatura sea intenso resulta que la ocurrencia de vorticidad ciclónica es o muy frecuente o muy infrecuente mientras que la frecuencia de ocurrencia en el resto del dominio es cercana al 50 % (salvo en el Pacífico Este, alrededor de 30°S , donde los valores bajos en la frecuencia podrían estar asociados a la presencia del anticiclón semipermanente). La comparación de estos campos con la elevación del terreno (Fig. 3.3) revela que la distribución de estas regiones no es azarosa, sino que coincide con las zonas de mayor elevación del terreno (por debajo de $15000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$), sugiriendo una fuerte

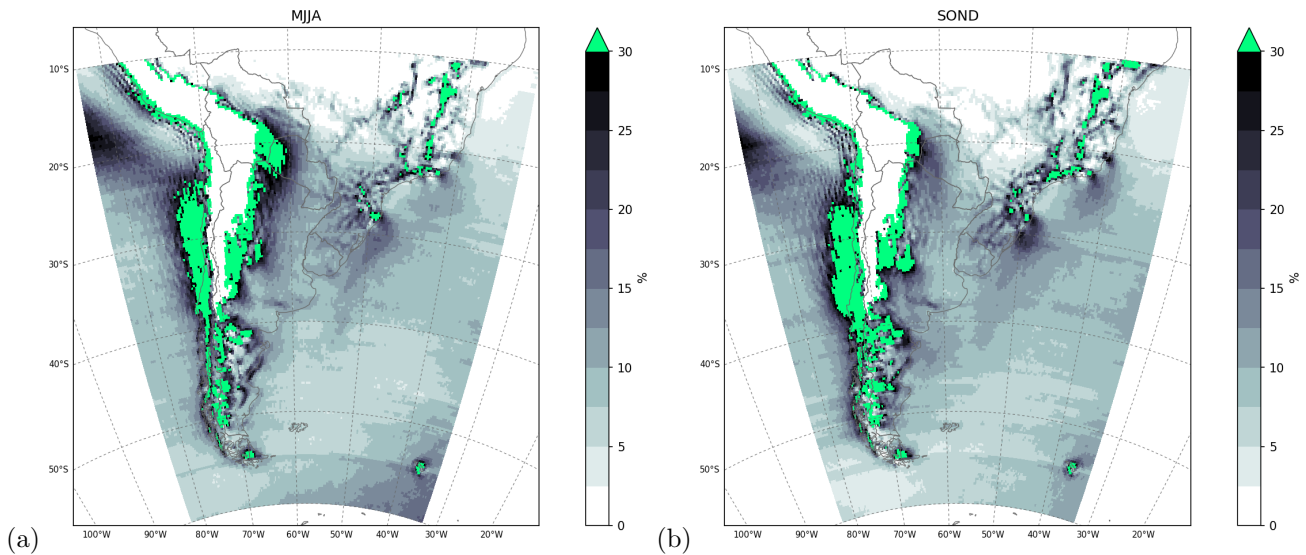


Figura 3.1: Frecuencia (%) de ocurrencia de frentes para (a) MJJA, (b) SOND.

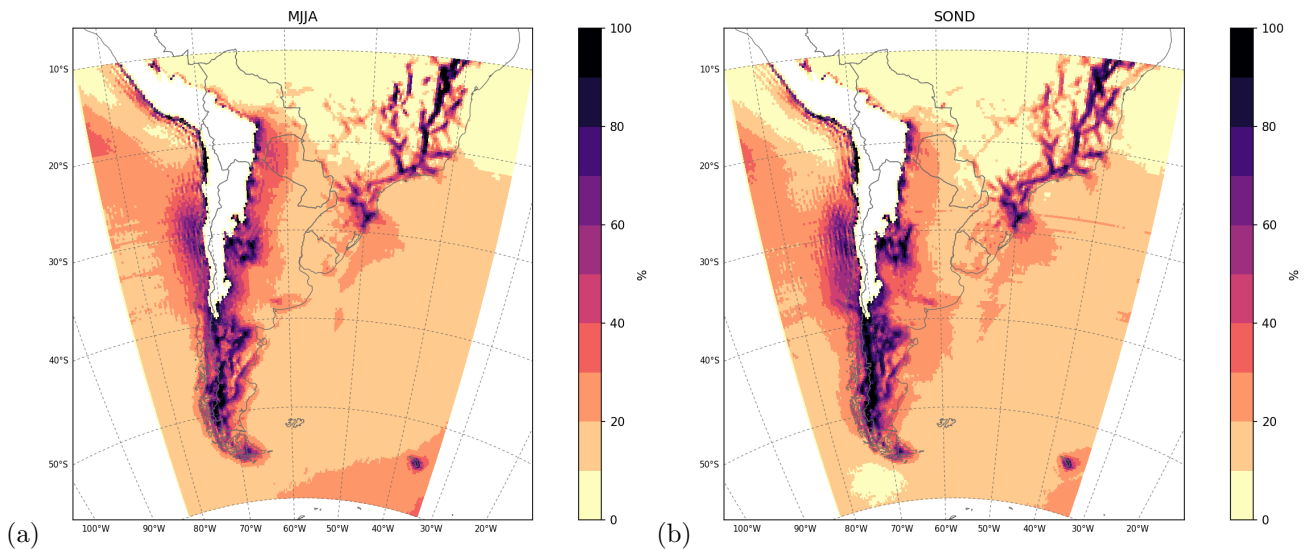


Figura 3.2: Frecuencia (%) de días con $|\nabla T| \geq 1^\circ/100km$ para (a) MJJA, (b) SOND.

relación entre la topografía y los factores de FI, especialmente el gradiente de temperatura.

Es evidente que a partir de cierta altura, la influencia del terreno sobre el nivel de 850 hPa no es despreciable y la ocurrencia simultánea de vorticidad ciclónica y un gran contraste térmico no necesariamente representa un sistema frontal. Para evitar este problema, se recalculan los dos factores de FI imponiendo una condición más exigente para la elevación del terreno; ya no alcanza con que los puntos considerados no se encuentren por debajo del nivel del suelo, sino que además deben encontrarse lo suficientemente alejados de la superficie. La comparación entre la frecuencia de gradientes intensos ($|\nabla T| \geq 1^\circ C/100km$) (Fig. 3.2) y la topografía (Fig. 3.3) sugiere que la altura máxima del terreno (para que no afecte las variables atmosféricas) debe ser entre $5000 m^2s^{-2}$ y $10000 m^2s^{-2}$ (500 m y 1000 m, aproximadamente). Debe encontrarse un balance entre no considerar regiones en las que la influencia del terreno es notable y no eliminar demasiados puntos para no achicar efectivamente el área de estudio. Finalmente, se opta por el valor de $8000 m^2s^{-2}$ ($\sim 800 m$), y todos los puntos cuya elevación sea mayor a este umbral se enmascaran antes de calcular la vorticidad y el gradiente de temperatura.

Si bien esta nueva condición mejora el resultado (figura no mostrada), especialmente sobre la Patagonia y el este de Brasil, al quedar fuera de los puntos considerados los máximos relativos en la frecuencia sobre estas regiones -que tienen un gran cantidad de falsos positivos debido a la topografía-, aún siguen existiendo frecuencias muy altas alrededor de la Cordillera de los Andes. Entonces, se propone una condición adicional

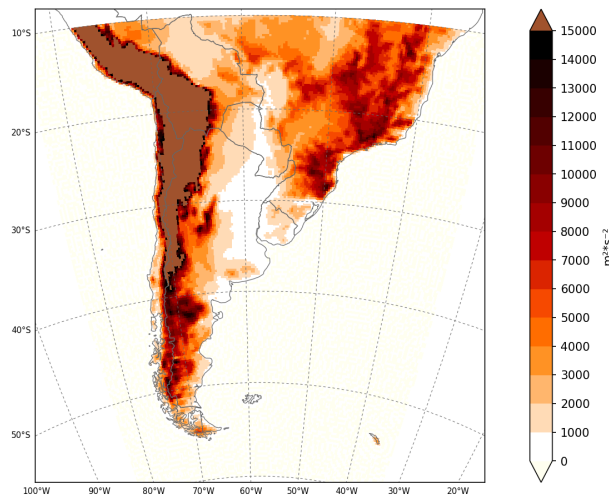


Figura 3.3: Elevación del terreno medido como geopotencial. Las unidades son m^2s^{-2} .

para distinguir frentes de otros factores. Dado que los frentes son fenómenos transientes, es muy poco probable que en un mismo punto se registre la ocurrencia de estos sistemas durante varios días seguidos; podría darse el caso de sistemas cuasi-estacionarios y/o un pasaje frontal en dos días consecutivos, pero más allá de esto, solo en alguna situación muy particular -y poco representativa de la climatología en general- podrían ocurrir varios frentes consecutivos temporalmente. Por lo tanto, se agrega la condición de no-persistencia para definir la ocurrencia de frentes, definiendo como persistencia a la ocurrencia -en un mismo punto de retícula- de un sistema frontal ($FI > 0$) durante más de 3 días consecutivos; si esto sucede, se descartan todos los días que forman parte del período persistente. En particular, la condición de no-persistencia disminuye la frecuencia de días con $FI > 0$ en las regiones aledañas a la Cordillera de los Andes. Si bien utilizando este criterio es posible que ocurran falsos negativos, queda asegurado que los frentes considerados se encuentran aislados temporalmente, es decir, no persisten por más de 3 días.

Con estas dos condiciones (no-persistencia y restricción de altura) los resultados mejoran notablemente en las regiones anteriormente mencionadas y no se observan mayores cambios en el resto del dominio (ver Fig. 3.4). Esto último muestra que, lejos de las regiones con terreno elevado, el índice de frentes FI es un buen descriptor de la actividad frontal. Se explora además una tercera condición para eliminar los puntos aislados, dado que los frentes tienen una escala longitudinal típica de 1000 km y una escala transversal de aproximadamente 100 km (Bluestein, 1993; Lackmann, 2011), por lo que no resulta representativo de un sistema frontal la existencia de pocos puntos aislados con $FI > 0$. Aunque esta condición actúa como filtro, disminuyendo levemente la frecuencia en casi todo el dominio (figura no mostrada), pero principalmente alrededor de la cordillera, se considera que es más la manipulación de los datos y la complejización del análisis que lo que aporta en términos de reducción de falsos positivos, por lo que finalmente se decide no implementarla en subsiguientes análisis.

En relación con otros trabajos, como Berry et al. (2011) y Catto et al. (2014) que utilizan parámetros termodinámicos para la identificación automática de frentes en la superficie isobárica de 850hPa, o Blázquez y Solman (2018), que utilizan una versión modificada de FI que incluye humedad en este mismo nivel, se observa que, en primer lugar, los valores de frecuencia de ocurrencia de frentes encontrados en este trabajo son similares en magnitud. En segundo lugar, en estos trabajos se encuentra un máximo relativo en la frecuencia en el sudeste de Brasil ($55^\circ O$, $28^\circ S$) que no se observa en la figura 3.4, dado que esta región la elevación del terreno es mayor a $8000 m^2s^{-2}$ ($\sim 800 m$), por lo que los puntos no fueron considerados para el análisis; se puede dudar entonces acerca de si este máximo refleja realmente una mayor ocurrencia de frentes o si es un efecto espurio causado por la influencia del terreno en las variables termodinámicas. Aunque los datos empleados, su resolución, y los períodos considerados no necesariamente coinciden, puede verse en estos trabajos que alrededor de las zonas enmascaradas por la elevación del terreno, la frecuencia también es muy alta, mostrando una vez más que la identificación automática de sistemas frontales mediante parámetros termodinámicos (combinados o no con

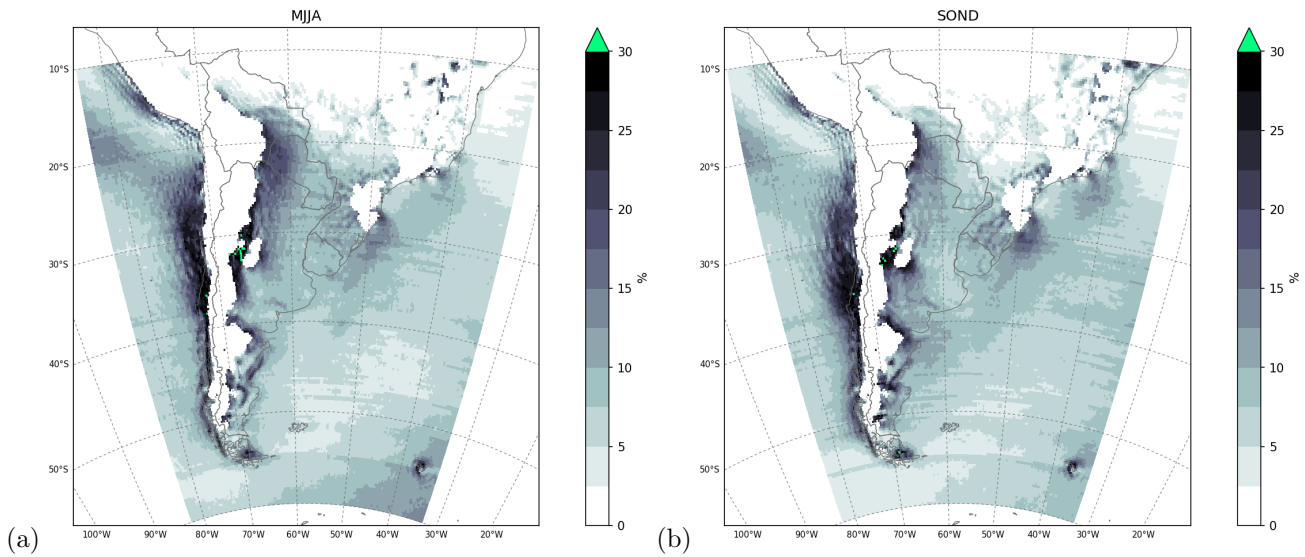


Figura 3.4: Frecuencia (%) de ocurrencia de frentes no-persistentes para (a) MJJA, (b) SOND.

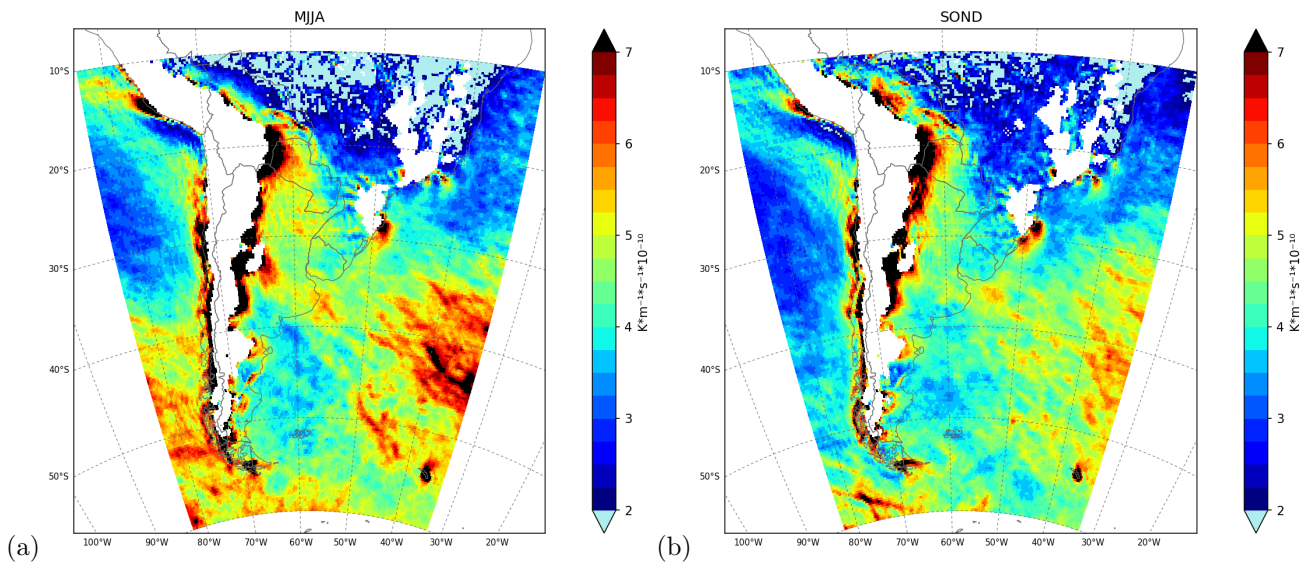


Figura 3.5: Media del índice de frentes (FI) para (a) MJJA, (b) SOND. Las unidades son $Km^{-1}s^{-1} * 10^{-10}$.

otros factores) se ve fuertemente influenciada por la topografía a partir de cierto punto, y respaldando el uso de una condición más restrictiva en cuanto a las máscaras sobre los datos por elevación del terreno.

Por último, se calcula la media estacional de FI (en cada punto, solo para los días con $FI > 0$) luego de haber incorporado las dos restricciones planteadas, completando la caracterización de la actividad frontal en Sudamérica. En general, se observa (Fig. 3.5) que la media de FI es mayor en invierno (MJJA) que en primavera (SOND), pero los patrones espaciales son similares. Se distinguen dos mínimos relativos, uno en el Pacífico Este (entre $20^{\circ}S$ y $40^{\circ}S$), probablemente relacionado con el anticiclón semipermanente, y otro en el Mar Argentino. Se observan valores elevados en regiones costeras y al pie de la cordillera, causadas por grandes contrastes térmicos y vorticidad intensa. Al norte de $20^{\circ}S$, se encuentran los menores valores. En cuanto a la frecuencia (Fig. 3.4), los valores sobre el continente rondan el 10% en ambas estaciones, estando limitado su alcance sobre el continente al sur de $20^{\circ}S$, lo que concuerda con su característica de sistemas de latitudes medias. Comparando el invierno con la primavera, se observa que disminuye el alcance meridional en esta última, y la frecuencia disminuye (aumenta) en el centro-norte (sur) del país. Dado que este índice es particularmente bueno para captar frentes fríos (Solman y Orlanski, 2014), estas dos características pueden ser explicadas por el desplazamiento meridional de los sistemas meteorológicos siguiendo al hemisferio de verano (Peixoto y Oort, 1992; Salby, 2012).

Capítulo 4

Precipitación extrema frontal

Para conocer la relación entre la precipitación extrema y los sistemas frontales se recurre a la definición de extremo, que en este trabajo se calcula, para cada estación (MJJA, SOND), a partir del umbral estadístico delimitado por el percentil-95, considerando únicamente los días en los que la precipitación acumulada diaria resulta mayor o igual a 1 mm (la metodología se describe en detalle en la sección 2.2.1).

En la distribución espacial de la precipitación extrema se observa que los valores más altos del percentil-95 (Fig. 4.1) se dan en el sudeste de Sudamérica (SESA) en ambas estaciones, aunque son mayores en la primavera (SOND). También se observan valores bajos en la Patagonia y sobre los Andes centrales, delimitando así la diagonal árida de América del Sur (Bruniard, 1982; Garreaud et al., 2009), mientras que en la costa chilena, al sur de 30°S, los valores son mayores, especialmente en invierno. En el noroeste argentino y al norte de 20°S en Brasil, los valores son bajos en el invierno, pero aumentan considerablemente en la primavera. La distribución espacial del percentil-95 concuerda con lo hallado por Hirata y Grimm (2017) para ambas estaciones, pero los valores encontrados difieren dado que en el presente trabajo no se consideran los días con precipitación acumulada menor a 1 mm, resultando en valores más altos para el percentil-95, que permiten una mejor distinción de eventos extremos.

Otra medida importante para la caracterización de la precipitación extrema es la cantidad de días en los que el acumulado diario excede al percentil-95 (Fig. 4.2). Como se consideran únicamente los días con acumulado diario mayor o igual a 1 mm, la cantidad de días con precipitación extrema representa menos del 2,5 % del total de días de cada estación (4797 días para MJJA y 4758 días en SOND). A grandes rasgos, se observa que las regiones con mayor (menor) cantidad de días extremos coinciden con las regiones en las cuales el valor del percentil-95 es más alto (bajo), para ambas estaciones. En la porción más austral del continente se observan pocos días (menos de 40 días, representan el 0,8 % del total de días de cada estación) con precipitación extrema, salvo en la costa oeste. Durante el invierno, esta cantidad aumenta hacia el noreste, con un máximo relativo (alrededor de 80 días, equivalente al 1,7 %) en SESA, mientras que durante la primavera los mayores valores (más de 120 días o 2,5 %) se encuentran sobre la porción tropical de Brasil, aunque también se observan valores altos (60 días o más, correspondientes al 1,3 %) en todo el centro-norte de Argentina.

Para relacionar la precipitación extrema con los sistemas frontales y determinar, para cada evento, si el forzante es frontal o no, se utiliza un criterio de proximidad espacial: si en las proximidades de los puntos en los cuales se registra precipitación acumulada existe también un frente, entonces se considera que este es el forzante, caso contrario, se considera que la precipitación extrema no es frontal; el significado de la cuantificación de proximidad debe definirse de manera explícita e inequívoca. Los sistemas frontales son caracterizados a través del índice de frentes FI con la condición de no-persistencia (capítulo 3); la ventaja de utilizar esta condición reside en que, dado que considera todos los puntos en los que $FI > 0$ se debe a un sistema frontal -aunque puedan haber sido eliminados erróneamente algunos casos-, se obtiene una cota mínima para la precipitación extrema explicada por frentes, mientras que de no utilizarse la condición, los puntos con $FI > 0$ podrían deberse efectivamente a frentes así como también a otras causas (falsos positivos), y como no es posible distinguir entre ambos (sin hacer uso de la condición), el valor calculado para el porcentaje de precipitación extrema frontal

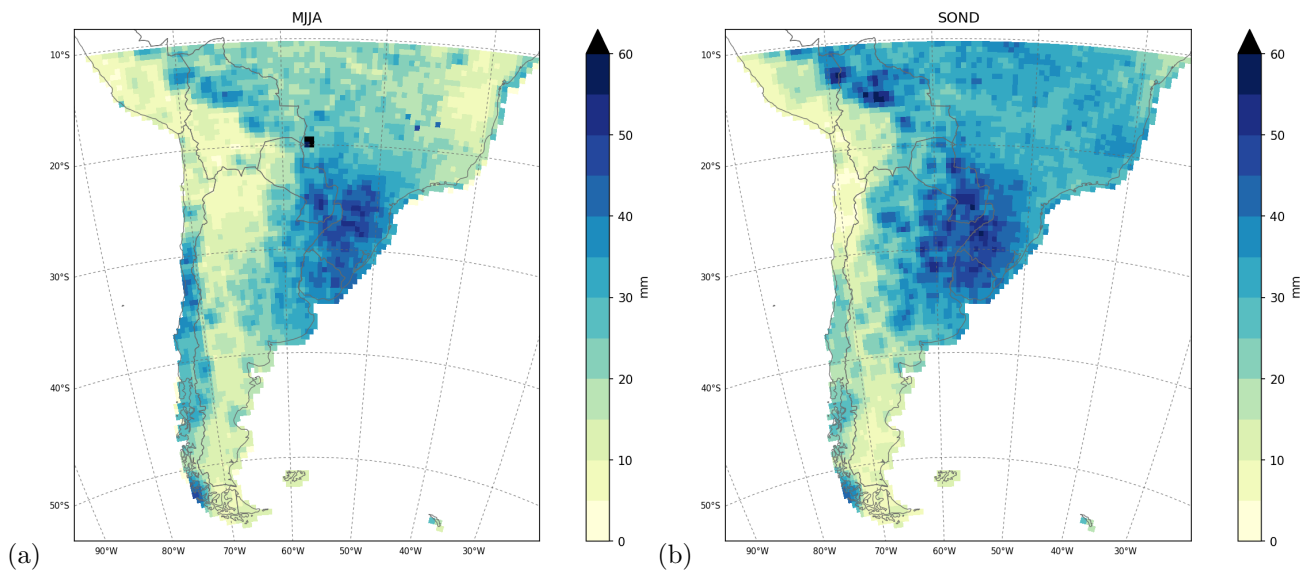


Figura 4.1: Percentil-95 de la precipitación acumulada diaria mayor o igual a 1 mm para (a) MJJA, (b) SOND. Las unidades son milímetros de precipitación (mm).

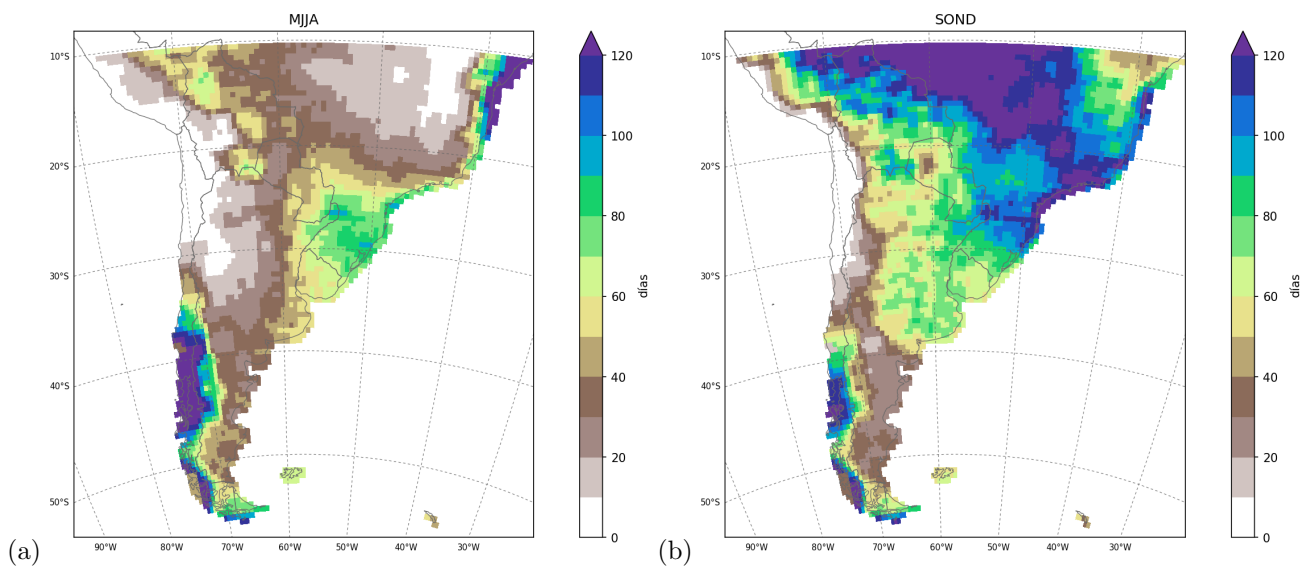


Figura 4.2: Cantidad total de días con precipitación extrema para (a) MJJA, (b) SOND. La duración del periodo considerado es de 4797 días para MJJA y 4758 días en SOND.

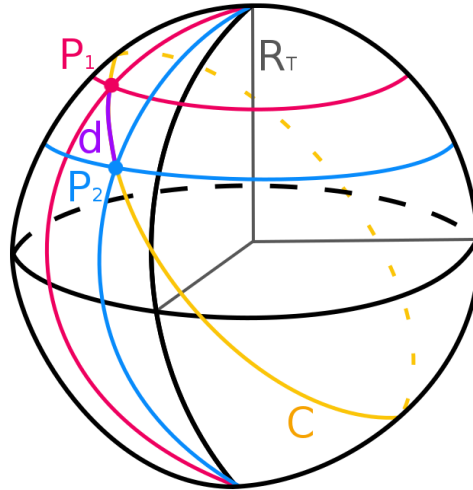


Figura 4.3: Esquema de los elementos de la ecuación 4.1. R_T es el radio de la esfera, C es el círculo máximo que pasa por los puntos $P_1 (\lambda_1, \phi_1)$ y $P_2 (\lambda_2, \phi_2)$, y d es el segmento de arco de C que une los puntos P_1, P_2 . La mínima distancia entre P_1, P_2 está dada por d .

supera al real, pero se desconoce en qué medida.

A diferencia de otros trabajos (Catto et al., 2012; Catto y Pfahl, 2013; Dowdy y Catto, 2017; Blázquez y Solman, 2018; Blázquez y Solman, 2019) en los que la asociación se realiza buscando la presencia de frentes dentro de una “caja” centrada en el punto de precipitación, en el presente trabajo se utiliza una medida más orgánica que resulta invariable con el cambio de latitud. El problema con utilizar una “caja” de $n * n$ puntos de retícula (con n impar) reside en que, si la grilla es regular en cuanto a la separación en grados, estos puntos no se encuentran equiespaciados, dado que la distancia entre dos puntos sobre un mismo paralelo (separados por la misma amplitud en grados) disminuye en la medida que aumenta la distancia al ecuador. Por ejemplo, la distancia entre dos meridianos en el ecuador se reduce a la mitad en 60°S . Entonces, la distancia máxima a la cual puede encontrarse un frente para que sea asociado con el punto de precipitación disminuye ampliamente con la latitud -salvo que el frente se encuentre sobre el mismo meridiano que la precipitación, dado que en el eje meridional no hay cambios en la distancia para una misma amplitud en grados-, por lo que dos configuraciones espaciales frente-precipitación idénticas podrían no resultar clasificadas de la misma manera dependiendo de la latitud. Como solución, y dado que la alta resolución espacial de los datos empleados permite una distinción más fina de las distancias consideradas, se utiliza un criterio geométrico basado en la distancia física a un punto central -el punto de retícula en el que se registra precipitación extrema- y no en una cantidad fija de puntos de retícula. La distancia considerada es la mínima distancia entre dos puntos sobre una esfera, que es equivalente al segmento de círculo máximo que pasa por ambos puntos, por lo que el recorrido se realiza sobre la superficie de la esfera. Esta distancia puede ser calculada mediante la fórmula de semiverseno (Sinnott, 1984):

$$d = 2 * R_T * \arcsin \left[\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) * \cos(\phi_2) * \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right] \quad (4.1)$$

donde d es la distancia entre dos puntos ubicados sobre la superficie de una esfera, R_T es el radio de la esfera -el radio medio terrestre, donde se utiliza como valor $6,37 * 10^3 \text{km}$ al igual que en la sección 2.2.2-, $\lambda_1, \lambda_2, \phi_1, \phi_2$ son las longitudes y las latitudes, respectivamente (ver Fig. 4.3).

Es necesario definir la máxima distancia D a la que puede encontrarse un frente ($FI > 0$) de un punto con precipitación para que esta sea considerada como precipitación frontal. Se realizan pruebas con distintos valores

de D , calculando el porcentaje de precipitación extrema frontal sobre el total de precipitación extrema, en las cuales el numerador puede cambiar según sea la distancia considerada. Se observa (figura no mostrada) que el porcentaje de precipitación extrema frontal aumenta a medida que aumenta la distancia máxima, duplicándose con la duplicación de la distancia D . Esta elevada sensibilidad respecto de la distancia elegida no permite realizar un buen análisis al depender arbitrariamente del valor elegido para D ; a su vez, carece de sentido que la precipitación extrema se clasifique como frontal o no frontal de acuerdo con la distancia elegida, dado que la realidad es que solo una de estas dos clasificaciones puede ser correcta para cada evento, y si bien se espera una cierta variación según la distancia máxima de búsqueda utilizada, el resultado debería ser el mismo dentro un rango de distancias representativo de las características de los sistemas meteorológicos involucrados. Por lo tanto, el criterio basado únicamente en la cercanía entre al menos un punto con $FI > 0$ y el punto de precipitación es muy débil y poco concluyente, y deben realizarse ajustes antes de proseguir con el análisis.

La debilidad del método anterior reside en que alcanza con que un punto de retícula cercano al punto de precipitación extrema tenga $FI > 0$ para que esta precipitación se clasifique como frontal, siendo que un “frente” de un único punto bien puede deberse al ruido de cálculo y no representar un sistema frontal. Teniendo en cuenta la continuidad y extensión espacial de los frentes, puede mejorarse este algoritmo al agregar una condición mínima para la cantidad de puntos de retícula con $FI > 0$ que se requieren para que la precipitación sea frontal. Dado que la cantidad de puntos de retícula que se encuentran a una distancia D o menor de un determinado punto central varía con la latitud, en lugar de una cantidad mínima se impone un porcentaje mínimo de puntos para los cuales debe darse $FI > 0$ (sobre el total de puntos cercanos al centro). De esta manera, el análisis continúa equiparado frente a los cambios en la latitud, y pueden compararse resultados obtenidos en distintas regiones. Es importante remarcar que, si bien los frentes pueden conceptualizarse como líneas, la detección de estos sistemas mediante el índice FI resulta en áreas angostas y alargadas que delimitan la zona frontal.

En base a estas consideraciones se realizan pruebas combinando distintas condiciones de distancia (entre 100 y 200 km) y de porcentaje de puntos de retícula (desde 10 % hasta 40 %); en concreto, los valores utilizados son 100 km, 120 km, 150 km, 200 km para la distancia, y 10 %, 20 %, 30 %, 40 % para el porcentaje de puntos. Los valores de D se eligen considerando la escala típica de los frentes y su posición espacial respecto de la región donde se registra la precipitación frontal, donde 200 km es un valor comparable con lo utilizado en otros trabajos -cuya resolución espacial es mucho menor-, mientras que 100 km se considera como la distancia más restrictiva que puede utilizarse, dado que se trata de precipitación acumulada diaria y de la posición media del sistema frontal durante el mismo intervalo de tiempo; la distancia típica entre el frente (frío) de superficie y el frente en el nivel de 850 hPa se toma como 150 km pero, siguiendo el esquema conceptual (Ahrens, 2013; Hörler, 2006), la precipitación tiende a encontrarse entre el frente de superficie y el frente en niveles más altos. Se analizan también varios casos particulares (no mostrado) con los datos de FI en 850 hPa y de precipitación diaria, a fin de obtener una visualización más clara de las posibles configuraciones espaciales. Es importante notar que la distancia D no se mide en una única dirección, sino que delimita una región (con forma de casquete esférico) en la que se realiza la búsqueda de puntos con $FI > 0$. El rango evaluado para el porcentaje p de puntos de retícula que deben cumplir con $FI > 0$ dentro del área delimitada por D para que la precipitación en el centro de esta región sea clasificada como frontal varía desde 10 % (poco restrictivo) hasta 40 % (muy restrictivo) para las distintas pruebas; no se evalúan mayores valores para p dado que no tiene sentido considerar que el área completa se encuentre “cubierta” por un frente, sino que la situación más probable -aunque no es la única posible- es que el frente se encuentre desplazado en algunos kilómetros de la región con precipitación.

Al analizar las distintas combinaciones entre D y p (se muestran algunas combinaciones en Fig. 4.4), puede observarse que, dentro de una misma distancia (Fig. 4.4, comparar dentro de una misma fila), el porcentaje de precipitación extrema explicada por frentes disminuye gradualmente al aumentar el porcentaje de puntos necesarios, lo cual muestra que el aumento en p implica una restricción mayor. Por otro lado, comparando entre distintos valores de D para un mismo valor de p (Fig. 4.4, comparar sobre una misma columna), se observa que, salvo para el caso menos restrictivo -en el que p vale 10 % (Fig. 4.4, primera columna)- no se aprecian mayores variaciones en el porcentaje de precipitación extrema que se clasifica como frontal; entonces, al ampliar el área de búsqueda para $FI > 0$, en el caso de tratarse efectivamente de un sistema frontal, aumenta también la porción

del frente captada dentro de esta área, por lo que, para una misma condición p , el resultado prácticamente no se modifica al variar D , salvo que se trate de un valor bajo de p , dado que en ese caso, al ser débil la condición, pueden captarse falsos positivos aislados espacialmente (ruido) o una sección marginal de un frente que se encuentre más alejado y que no sea forzante de la precipitación extrema.

En base a estas varias consideraciones y pruebas, se decide finalmente 120 km para la distancia máxima que puede existir entre un frente y un evento puntual de precipitación extrema para que esta se clasifique como frontal, y 20% como el mínimo porcentaje de los puntos dentro del área delimitada por D que deben tener $FI > 0$ para que se considere que la precipitación en el centro de la región es forzada por un frente. El porcentaje elegido es el mínimo valor considerado para el cual se observan resultados robustos al variar la distancia, por lo que resulta adecuado para filtrar falsos positivos aislados y sistemas frontales lejanos que no resultan forzantes de la precipitación considerada en cada caso, y a la vez, no resulta excesivamente exigente. Viendo que no hay mayores diferencias entre las distancias consideradas para un mismo valor p , se elige un valor de D acorde a las configuraciones espaciales típicas de los frentes y la precipitación asociada, aunque resulte en un área de búsqueda menor que la utilizada en otros trabajos -aunque estos tienen menor resolución, y no podrían haber empleado áreas menores-. Es importante destacar la robustez de los resultados a partir de la incorporación del criterio sobre la mínima cantidad de puntos con $FI > 0$, dado que esto indica que la clasificación en frontal o no-frontal de la precipitación extrema es relativamente independiente de los valores utilizados y no varía arbitrariamente frente a pequeños cambios en los parámetros D y p .

Una vez realizada la exploración y determinados los parámetros D y p , se calcula el porcentaje de precipitación extrema frontal sobre el total de la precipitación extrema utilizando dos métricas distintas sobre el mismo método: en una el cociente se realiza entre el acumulado extremo frontal y el acumulado extremo total, y en otra, entre la cantidad de días de precipitación extrema frontal y el total de días de precipitación extrema. De la misma forma, se calcula el porcentaje de precipitación frontal sobre el total de precipitación, tanto en cantidad de días como en acumulado, a fin de tener un marco de referencia con el cual comparar la precipitación extrema frontal.

En primer lugar, se observa que, en ambas estaciones, la precipitación -tanto extrema como total- explicada por frentes (Figs. 4.5, 4.6) se encuentra solo al sur de 20°S, en concordancia con los frentes como sistemas de latitudes medias. Mientras que el porcentaje de precipitación frontal durante el invierno (Fig. 4.5b) es cercano al 40% en todo el centro-norte del país, durante la primavera (Fig. 4.6b) se observa, por un lado, una disminución en general del porcentaje de precipitación frontal, y por el otro, valores muy bajos al norte de esta región. Lo segundo puede ser explicado con el corrimiento hacia el polo de los sistemas meteorológicos siguiendo al hemisferio de verano, mientras que lo primero responde a que, durante la primavera, cobran importancia otros forzantes para la precipitación -como los forzantes térmicos o la precipitación asociada a los sistemas convectivos de mesoescala-. En la Patagonia no hay grandes diferencias entre las dos estaciones. Comparando la precipitación extrema frontal con la precipitación frontal, puede verse que los patrones espaciales son similares, pero es mayor el porcentaje de precipitación extrema debido a frentes (Figs. 4.5a, 4.6a). En el invierno, alrededor del 50% de la precipitación extrema puede explicarse por frentes, mientras que este valor disminuye al 40% en la primavera. La definición de precipitación explicada por frentes difiere según el autor (Catto et al., 2012; Catto y Pfahl, 2013; Blázquez y Solman, 2018), pudiendo obtenerse distintos resultados según cuál criterio se utilice; las métricas más utilizadas son el cociente entre acumulado de precipitación (extrema) frontal sobre acumulado total (de precipitación extrema) y el cociente entre días con precipitación (extrema) frontal sobre el total de días de precipitación (extrema). Comparando los valores obtenidos a partir de ambas métricas (no mostrado), puede notarse que los patrones espaciales se mantienen, y si bien no hay diferencias apreciables en la precipitación extrema, para la precipitación total es menor la cantidad explicada al considerar días de precipitación.

Se calcula también el porcentaje de días de precipitación extrema frontal sobre el total de días de precipitación frontal (Fig. 4.7); como referencia, el porcentaje de días de precipitación extrema sobre días de precipitación total es 5%, por la definición de extremo utilizada en este trabajo. Hacia el centro-este y sur del país, para ambas estaciones, el porcentaje de días de precipitación extrema frontal sobre días de precipitación es mayor al 5%, mientras que en el noroeste, este porcentaje resulta cercano al valor de referencia. Entonces, en las dos

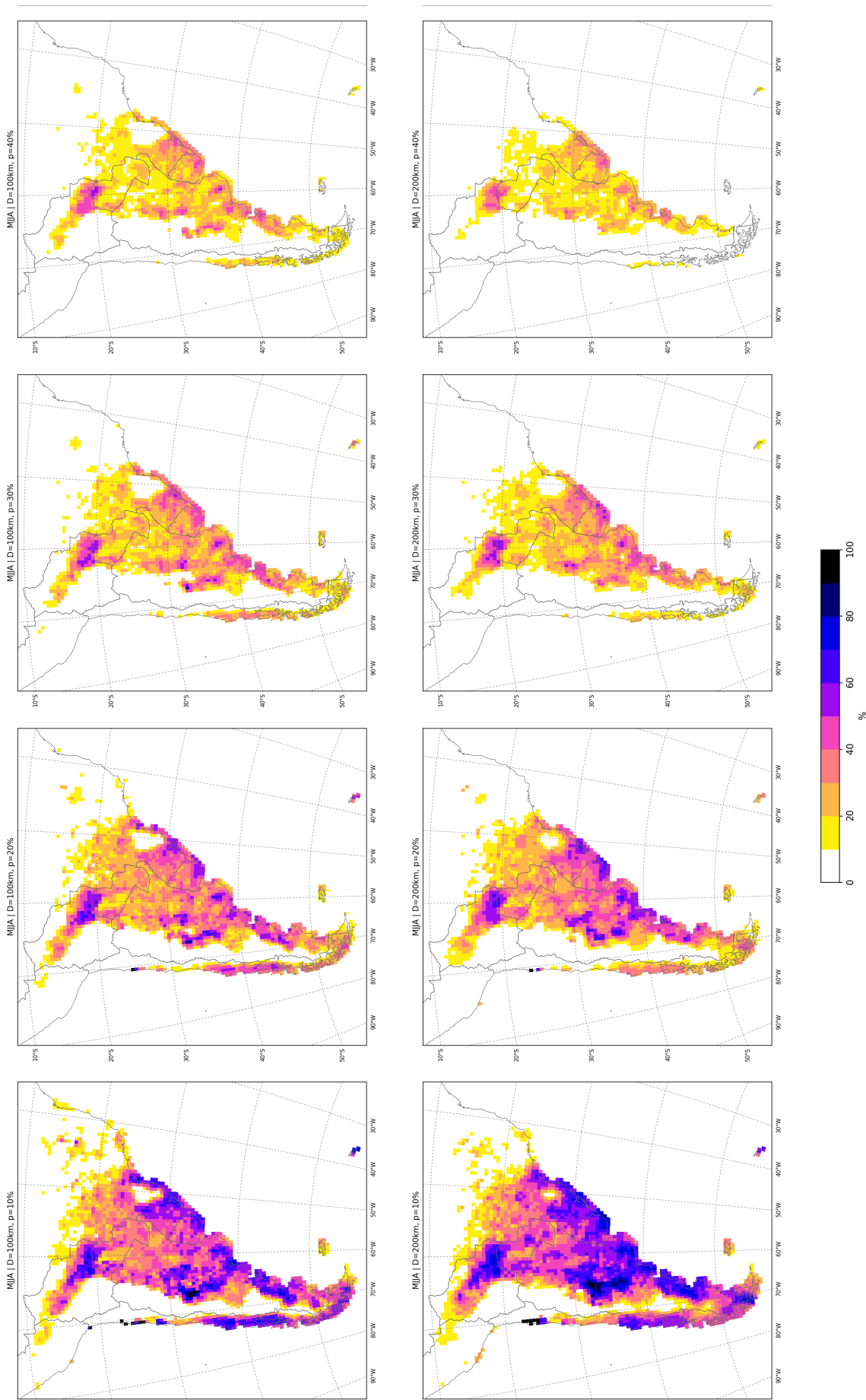


Figura 4.4: Porcentaje del acumulado de precipitación extrema frontal sobre total de precipitación extrema variando la distancia máxima D (filas) a la que puede encontrarse la precipitación del frente y el mínimo porcentaje p (columnas) de puntos de retícula que deben cumplir $FI>0$ para que la precipitación sea frontal. Fila superior, $D = 100\text{km}$; fila inferior, $D = 200\text{km}$. Columnas, de izquierda a derecha, p vale 10 %, 20 %, 30 %, 40 %.

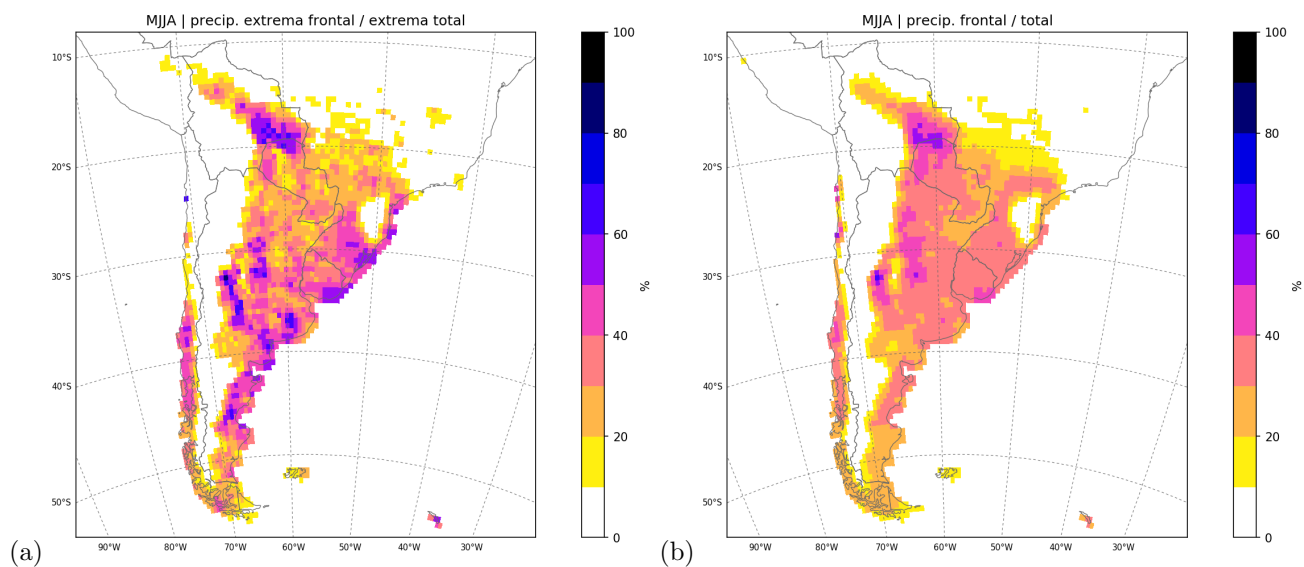


Figura 4.5: Porcentaje de precipitación (a) extrema, (b) total, explicada por frentes, calculada sobre los acumulados totales correspondientes, para MJJA.

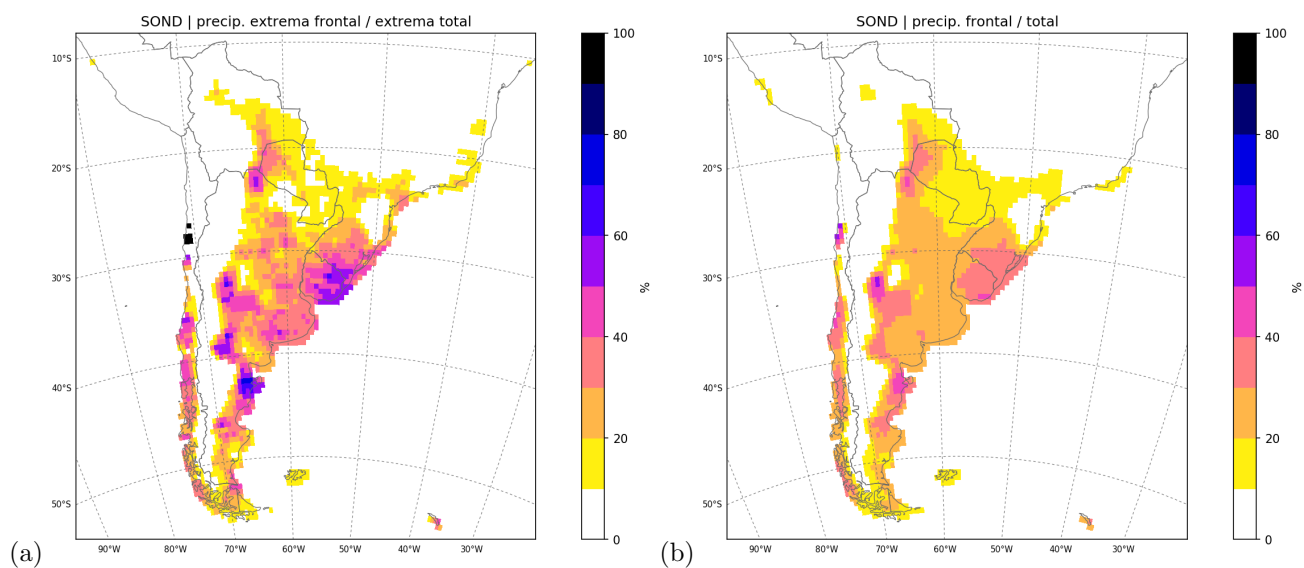


Figura 4.6: Ídem Fig. 4.5 para SOND.

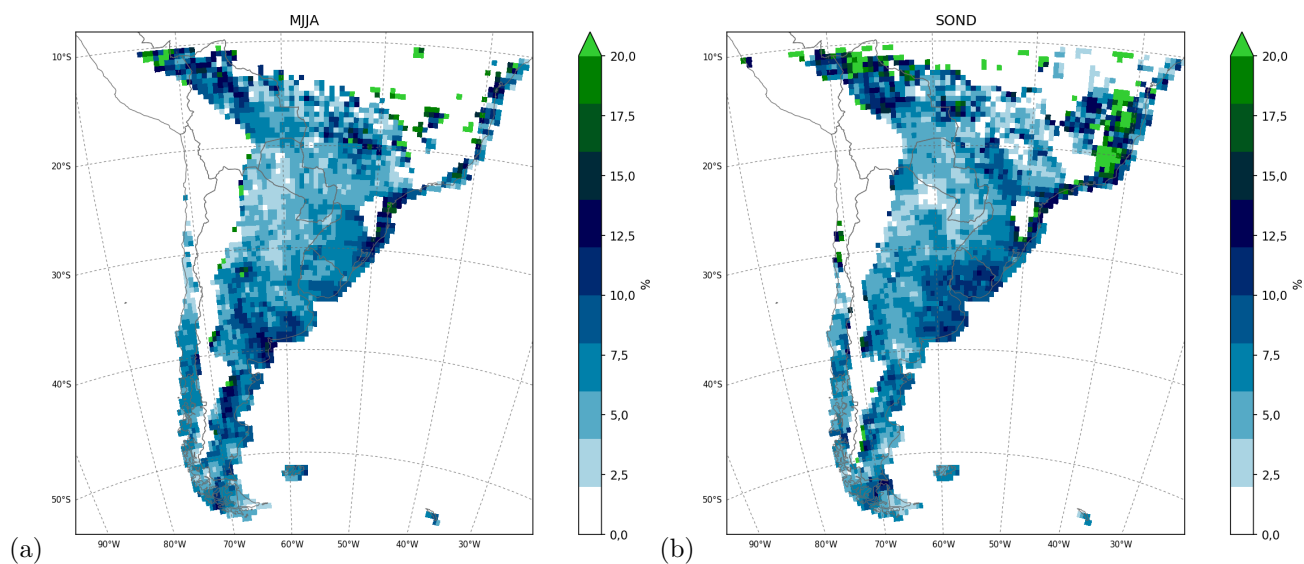


Figura 4.7: Porcentaje de días de precipitación extrema frontal sobre días de precipitación frontal para (a) MJJA, (b) SOND.

primeras regiones, los extremos de precipitación se dan con mayor frecuencia cuando el forzante es frontal.

Capítulo 5

Frentes forzantes de precipitación extrema

Los frentes que producen precipitación extrema pueden tener características distintivas, por lo que se indagan las diferencias entre distintos parámetros asociados a los frentes que generan precipitación, discriminando entre aquellos sistemas asociados a precipitación extrema y los que resultan forzantes para la precipitación -siempre que esta sea mayor a 1 mm/día, pero puede o no ser extrema-. Si bien pueden compararse los frentes que producen precipitación extrema con la totalidad de los frentes, resulta más apropiado compararlos con los frentes precipitantes (frentes que producen precipitación, sin importar si es extrema o no); no todos los frentes resultan precipitantes por lo que las diferencias que puedan encontrarse podrían deberse no solo a las variaciones en el acumulado diario de precipitación sino a su rol como forzante -o no- de la precipitación.

Para identificar los puntos de retícula que constituyen a los frentes precipitantes se utiliza la misma asociación entre precipitación y frentes (Cap. 4) pero de manera inversa, manteniendo los mismos parámetros de distancia máxima de búsqueda ($D = 120km$) y mínimo porcentaje de puntos con $FI > 0$ ($p = 20\%$). Para cada evento de precipitación (total o extrema) se cuenta la cantidad de puntos con $FI > 0$, y si esta supera el umbral definido a partir de D y p , entonces se considera que la precipitación es frontal; recíprocamente, cada vez que un grupo de puntos en las proximidades de un evento de precipitación le confieren a esta última la característica de frontal, puede considerarse que estos mismos puntos constituyen un frente precipitante. Es decir, cada vez que hay suficientes puntos con $FI > 0$ (de acuerdo con D y p) alrededor de un evento de precipitación, se considera que esta precipitación es frontal y que el frente es precipitante (lo mismo sucede para la precipitación extrema y los frentes que la producen). A partir de la identificación de los frentes que generan precipitación -sea o no extrema-, se seleccionan, para los mismos puntos de retícula, distintas variables atmosféricas, generando dos subconjuntos de datos, uno para las variables asociadas a los frentes precipitantes y otro para las asociadas a los sistemas frontales que producen precipitación extrema.

En primer lugar, se compara, como medida de intensidad, la media de los valores del índice de frentes (FI) para los dos subconjuntos de frentes precipitantes, tanto para el invierno (Fig. 5.1) como la primavera (Fig. 5.2). Se observa que, en ambas estaciones, los valores de FI son más elevados para los frentes que producen precipitación extrema que para el conjunto de todos los frentes precipitantes. No se observan grandes diferencias estacionales en la media de FI para los casos de precipitación extrema (Figs. 5.1a, 5.2a), y sus valores son cercanos a $8 * 10^{-10} Km^{-1} s^{-1}$, aunque hay variaciones localizadas. En cambio, en los frentes asociados con precipitación -no necesariamente extrema-, si bien muestran una mayor homogeneidad espacial, se observa una disminución del valor medio de FI en la primavera (Fig. 5.2b), en donde los valores rondan $4 * 10^{-10} Km^{-1} s^{-1}$, mientras que en el invierno (Fig. 5.1b) son cercanos a $6 * 10^{-10} Km^{-1} s^{-1}$. Por lo tanto, los frentes asociados a eventos de precipitación extrema resultan, en promedio, más intensos que los frentes precipitantes y los valores medios también son mayores que las respectivas medias estacionales de FI (Fig. 3.5).

Las diferencias observadas en las medias de FI podrían atribuirse a cualquiera de los dos factores que lo

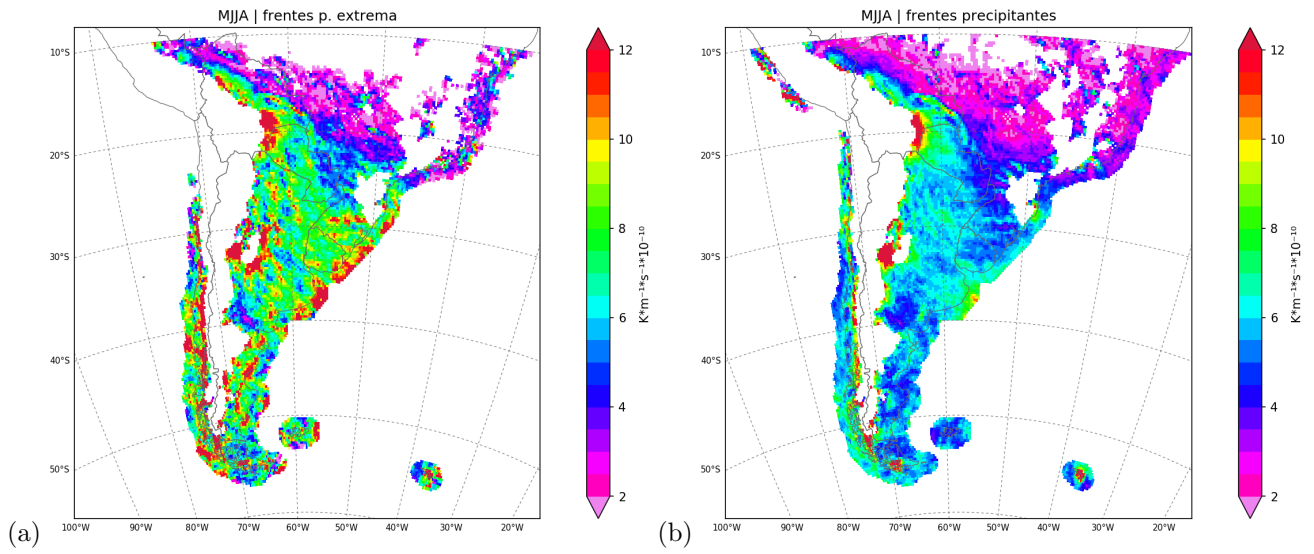


Figura 5.1: Media de FI para (a) frentes que producen precipitación extrema, (b) frentes precipitantes, para MJJA. Las unidades son $Km^{-1}s^{-1} * 10^{-10}$.

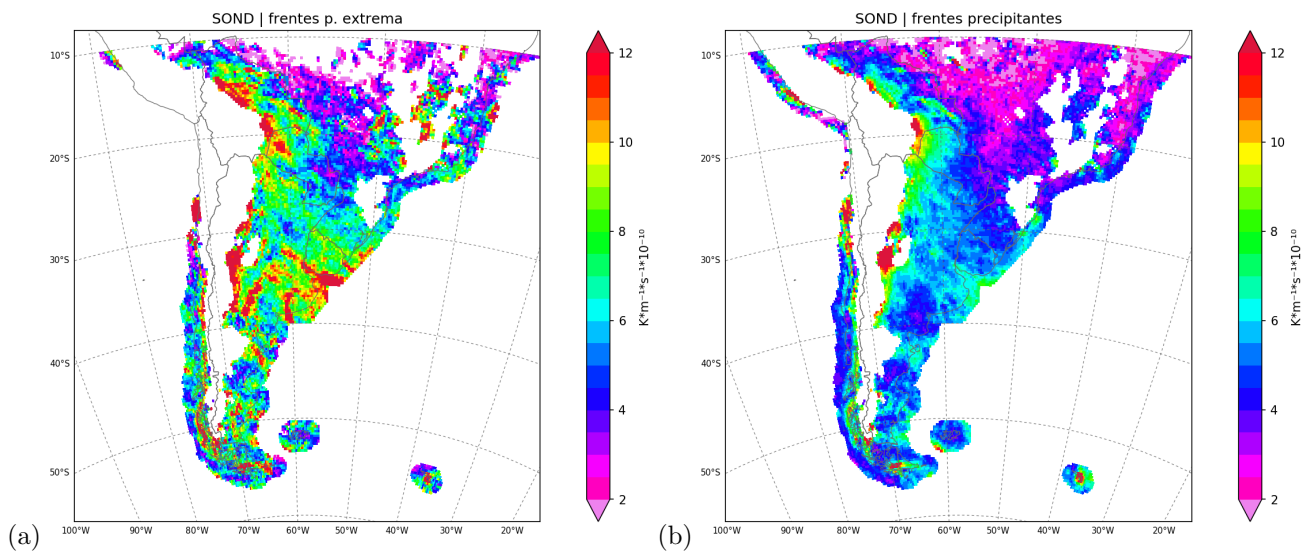


Figura 5.2: Ídem Fig. 5.1 para SOND.

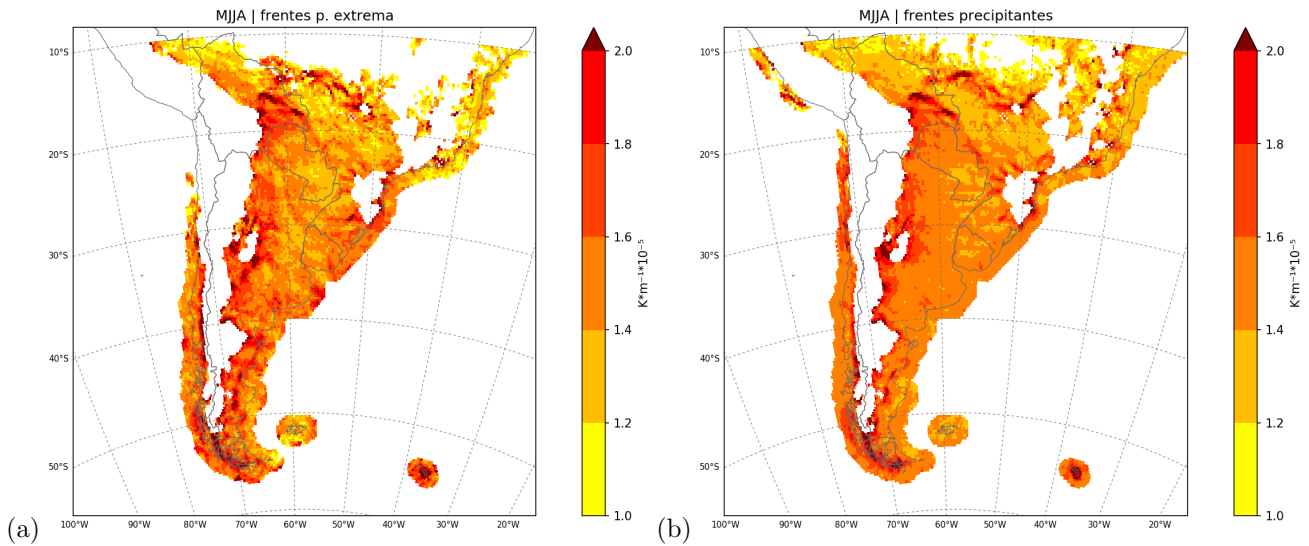


Figura 5.3: Media del módulo del gradiente de temperatura ($|\nabla T| \geq 1^\circ C/100km$) para (a) frentes que producen precipitación extrema, (b) frentes precipitantes, para MJJA. Las unidades son $Km^{-1} * 10^{-5}$.

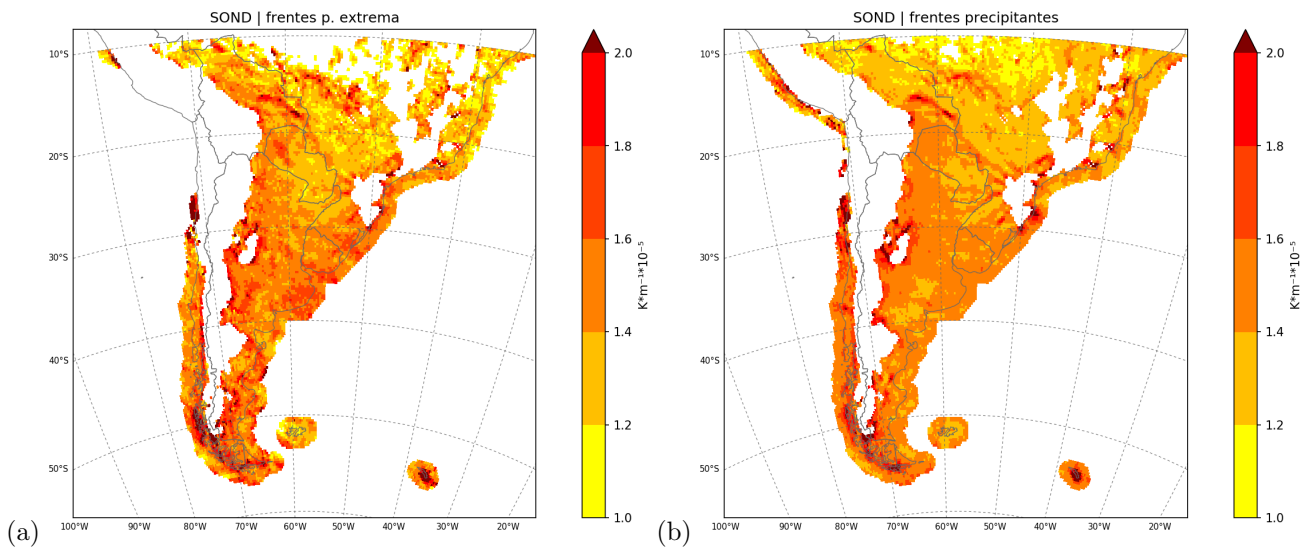


Figura 5.4: Ídem Fig. 5.3 para SOND.

componen (ecuación 2.1). Para determinar cuál de los dos términos (vorticidad ciclónica, módulo del gradiente de temperatura) contribuye a estas diferencias -o si ambos afectan el resultado final-, se calcula la media de estas dos variables para los frentes asociados a precipitación (extrema y total), tanto para la primavera como para el invierno. En latitudes medias, el módulo del gradiente de temperatura (Figs. 5.3, 5.4) tiene valores alrededor de $1,5 * 10^{-5} Km^{-1}$ en ambas estaciones, para todos los frentes precipitantes, sin importar si la precipitación que producen es extrema o no. En el caso de los gradientes de temperatura asociados a frentes que generan precipitación extrema, se observa que no son tan homogéneos espacialmente como los asociados a sistemas frontales precipitantes; si bien la precipitación es una variable discontinua espacial y temporalmente, los eventos de precipitación extrema son incluso más segregados, dado que, por un lado, la cantidad de eventos es considerablemente menor y, por el otro, puede ocurrir que dentro de una misma región con precipitación ocasionada por un mismo sistema frontal, no resulte extrema en toda su extensión, sino solo en algunas áreas -ya sea porque la cantidad acumulada es menor o porque el umbral dado por el percentil-95 es mayor o por un combinación de ambos factores-.

A diferencia del gradiente de temperatura, para la media de vorticidad (ciclónica) (Figs. 5.5, 5.6) se encuentra que, tanto para el invierno como para la primavera, los frentes que generan precipitación extrema (Figs. 5.5a, 5.6a) tienen valores medios de vorticidad ciclónica alrededor de $-5,5 * 10^{-5} s^{-1}$ por lo que resultan más intensos

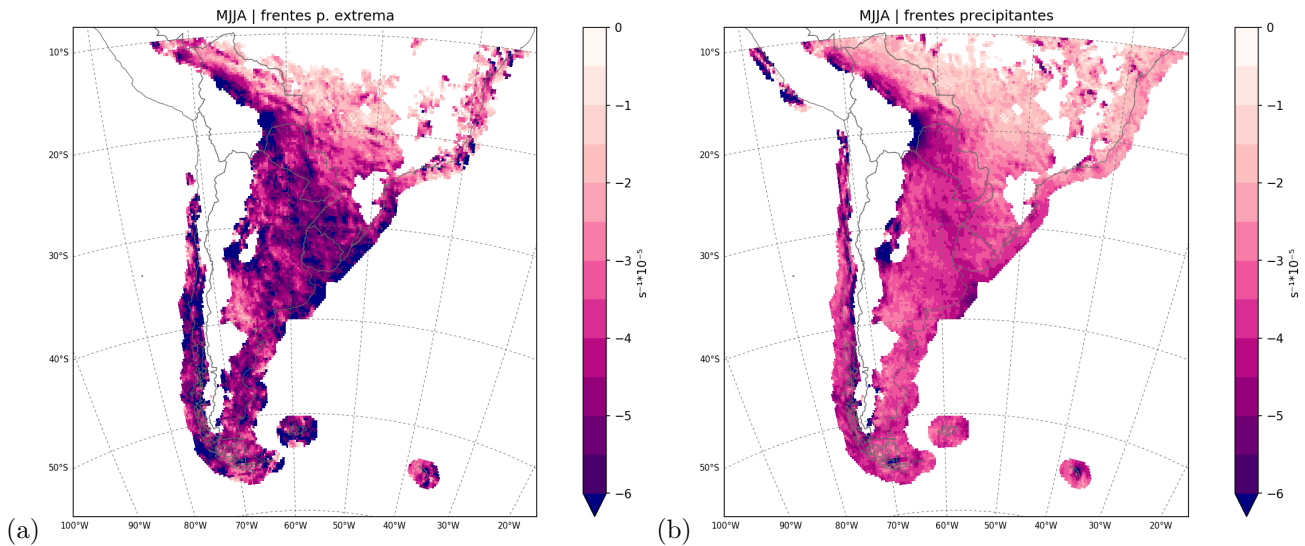


Figura 5.5: Media de la vorticidad -cyclónica ($\zeta < 0$)- para (a) frentes que producen precipitación extrema, (b) frentes precipitantes, para MJJA. Las unidades son $s^{-1} * 10^{-5}$.

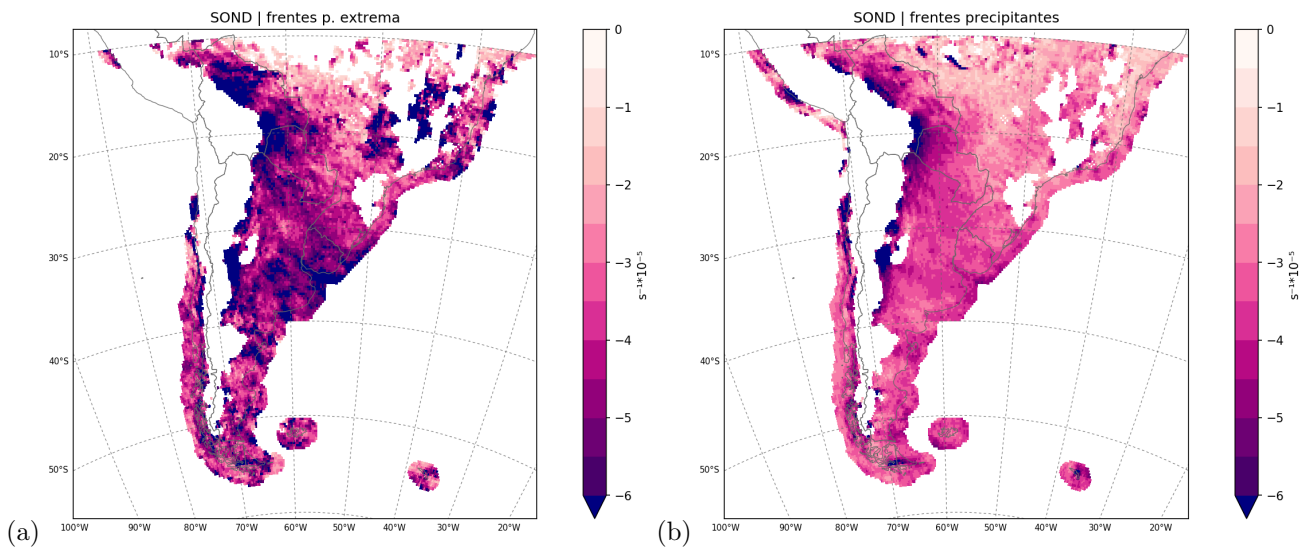


Figura 5.6: Ídem Fig. 5.5 para SOND.

que los frentes precipitantes (Figs. 5.5b, 5.6b), cuyos valores son cercanos a $-3,5 * 10^{-5} s^{-1}$, aunque no se encuentran grandes diferencias entre estaciones. Entonces, las diferencias observadas en la media de FI para los distintos frentes que producen precipitación (Figs. 5.1, 5.2) se deben mayoritariamente al término de vorticidad y no al gradiente de temperatura, por lo que en la diferenciación de los frentes asociados a precipitación extrema -respecto de los frentes precipitantes- predomina el aspecto dinámico por sobre el termodinámico. De acuerdo con Bluestein (1993, capítulo 2.5), la pendiente frontal es mayor cuanto mayor sea la vorticidad absoluta, y más achatada cuanto mayor sea el contraste térmico. Esta propiedad sugiere que la pendiente de los frentes que producen precipitación extrema podría ser, en promedio, más abrupta que la de los frentes precipitantes en general; queda planteada la conjetura aunque no se explore en el presente trabajo.

Para la ocurrencia de precipitación (total o extrema) es necesario que exista, además de un forzante (frontal o de otro tipo), suficiente humedad disponible para alimentar al sistema. Para representar esta componente fundamental se calcula la media de la anomalía de humedad específica (según sección 2.2.3) para las dos categorías de frentes precipitantes, en las dos estaciones (Figs. 5.7, 5.8). Se observa que, en latitudes medias, los frentes que producen precipitación tienen anomalías positivas de humedad específica, y los valores más altos se dan en el centro-norte de Argentina. Las anomalías asociadas a los frentes que producen precipitación extrema (Figs. 5.7a, 5.8a) son mayores en $\sim 1g/kg$ a las asociadas a frentes precipitantes (5.7b, 5.8b), sin importar

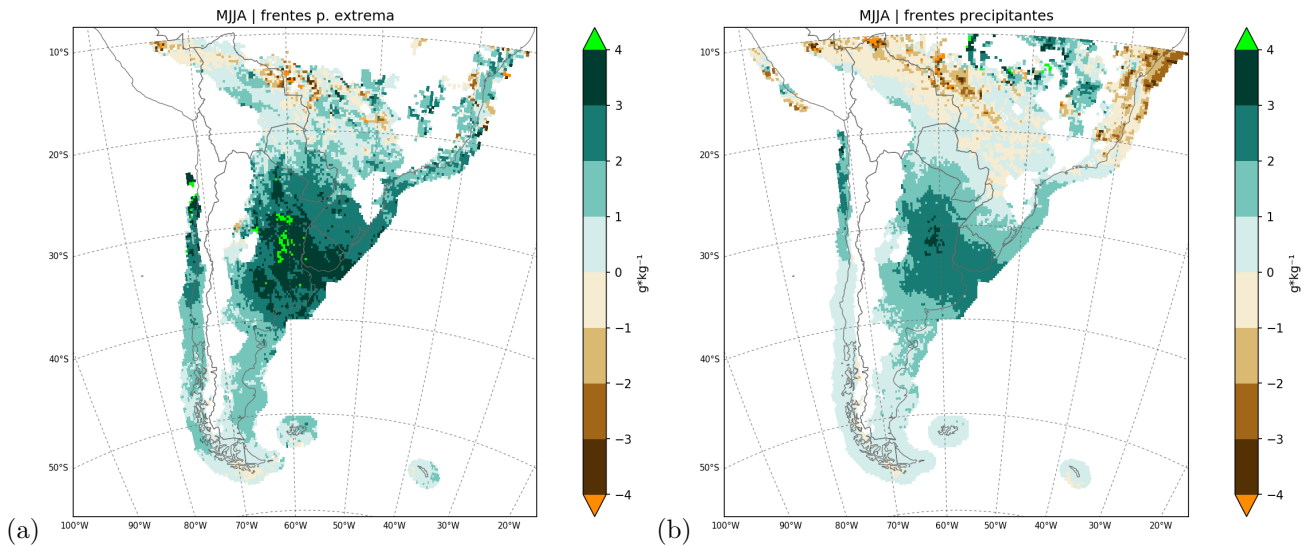


Figura 5.7: Media de anomalía de humedad específica para (a) frentes que producen precipitación extrema, (b) frentes precipitantes, para MJJA. Las unidades son g/kg .

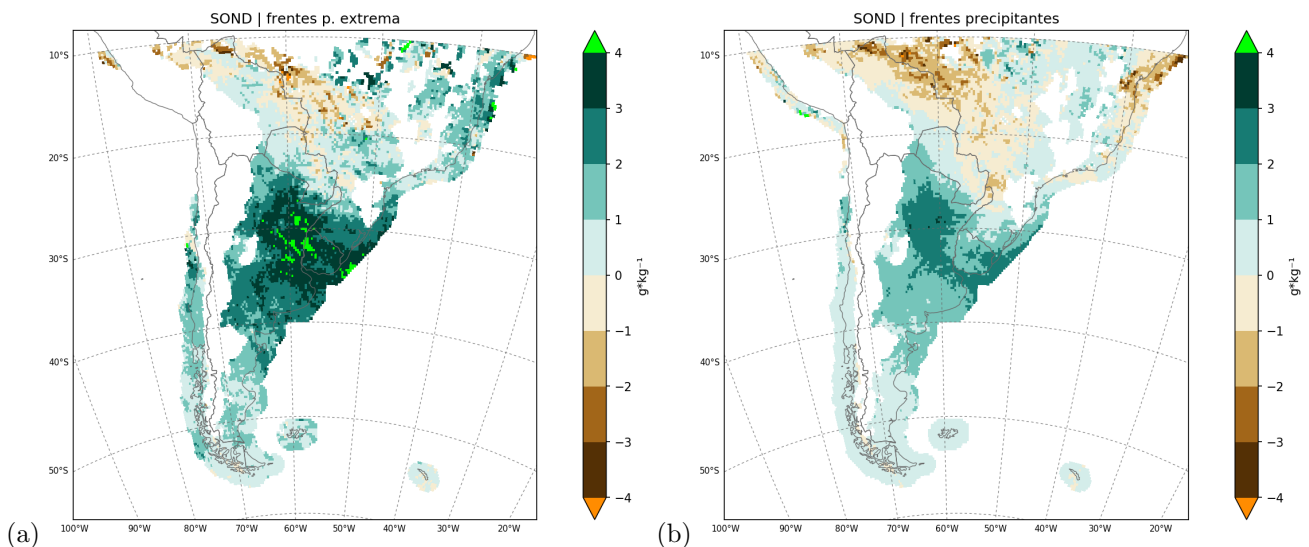


Figura 5.8: Ídem Fig. 5.7 para SOND.

la variación de los valores en las distintas regiones. Este resultado podría ser equivalente a lo encontrado por Catto y Pfahl (2013), quienes observan que, en latitudes medias y en ambos hemisferios, los frentes que producen precipitación extrema se diferencian del resto de los frentes al tener un mayor gradiente de temperatura potencial de bulbo húmedo; dado que esta variable contiene información sobre la temperatura y la humedad, y dado que -en el presente trabajo- se encuentra que no hay mayores diferencias en el gradiente de temperatura pero sí en la humedad específica, la variación en la temperatura potencial de bulbo húmedo podría deberse mayoritariamente al contenido de humedad.

La identificación de las características distintivas de los frentes que producen precipitación extrema -como la mayor humedad disponible en niveles bajos y la vorticidad relativa más intensa- constituye una potencial herramienta de pronóstico para eventos extremos de precipitación ocasionados por frentes, enfatizando la importancia de la humedad como ingrediente necesario para la precipitación y el rol del forzante dinámico -el cual podría estar relacionado con la mayor inclinación de la pendiente frontal- en su predominio sobre el forzante termodinámico.

Capítulo 6

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se analiza la relación entre los sistemas frontales y la precipitación extrema en el sur de Sudamérica durante el período 1979-2017 (39 años) para el invierno extendido (de mayo a agosto) y la primavera extendida (de septiembre a diciembre). Se utilizan datos diarios de precipitación de *CPC Global Unified Precipitation* y de temperatura y viento de ERA5 en el nivel de 850 hPa. La compleja topografía del continente sudamericano representa un desafío que no ha sido abordado por trabajos previos sobre la precipitación (extrema) frontal, los cuales fueron realizados a nivel global o hemisférico; en este sentido, resulta novedoso -para el tema de estudio- el enfoque regional adoptado en esta tesis. La intensidad y la frecuencia de ocurrencia de los sistemas frontales fue caracterizada -en el nivel isobárico de 850hPa- a partir del índice de frentes FI, que combina dos características fundamentales de estos sistemas (la vorticidad ciclónica y el contraste térmico). Se analizó el desempeño de este índice en la región de estudio y se exploraron condiciones para mejorar su rendimiento. Por otro lado, se caracterizó -para cada estación- la precipitación extrema a partir del percentil-95, y se evaluaron criterios de asociación entre precipitación y frentes, con los que luego se caracterizó la precipitación extrema frontal (y se la comparó con la precipitación frontal). Por último, considerando la potencialidad para el pronóstico de eventos extremos, se analizaron las (posibles) características distintivas de los frentes que producen precipitación extrema (en comparación con los frentes precipitantes) a partir de composiciones de FI, vorticidad ciclónica, gradiente de temperatura y humedad disponible.

La eficiencia del índice FI en la detección (automática) de frentes se ve comprometida en regiones en las que el terreno es elevado, dado que existen gradientes de temperatura intensos casi permanentes que no se encuentran asociados a sistemas frontales. Al evaluar FI en la superficie isobárica de 850 hPa -cuyo geopotencial típico es de $15000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\sim 1500 \text{ m}$)-, las variables atmosféricas se ven influenciadas por el terreno cuando esta superficie se encuentra cerca del nivel del suelo; si el nivel del terreno se encuentra por debajo de $8000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\sim 800 \text{ m}$), la influencia de la topografía en el nivel de 850 hPa es muy escasa, por lo que FI captura correctamente la ocurrencia de frentes a partir de sus características dinámicas (vorticidad ciclónica) y termodinámicas (contraste térmico). Al agregar la condición de no-persistencia, descartando los períodos de más de 3 días consecutivos con $\text{FI} > 0$, se retiene la característica transiente de los sistemas frontales, filtrando falsos positivos -aunque puedan ocurrir falsos negativos-, asegurando que los frentes considerados se encuentren aislados temporalmente, es decir, no persistan por más de 3 días.

La ocurrencia de frentes sobre el continente sudamericano queda confinada al sur de 20°S , remarcando su condición de sistemas de latitudes medias. La frecuencia de ocurrencia es cercana al 10% sobre el continente; el desplazamiento meridional siguiendo al hemisferio de verano se evidencia en el aumento (disminución) de la frecuencia en el sur (centro-norte) del país durante la primavera extendida (SOND) respecto del invierno extendido (MJJA). La intensidad media de los frentes -calculada a través de FI- es mayor en invierno que en primavera, aunque los patrones espaciales son similares: se dan dos mínimos relativos, uno sobre el Mar Argentino y otro en el anticiclón semipermanente del Pacífico Sur, los valores al norte de 20°S son muy débiles, y hay valores muy elevados al pie de la cordillera y algunas regiones costeras causados por grandes contrastes térmicos y vorticidad ciclónica intensa.

La precipitación extrema puede caracterizarse a partir del valor umbral dado por el percentil-95 en cada punto de retícula y para cada estación; al considerar series de precipitación compuestas únicamente por días con acumulado diario mayor o igual a 1 mm, se describe mejor la variable aunque la cantidad de eventos de precipitación extrema considerados es menor al 2,5 % del total de días de cada estación y la longitud de la serie varía según la región considerada. Los valores más bajos del percentil-95 se encuentran sobre la diagonal árida de América del Sur, en donde, además, la cantidad de días con precipitación extrema es escasa, mientras que en el sudeste de Sudamérica (SESA), tanto los valores de percentil-95 como la cantidad de días con eventos extremos alcanzan su valor máximo para las latitudes medias -siendo más elevados durante la primavera que durante el invierno-; en el noroeste del país, el cambio estacional es más marcado, dado que en la primavera el aumento respecto del invierno es sustancial.

Se considera que los frentes actúan como forzante para la precipitación (total o extrema) cuando se encuentran en las proximidades del evento de precipitación registrado; al medir la cercanía como la distancia física entre dos puntos sobre una esfera -siguiendo el círculo máximo-, la asociación entre frentes y precipitación resulta equiparable en distintas latitudes, lo cual es posible gracias a la alta resolución espacial de los datos de ERA5 empleados y representa una mejora frente a trabajos anteriores que utilizan una cantidad fija de puntos de retícula con un espaciamiento constante en grados (por lo que su separación real varía dependiendo de la latitud). Sin embargo, no alcanza con encontrar un único punto cercano a la precipitación que se clasifique como frente ($FI > 0$), sino que deben darse una cierta cantidad de puntos de retícula con $FI > 0$ para que la precipitación sea frontal; considerar varios puntos permite representar la continuidad y extensión espacial de los sistemas frontales y reducir los efectos del ruido. A través de varias pruebas se determina que, para eventos diarios, una distancia máxima adecuada entre la precipitación y el frente es de 120 km mientras que una cota adecuada para el mínimo de puntos de retícula con $FI > 0$ es 20 % de los puntos comprendidos dentro del área (casquete esférico) delimitada por la distancia máxima; este método de asociación de precipitación con sistemas frontales no es particularmente sensible a los cambios en la distancia máxima pero sí resulta más restrictivo al aumentar el porcentaje mínimo.

La precipitación (total y extrema) explicada por frentes se encuentra confinada al sur de 20°S, denotando una vez más la característica de sistemas de latitudes medias de los frentes. En invierno, alrededor del 50 % de la precipitación extrema es frontal, mientras que en la primavera, al cobrar importancia otros forzantes, los frentes explican alrededor del 40 % de la precipitación extrema y, debido al desplazamiento estacional de los sistemas meteorológicos -siguiendo al hemisferio de verano-, se encuentran valores más bajos al norte del país. No hay diferencias en el porcentaje de precipitación extrema explicada por frentes cuando se comparan los cocientes entre acumulados diarios y entre cantidad de días con precipitación. La distribución espacial del porcentaje de precipitación extrema frontal es similar al de la precipitación frontal, pero el primero resulta más alto que el segundo. Entonces, es más frecuente que la precipitación sea frontal si la precipitación es extrema (comparando con todos los eventos de precipitación). Además, en latitudes medias (exceptuando el noroeste del país), la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos dentro de la precipitación frontal es mayor al 5 % (valor de referencia que representa la ocurrencia de extremos sobre el total de días de precipitación), por lo que es más frecuente que la precipitación frontal resulte extrema.

Los frentes que producen precipitación extrema son más intensos (valores más altos de FI) que los frentes precipitantes, y su intensidad promedio es mayor que la media estacional calculada para todos los frentes. No hay mayores diferencias estacionales -salvo en el alcance meridional- en la intensidad de los frentes generadores de precipitación extrema, aunque sí las hay entre los frentes precipitantes (son más intensos en invierno que en primavera). De los dos factores que conforman al índice de frentes FI, la vorticidad relativa (factor dinámico) es el que mejor explica las diferencias entre frentes que producen precipitación extrema y frentes que producen precipitación -extrema o no-, dado que resulta más intensa en el primer caso; el gradiente de temperatura (factor termodinámico) no permite distinguir entre los dos casos. Una posible inferencia es que los frentes que producen precipitación extrema se distinguen de los frentes precipitantes por tener una pendiente frontal más abrupta dada por la mayor vorticidad ciclónica para un mismo contraste térmico. Además de la diferencia en el forzante, los frentes que producen precipitación extrema se distinguen por diferencias en la humedad disponible.

Si bien los frentes precipitantes están asociados a anomalías positivas de humedad específica, las anomalías son mayores para los frentes generadores de precipitación extrema. Entonces, estos sistemas tienen, en promedio, un forzante (dinámico) más intenso acoplado con una mayor disponibilidad de humedad; estas dos características son potenciales herramientas de pronóstico para eventos extremos de precipitación asociados a frentes, dado que podrían indicar cuáles sistemas frontales precipitantes serían más propensos a superar el umbral del acumulado diario dado por el percentil-95.

Bibliografía

- Ahrens, C. Donald (2013). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. 10.^a ed. Cengage Learning. Brooks/Cole.
- Berry, Gareth et al. (2011). “A global climatology of atmospheric fronts”. En: *Geophysical Research Letters* 38.4.
- Bjerknes, J y H Solberg (1922). “Life Cycle of”. En: *Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation, Geofysiske Publikasjoner* 3.1.
- Blázquez, Josefina y Silvina A Solman (2016). “Intraseasonal variability of wintertime frontal activity and its relationship with precipitation anomalies in the vicinity of South America”. En: *Climate Dynamics* 46.7-8, págs. 2327-2336.
- (2017). “Interannual variability of the frontal activity in the Southern Hemisphere: relationship with atmospheric circulation and precipitation over southern South America”. En: *Climate Dynamics* 48.7-8, págs. 2569-2579.
- (2018). “Fronts and precipitation in CMIP5 models for the austral winter of the Southern Hemisphere”. En: *Climate Dynamics* 50.7-8, págs. 2705-2717.
- (2019). “Relationship between projected changes in precipitation and fronts in the austral winter of the Southern Hemisphere from a suite of CMIP5 models”. En: *Climate Dynamics* 52.9-10, págs. 5849-5860.
- Bluestein, Howard B (1993). *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes. Volume II. Observations and theory of weather systems*. New York, NY (United States); Oxford University Press.
- Browning, KA y NM Roberts (1994). “Structure of a frontal cyclone”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120.520, págs. 1535-1557.
- Bruniard, Enrique D (1982). “La diagonal árida argentina: un límite climático real”. En: *Revista Geográfica* 95, págs. 5-20.
- Catto, Jennifer Louise y S Pfahl (2013). “The importance of fronts for extreme precipitation”. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118.19, págs. 10-791.
- Catto, Jennifer Louise et al. (2014). “Atmospheric fronts in current and future climates”. En: *Geophysical Research Letters* 41.21, págs. 7642-7650.
- Catto, JL et al. (2012). “Relating global precipitation to atmospheric fronts”. En: *Geophysical Research Letters* 39.10.
- Cavalcanti, Iracema Fonseca Albuquerque (2012). “Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century”. En: *Atmospheric Research* 118, págs. 27-40.
- Dowdy, Andrew J y Jennifer L Catto (2017). “Extreme weather caused by concurrent cyclone, front and thunderstorm occurrences”. En: *Scientific reports* 7, págs. 40359.
- Garreaud, René D et al. (2009). “Present-day south american climate”. En: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281.3-4, págs. 180-195.
- Haylock, Malcolm R et al. (2006). “Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature”. En: *Journal of climate* 19.8, págs. 1490-1512.
- Hersbach, Hans et al. (2020). “The ERA5 global reanalysis”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, págs. 1999-2049.

- Hewson, Tim D (1998). “Objective fronts”. En: *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling* 5.1, págs. 37-65.
- Hirata, Fernando E y Alice M Grimm (2016). “The role of synoptic and intraseasonal anomalies in the life cycle of summer rainfall extremes over South America”. En: *Climate Dynamics* 46.9-10, págs. 3041-3055.
- (2017). “The role of synoptic and intraseasonal anomalies on the life cycle of rainfall extremes over South America: non-summer conditions”. En: *Climate Dynamics* 49.1-2, págs. 313-326.
- Hope, Pandora et al. (2014). “A comparison of automated methods of front recognition for climate studies: A case study in southwest Western Australia”. En: *Monthly Weather Review* 142.1, págs. 343-363.
- Hörlner, Juan Manuel (2006). *La meteorología contemporánea: estudio general de las ciencias de la atmósfera y su aplicación al hemisferio sur*. 1.^a ed. Instituto de Publicaciones Navales.
- Lackmann, Gary (2011). *Midlatitude synoptic meteorology*. American Meteorological Society.
- Parfitt, Rhys et al. (2017). “A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts”. En: *Geophysical Research Letters* 44.9, págs. 4351-4358.
- Peixoto, José Pinto y Abraham H Oort (1992). *Physics of climate*. New York, NY (United States); American Institute of Physics.
- Penalba, Olga C y Federico A Robledo (2010). “Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century”. En: *Climatic Change* 98.3-4, págs. 531-550.
- Re, Mariano y Vicente Ricardo Barros (2009). “Extreme rainfalls in se South America”. En: *Climatic Change* 96.1-2, págs. 119-136.
- Rudeva, Irina et al. (2019). “Midlatitude fronts and variability in the Southern Hemisphere tropical width”. En: *Journal of Climate* 32.23, págs. 8243-8260.
- Salby, Murry L (2012). *Physics of the Atmosphere and Climate*. Cambridge University Press.
- Satyamurty, Prakki et al. (1998). “South America”. En: *Meteorology of the southern hemisphere*. Springer, págs. 119-139.
- Schemm, Sebastian et al. (2015). “Extratropical fronts in the lower troposphere—global perspectives obtained from two automated methods”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141.690, págs. 1686-1698.
- Simmonds, Ian et al. (2012). “Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis”. En: *Journal of Climate* 25.6, págs. 1945-1962.
- Sinnott, Roger W (1984). “Virtues of the Haversine”. En: *S&T* 68.2, pág. 158.
- Solman, Silvina A e Isidoro Orlanski (2010). “Subpolar high anomaly preconditioning precipitation over South America”. En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 67.5, págs. 1526-1542.
- (2014). “Poleward shift and change of frontal activity in the Southern Hemisphere over the last 40 years”. En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 71.2, págs. 539-552.
- Urraca, Ruben et al. (2018). “Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data”. En: *Solar Energy* 164, págs. 339-354.
- Vörösmarty, Charles J et al. (2013). “Extreme rainfall, vulnerability and risk: a continental-scale assessment for South America”. En: *Philosophical transactions of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences* 371.2002, pág. 20120408.
- Wu, Yutian y Lorenzo M Polvani (2017). “Recent trends in extreme precipitation and temperature over southeastern South America: The dominant role of stratospheric ozone depletion in the CESM Large Ensemble”. En: *Journal of Climate* 30.16, págs. 6433-6441.
- Xie, Pingping et al. (2010). “CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation”. En: *Preprints, 24th Conf. on Hydrology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc.* Vol. 2.

Agradecimientos

A Jose, mi directora, por su esfuerzo y su acompañamiento a lo largo de esta etapa final de la carrera.

A Silvina, mi codirectora, por su valioso tiempo.

A Horacio, sin quien no hubiera sido posible la beca, por su apoyo y capacidad para escuchar.

A Vane y a Sole, por sus excelentes consejos a lo largo de la carrera.

A mi papá, por las enseñanzas de toda la vida.

A mi mamá, que no podría no mencionarla.

A mis hocicos, largos y cortos, grandes y chicos, el mundo es un lugar más lindo con ustedes.

A mi novio, por su apoyo y comprensión, especialmente antes de los finales.

A mis abuelas, las tostadas con manteca y los rompecabezas serán efímeros, pero los recuerdos son para siempre.

A mi familia, mis primes y tíes, que me acompañan en cada paso.

A mis amigos de la vida, gracias por estar ¡y por escuchar mis audios sin quejarse (demasiado)!

A mi equipo de Patitiesas, por los maravillosos años compartidos. Simple, simple, doble; la ventana, la pared.

A mis amigos y compañeres de patín y gimnasia (del mejor club de la ciudad), por la buena energía dentro y fuera de la pista/gimnasio. *Mens sana in corpore sano.*

A la *gente de meteo*, en especial a quienes trabajan por mejorar la carrera.

A Eti, Lean, Raúl, que me han solucionado innumerables problemas con la mejor predisposición.

A toda la gente del Obser, y a Clavito y los demás perritos, que hacen que la Facultad se sienta como una segunda casa.

A mi querida UNLP, que me abrió sus puertas allá lejos y hace tiempo, cuando a los 10 años entré por sorteo a BBA.