



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Trabajo Especial

Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

Paquetes de ondas extratropicales en el hemisferio sur y su impacto sobre Uruguay

Estudiante: Roxana Sagarra Bazzano.

Orientador: Dr. Marcelo Barreiro. Departamento de ciencias de la
atmósfera, Facultad de Ciencias.

Tribunal:

Dr. Rafael Terra.

M.Sc. Álvaro Díaz.

Dra. Madeleine Renom.

Facultad de Ciencias – Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay

Agosto, 2018

Tabla de contenido

Resumen	4
Capítulo 1. Introducción	5
1.1. Paquetes de ondas de Rossby	5
1.1.1. Técnicas de rastreo	6
1.1.2. Antecedentes	6
1.2. Motivación	9
1.3. Objetivos	9
Capítulo 2. Datos y Metodología	11
2.1. Datos utilizados	11
2.2. Metodología	12
2.2.1. Algoritmo de rastreo	12
2.2.2. Análisis estadístico del conjunto de trayectorias	17
2.2.3. Análisis de un caso particular	17
Capítulo 3. Resultados y Análisis	18
3.1. Caracterización de paquetes de ondas extratropicales	18
3.1.1. Duración	19
3.1.2. Recorrido	20
3.1.3. Velocidad media	21
3.1.4. Zonas de formación y disipación	24
3.2. Variabilidad mensual del conjunto de trayectorias	26
3.3. Variabilidad interanual del conjunto de trayectorias	32
3.4. Sensibilidad del algoritmo variando el umbral	35
3.5. Caso particular	41
Capítulo 4. Síntesis y Conclusiones	46
Capítulo 5. Perspectivas	48
Bibliografía	49

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de los paquetes de ondas en el hemisferio sur durante la temporada de verano determinada por los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

Para ello, se implementó un algoritmo de rastreo a partir del cual se generó un conjunto de trayectorias de paquetes de ondas. Con este conjunto se determinaron algunas estadísticas de interés para caracterizar el fenómeno, como, duración, extensión espacial, velocidad media y zonas de formación y disipación. Además, se realizó un análisis mensual y de variabilidad interanual del conjunto obtenido, visualizando algunas de estas estadísticas mes a mes y año a año respectivamente. Dentro del análisis interanual se estudió la posible relación entre la actividad de los paquetes de ondas, caracterizada por la cantidad de paquetes encontrados y rastreados por año y los modos de variabilidad que afectan la circulación en el hemisferio sur (Modo Anular del Sur y El Niño).

Para el estudio se utilizaron datos de amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas. Este campo fue calculado en estudios previos [Barreiro, 2017] a partir del campo de velocidad meridional en 300 hPa (v_{300}) obtenido de NCEP/DOE Reanalysis2, aplicando el método de la transformada de Hilbert.

De este análisis se obtuvo que la extensión temporal de los paquetes rastreados se concentra principalmente en el rango 3-8 días, la extensión espacial se concentra en el rango 70°-120° de longitud y la velocidad media de los paquetes ronda los 21 m/s, concentrándose la mayor parte en el rango 18-24 m/s. No se registraron regiones de formación notorias, sin embargo, se observaron algunas regiones de disipación destacadas comprendidas en las franjas 30°-50° E, 130°-200° E y 320°-350° E que abarcan el Índico occidental, el Pacífico occidental y el Atlántico occidental respectivamente.

Para determinar la robustez de los resultados se realizó un análisis de sensibilidad respecto al umbral utilizado para determinar el conjunto de trayectorias. En general se obtuvieron distribuciones similares para cada estadística, confirmando que los resultados obtenidos no dependen fuertemente de los parámetros del algoritmo utilizado.

Por último, se analizó una trayectoria particular para evaluar el impacto de este fenómeno en la lluvia sobre Uruguay. Para ello, se utilizaron datos de precipitación de TRMM y se observó la presencia de acumulados importantes bajo la presencia de un paquete de ondas en altura, localizado y coherente que fue posible rastrear durante 14 días desde su comienzo en el Pacífico occidental hasta nuestra región.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Paquetes de ondas de Rossby

Un paquete de ondas puede ser pensado como un conjunto compuesto por ondas sinusoidales de distintos números de onda, que interfieren constructivamente solo sobre una pequeña región del espacio y destructivamente en el resto [Grazzini y Lucarini, 2010].

Según Grazzini y Lucarini [2010] las perturbaciones siempre están presentes en la atmósfera de latitudes medias, pero es bajo ciertas condiciones atmosféricas que los paquetes de ondas pueden permanecer coherentes por varios días y conectar regiones remotas de la atmósfera. La propagación y extensión de estos paquetes está controlada principalmente por la ubicación e intensidad del gradiente de vorticidad potencial de gran escala, que actúa como una guía de ondas y favorece que los paquetes permanezcan coherentes durante mayor tiempo [Grazzini y Vitart, 2015; Chang y Yu, 1999a; Souders et al., 2014a].

Estudios observacionales y modelado numérico han demostrado que las ondas baroclínicas tienden a organizarse en paquetes localizados que presentan velocidades de grupo mayores que las velocidades de fase de sus componentes [Orlanski y Chang 1993; Chang y Yu, 1999a] y se propagan debido al mecanismo de “desarrollo corriente abajo” que puede ser explicado brevemente como el crecimiento de nuevas perturbaciones corriente abajo de perturbaciones preexistentes, desencadenado por flujos de energía ageostróficos provenientes de perturbaciones corriente arriba [Chang y Yu, 1999a].

Como se mencionó anteriormente, en algunos casos estos paquetes de ondas son capaces de permanecer coherentes durante varios días y propagarse largas distancias, lo que permite que sean rastreados y poder representarlos de forma realista en los modelos de tiempo aumenta la predictibilidad de fenómenos en superficie que estén asociados a ellos. Esto es importante ya que numerosas investigaciones han vinculado eventos de tiempo severo en distintas regiones del globo con paquetes de ondas que permanecen coherentes [Chang, 2005; Martius et al., 2008].

Según Souders et al. [2014b] es importante generar una climatología de formación y distribución de los paquetes de ondas debido no sólo a que están relacionados a eventos de tiempo severo, sino también porque influyen en los errores de los pronósticos de mediano plazo (3-10 días). Además, son importantes para entender la dinámica

atmosférica ya que son un vínculo entre las ondas de Rossby individuales y los corredores de tormentas.

1.1.1. Técnicas de rastreo

Debido a que su propagación es fundamentalmente longitudinal y que los vientos medios son esencialmente zonales, el método más común para seguir los paquetes de ondas es la construcción de un diagrama de Hovmöller del viento meridional en 300 hPa promediado en una banda de latitudes y seguir las señales de mayor amplitud a medida que se propagan [Souders et al., 2014a]. Sin embargo, este enfoque es limitado cuando el flujo se divide o muestra meandros importantes y es sensible al cinturón de latitud que se elige para analizar. Según Chang y Yu [1999a] se pueden rastrear los paquetes de ondas de una manera relativamente sencilla siguiendo la evolución temporal de la amplitud de la envolvente del paquete. Este campo puede ser obtenido a partir del viento meridional en 300 hPa aplicando dos métodos: demodulación compleja o la técnica de la transformada de Hilbert. Este último tiene como ventaja frente al primero que no necesita elegir un único número de onda para ser aplicado [Souders et al., 2014a] sino que se aplica considerando un rango de números de onda de interés.

Una vez que se construye el diagrama de Hovmöller o se calcula la amplitud de la envolvente del paquete de ondas se emplean técnicas de rastreo basadas en características que se pueden dividir en dos tipos. Por un lado, están las que se basan en puntos y usan la identificación de máximos o mínimos significativos como objetos a ser rastreados, decidiendo únicamente sobre el extremo encontrado si un rastreo debe continuar o no. Por otro lado, están las que se basan en objetos y usan la forma completa del fenómeno atmosférico para el seguimiento, decidiendo si un rastreo debe continuar o no en función de similitud estadística, superposición o la proximidad del objeto de un paso de tiempo a otro [Souders et al., 2014a].

1.1.2. Antecedentes

La existencia de paquetes de ondas en la tropósfera alta se conoce al menos desde la década de los ochenta, pero su estudio recobró interés a partir del trabajo de Chang y Yu [1999a] que explora las características de los paquetes de ondas en la tropósfera alta en el invierno del hemisferio norte. En la figura 1 se muestra una línea de tiempo de los trabajos considerados como antecedentes. La mayor parte de los artículos revisados se enfocan en el hemisferio norte siguiendo distintas metodologías. De todas formas, vale la pena mencionar algunos cuyos resultados sirvieron para desarrollar este trabajo.

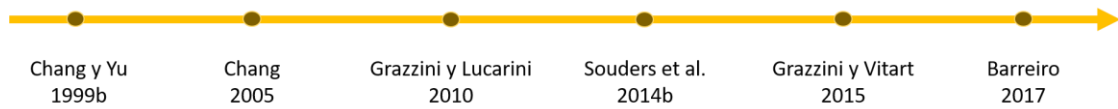


Figura 1: Línea de tiempo con los trabajos antecedentes.

Las características de la propagación de los paquetes de ondas dependen de la estación del año en consonancia con la variabilidad estacional de los corredores de tormentas. Según Chang y Yu [1999b] y Souders et al. [2014b] la reducción en la actividad de estos paquetes en el verano del hemisferio norte es más pronunciada que en el verano del hemisferio sur, que presenta paquetes extremos (de gran duración temporal y extensión espacial) durante todo el año. Esto se debe a que en el verano austral el corredor de tormentas permanece zonalmente simétrico en torno a 50°S, lo cual favorece la propagación de los paquetes y el rastreo en esta temporada.

Chang [2005] estudia la relación entre la presencia en altura de paquetes de ondas en la temporada de invierno del hemisferio norte y el desarrollo de ciclones profundos y explosivos en superficie. En su estudio concluye que la presencia de paquetes de ondas en la tropósfera alta aumenta la frecuencia de ocurrencia de este tipo de ciclones en superficie.

En Grazzini y Lucarini [2010] se realiza un estudio espectral de los paquetes de ondas en el hemisferio norte durante invierno y verano. En él se concluye que existe un fuerte ciclo estacional tanto en la composición espectral de los paquetes como en la duración y localización de estos, con máximos en invierno y mínimos en verano principalmente para paquetes compuestos por ondas largas. Haciendo referencia únicamente a los resultados obtenidos para paquetes que presentan ondas cortas (dentro del rango sinóptico), en el artículo se menciona que adquieren velocidades de propagación promedio de 22°/día hacia el este sin exhibir cambios drásticos de invierno a verano. La distribución de la extensión espacial de estos paquetes presenta un pico en 80° de longitud con una cola que alcanza valores de 200°, mientras que respecto a la duración menciona que eventos coherentes de gran duración son relativamente raros y que la mayor parte de la distribución está compuesta por eventos con duración comprendida entre 3 y 6 días según la temporada. Por último, menciona que existe una amplia zona desde el este de China hacia el Atlántico central con un pico sobre el Pacífico central que se destaca como zona de formación de paquetes de ondas y otra sobre el Atlántico central y este con un pico en 300° que se destaca como zona de disipación de paquetes de ondas.

Grazzini y Vitart [2015] estudia paquetes de ondas en el hemisferio norte en el período 1958-2012, calculando la envolvente del viento meridional en 250 hPa a través de la transformada de Hilbert y desarrollando un algoritmo de rastreo de puntos, como se

explica en la sección 1.1.1. Dentro de sus resultados menciona que se encontraron en promedio 104 paquetes por año, presentes todos los meses con mínimos en febrero y agosto y máximos en primavera y otoño. La duración promedio obtenida es de 6 días, con sólo un 21% del conjunto superando los 8 días y un 1% los 14 días. La distancia típica recorrida es de 98.9° de longitud con sólo un 10% del conjunto superando los 180°. También encuentra áreas destacadas de formación y disipación en función de la temporada estudiada y menciona que en verano la formación de los paquetes no se observa restringida a una zona particular mientras que la disipación no presenta variación estacional y se da principalmente en tres zonas, el Atlántico oriental, el área de las Rocallosas y el Mediterráneo central. Este autor menciona que una posible explicación de la climatología obtenida puede ser la distribución de las fuentes de calor diabático, que son fuertemente dependientes de la temporada. Otra posible explicación puede ser los gradientes de vorticidad potencial que controlan la fuerza y posición de la guía de ondas (fuertes gradientes producen una mayor transmisividad zonal y mayor coherencia de las ondas mientras que gradientes débiles tienden a absorber la propagación).

Souders et al. [2014b] estudia los paquetes de ondas en ambos hemisferios rastreándolos con un algoritmo basado en el seguimiento de características aplicado al campo de amplitud de la envolvente. En este estudio, se obtiene que la actividad de los paquetes de ondas casi desaparece en el verano boreal mientras que en el verano austral se mantiene constante. Expone que los paquetes duran en promedio 5.8 días y recorren una distancia de 119.2° en el hemisferio norte mientras que en el hemisferio sur duran 7.9 días y recorren una distancia promedio de 151°. Además, plantea que alrededor de un 70% de todos los paquetes duran menos de 8 días y se mueven más rápido en el hemisferio sur que en el norte con velocidades típicas entre 20-25 m/s y 15-20 m/s respectivamente. De su trabajo se desprende que los paquetes en el hemisferio sur mantienen su coherencia por más tiempo y recorren mayores distancias lo que los lleva a ser más atractivos para usarlos en la predicción del tiempo. Por último, hace referencia a la gran variabilidad interanual que presenta la actividad de los paquetes de ondas y menciona que dicha variabilidad no puede ser explicada fácilmente a partir de patrones de teleconexiones estacionales como El Niño Oscilación Sur o la Oscilación del Ártico. Sin embargo, observa que los patrones de teleconexión asociados a El Niño tienen correlaciones significativas con cambios espaciales en la actividad de los paquetes de ondas en el invierno del hemisferio norte, resaltando que inviernos Niño tienden a reducir la intensidad de los paquetes.

Barreiro [2017] estudia la variabilidad interanual de las trayectorias de los paquetes de ondas durante el verano del hemisferio sur. Encuentra que distintos patrones en el campo de temperatura de la superficie del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial durante

años Niño inducen distintas anomalías de lluvia sobre Uruguay, debido en parte a que estos patrones de TSM cambian la trayectoria de la actividad transiente.

1.2. Motivación

Uruguay se encuentra en una zona de transición ubicada entre una región al norte donde la convección húmeda profunda juega un rol fundamental en la producción de lluvias y otra al sur donde el pasaje de sistemas frontales organiza la convección. Así, a pesar de su pequeña extensión latitudinal, se ha encontrado que la variabilidad interanual de las lluvias en las regiones al norte y sur del río Negro son controladas por diferentes procesos durante la estación de verano. El sur, mayormente dominado por la entrada de frentes asociados a la variabilidad atmosférica transiente (incluyendo a los paquetes de ondas), no muestra una señal consistente al fenómeno de El Niño, mientras que el norte sí lo hace [Pisciottano et al. 1994; Barreiro 2017].

Teniendo en cuenta lo anterior y lo mencionado principalmente en la introducción en referencia a la importancia del estudio de este fenómeno, este trabajo apunta a realizar un estudio climatológico detallado de los paquetes de ondas en el hemisferio sur durante la temporada de verano, con la finalidad última de mejorar la comprensión de la variabilidad y predictibilidad atmosférica sobre Uruguay.

1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el estudio y caracterización de los paquetes de ondas extratropicales en el hemisferio sur en la temporada de verano, que comprende los meses de diciembre a marzo.

A su vez, se plantearon los siguientes objetivos específicos para organizar el trabajo:

- a) Familiarizarse con el fenómeno a través de la lectura de distintos artículos de investigación relacionados con el mismo.
- b) Implementar un algoritmo que identifique y rastree los paquetes de ondas.
- c) Confeccionar un conjunto de trayectorias a partir de este algoritmo al cual posteriormente se le calculen estadísticas de interés, por ejemplo, cantidad de

paquetes rastreados por temporada y por mes, duración, extensión espacial, velocidad media y regiones de formación y disipación. Posteriormente, a partir de estas estadísticas caracterizar el fenómeno.

- d) Estudiar la variabilidad interanual del fenómeno investigado y si existe alguna relación entre la actividad de los paquetes y el fenómeno de El Niño.
- e) Por último, elegir una trayectoria particular que resulte de interés (un paquete que permanezca coherente durante varios días y de buena extensión espacial) y estudiar la vinculación con eventos de lluvia en Uruguay.

Capítulo 2. Datos y Metodología

2.1. Datos utilizados

Para el estudio de los paquetes de ondas se utilizó el campo de amplitud de la envolvente que fue calculado en estudios previos [Barreiro, 2017] a partir del campo de velocidad meridional en 300 hPa (v_{300}) obtenido de NCEP/DOE Reanalysis2, aplicando el método de la transformada de Hilbert manteniendo números de onda entre 4 y 11 que son representativos de los transientes en el hemisferio sur [Trenberth, 1981].

Se contó con datos diarios del período enero 1979 – diciembre 2013, para todo el globo con resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

Para el análisis, se consideró únicamente la estación de verano definida desde el 1 de diciembre de cada año al 31 de marzo del año siguiente, quedando determinadas de este modo 34 temporadas. Además, el análisis se restringió únicamente al hemisferio sur y particularmente a la franja de latitud 40°S - 65°S , que se muestra con el recuadro rojo en la figura 2.

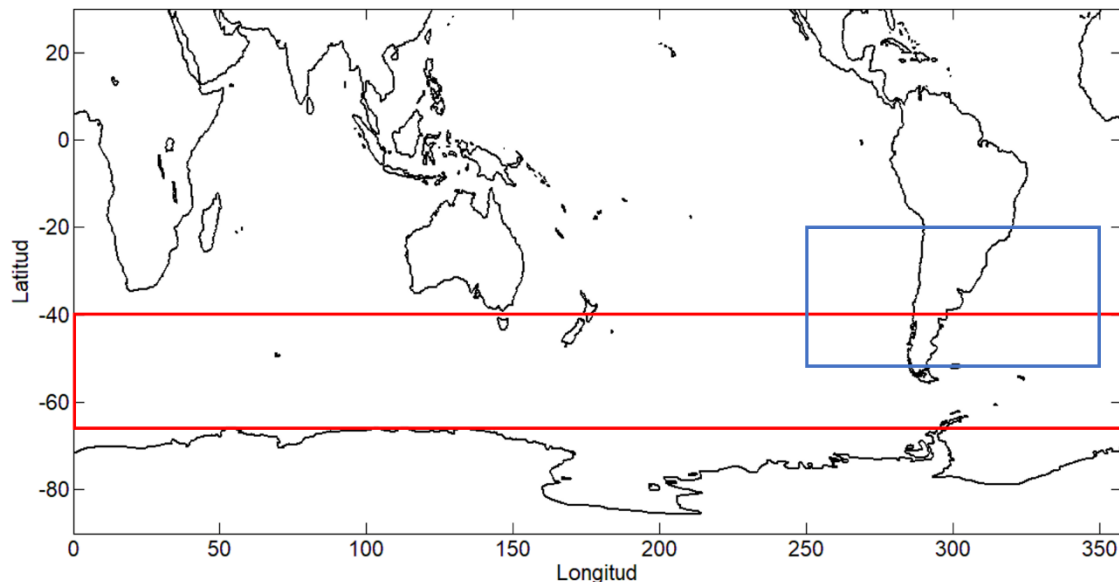


Figura 2: Dominios de estudio. Rojo: Paquetes de ondas [40°S - 65°S]. Azul: Caso particular de lluvia en Uruguay [20°S - 50°S , 250°E - 350°E].

Para el análisis del caso particular de lluvia sobre Uruguay, se utilizaron datos diarios de TRMM [Huffman, G.J. et al. 2007] para los días 12 y 13 de marzo de 2011, con resolución espacial de $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$. Se restringió el estudio al dominio $[20^{\circ}\text{S}-50^{\circ}\text{S}, 250^{\circ}\text{E}-350^{\circ}\text{E}]$ que abarca parte de América del Sur, del Océano Pacífico y del Océano Atlántico. Este dominio se muestra con el recuadro azul en la figura 2.

2.2. Metodología

2.2.1. Algoritmo de rastreo

Para construir el conjunto de trayectorias de paquetes de ondas que permitiera calcular las estadísticas de interés, se implementó un algoritmo de rastreo basado en el procedimiento desarrollado por Grazzini y Vitart [2015], con algunas modificaciones.

Previo a la aplicación del algoritmo se realizó un promedio latitudinal del campo de amplitud de la envolvente en el cinturón $40^{\circ}\text{S}-65^{\circ}\text{S}$, donde se ubica aproximadamente la guía de ondas en la temporada de verano del hemisferio sur, entendiendo que esto rescata la mayor intensidad del fenómeno [Chang y Yu, 1999a].

Además, se determinó un umbral mínimo que tiene como función definir los valores significativos a seguir de esta variable. Este umbral se entiende como un corte entre los valores de amplitud que representan la señal de los paquetes de onda y el ruido. Como se menciona en Souders et al. [2014a] no hay propiedades físicas intrínsecas al fenómeno que gobiernen los límites de un paquete de ondas y debido a esto los mismos no son fácilmente definidos como los de otros fenómenos meteorológicos y deben ser estimados, por lo que la elección del umbral mínimo es arbitraria. La elección de un umbral muy bajo permitiría el rastreo de ruido y un umbral muy alto generaría pérdida de información importante, por lo cual debe existir cierto compromiso en su elección.

En este trabajo, se determinó un rango de umbrales estudiando el comportamiento de los datos al filtrar la escala sinóptica. Para ello, se realizó un promedio temporal con una ventana móvil de 7 días dentro de cada temporada y luego se promedió en todas las longitudes obteniendo la distribución observada en la figura 3. A partir de este resultado se decidió utilizar como valor umbral para toda la temporada 15 m/s, entendiendo que valores menores representan ruido y mayores representan la escala que se quiere estudiar. Por lo tanto, todos los valores del campo de amplitud de la envolvente previamente promediado en el cinturón de latitudes mencionado que estuvieran por debajo del valor umbral se llevaron a cero, para luego aplicar el algoritmo de rastreo.

Cabe mencionar que en los trabajos de Grazzini y Vitart [2015] y Souders et al. [2014a] se utilizaron valores umbrales de 16 m/s y 14 m/s respectivamente los cuales son comparables al utilizado en este trabajo.

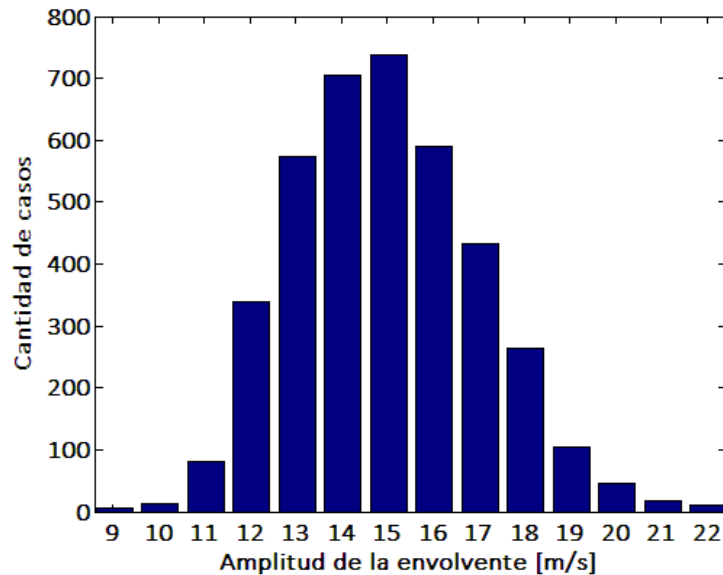


Figura 3: Distribución de datos de amplitud al filtrar la escala sinóptica con ventana móvil de 7 días.

Luego de realizar un estudio inicial con el valor umbral 15 m/s se varió dicho valor en el rango 13-18 m/s para evaluar la sensibilidad del código frente a este parámetro y de esta forma valorar su robustez.

En los siguientes puntos se encuentra sintetizado el funcionamiento del algoritmo implementado y en la figura 4 se observa el esquema de lo detallado a continuación.

- 1) Se comienza el rastreo el primer día de cada temporada (d_1), localizando la posición del valor máximo en ese día, p_1 .
- 2) Se ubica la posición del máximo del tiempo siguiente, p_2 . Para decidir si estos dos máximos corresponden al mismo paquete de ondas se chequea si p_2 se encuentra dentro del intervalo determinado por $[p_1 + 30^\circ/\text{día} \pm 15^\circ/\text{día}]$. Si esto sucede, el conjunto $\{p_1, p_2\}$ se guarda como trayectoria y se repite el procedimiento hasta que la posición del máximo del tiempo N (p_N) no pertenezca al intervalo determinado por p_{N-1} . De esta forma se obtiene la trayectoria formada por $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N-1}\}$.
- 3) En el caso que se interrumpa la rutina se vuelve al tiempo en el que se comenzó a rastrear el último paquete reconocido, hasta que no haya más paquetes en ese

día para rastrear. Cuando esto sucede se pasa al día siguiente y se repite el procedimiento descrito en 2.

- 4) Se repite el procedimiento descrito en 2 y 3 hasta que la matriz de datos original quede vacía.
- 5) Luego de obtener la matriz con las trayectorias primarias, se realiza la unión de las que pueden haber quedado cortadas. Para ello, se chequean criterios de cercanía entre el final y el comienzo de cada tramo de trayectoria y criterios de similitud respecto a la pendiente de cada tramo.
- 6) Por último, se descartan todas las trayectorias de menos de 3 días.

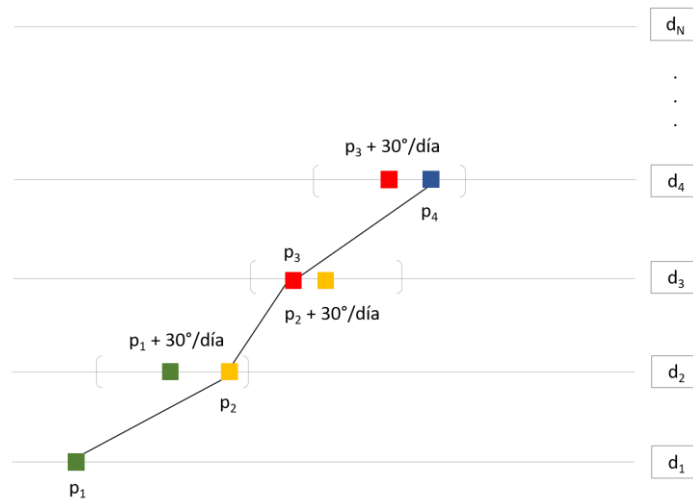


Figura 4: Esquema del funcionamiento del algoritmo de rastreo. p_1 , p_2 , p_3 y p_4 son las posiciones de los máximos en los niveles 1,2,3 y 4 respectivamente. Cada nivel representa un día de la temporada considerada para el rastreo.

En el punto 2 del procedimiento se hace referencia a un intervalo para decidir si dos máximos consecutivos pertenecen a un mismo paquete de ondas. Este intervalo se determina en cada paso del rastreo a partir de la posición del máximo del tiempo anterior, que se considera que se mueve con una velocidad promedio de $30^\circ/\text{día}$.

Cabe mencionar que siempre que se comienza una rutina, salvo para el primer día de cada temporada, se busca la posición del máximo en el tiempo anterior, con el fin de facilitar la unión posterior de trayectorias cortadas. El algoritmo calcula la posición de este máximo de dos formas distintas. A partir de un intervalo al que llamamos pequeño determinado por $[p_i - 30^\circ/\text{día} \pm 15^\circ/\text{día}]$, donde p_i es la posición del máximo en el

tiempo que el algoritmo comienza el rastreo o a partir de otro intervalo que contiene al anterior al que llamamos intervalo grande determinado por los límites del paquete en el día $i - 1$. La decisión de qué máximo conservar se realiza al concluir el rastreo y depende de la cercanía entre los dos máximos encontrados, de la posición relativa respecto al máximo del tiempo i y de la pendiente del primer tramo de la trayectoria respecto a la pendiente del resto de la trayectoria. Por esto, los tramos de trayectorias determinados hacia atrás en el tiempo no necesariamente deben tener pendientes comprendidas en el rango 15-45°/día.

Los criterios mencionados en el punto 5 para la unión de tramos de trayectorias implican que dos trayectorias se pueden unir si el final de una y el comienzo de la otra pertenecen al mismo día o a dos días contiguos, si están a una distancia menor a 10° de longitud que equivale a 1000 km aproximadamente y si la diferencia entre las pendientes de cada tramo es menor a 20°/día.

Estos parámetros se ajustaron chequeando visualmente las 34 temporadas y eligiendo los que dieron mejores resultados, llegando a la conclusión de que en la mayoría de los casos el algoritmo resolvió bien el problema de identificación y rastreo. Sin embargo, se observó que existen algunos casos en los que el algoritmo sigue efectivamente las condiciones de rastreo, pero no obtiene trayectorias ideales. Es el caso de la determinación de una sola trayectoria que visualmente podría considerarse como dos o más trayectorias y la determinación de una trayectoria de longitud mayor a la que se obtendría con un análisis visual al unir máximos casi aislados debido al valor del umbral elegido para recortar el campo.

Estos dos tipos de trayectorias se presentan en la figura 5. La trayectoria 1 (rosado) es la unión de lo que podrían ser tres trayectorias si se realizara el análisis visualmente, una de 300°-340°E, otra de 50°-200°E y otra de 220°-270°E. La trayectoria 2 (azul) une en los primeros 4 días del rastreo máximos aislados que al aumentar el valor umbral desaparecen como se observa en la figura 6. En ella se observa que la trayectoria 2 (azul) se resuelve mejor con un umbral mayor pero la trayectoria 1 (rosado) sigue presentando la misma dificultad.

Estos resultados pueden llevar a una sobreestimación del tiempo de vida y el recorrido de los paquetes de ondas.

Por último, se debe mencionar que al trabajar con temporadas DEFM se contó con períodos de 121 días y 122 días en función de si el año fue o no bisiesto. Por esto, fue necesario separar las temporadas de 121 días de las de 122 días para aplicar el algoritmo y calcular las estadísticas. Luego, se unieron los resultados teniendo en cuenta la posición de cada temporada en el período total. Otra dificultad que surgió al momento de aplicar el algoritmo fue el corte del campo en 0°. Para resolverla se repitió el campo tres veces

previo a la aplicación del algoritmo y se descartaron las trayectorias repetidas al final del procedimiento conservando siempre las más extensas.

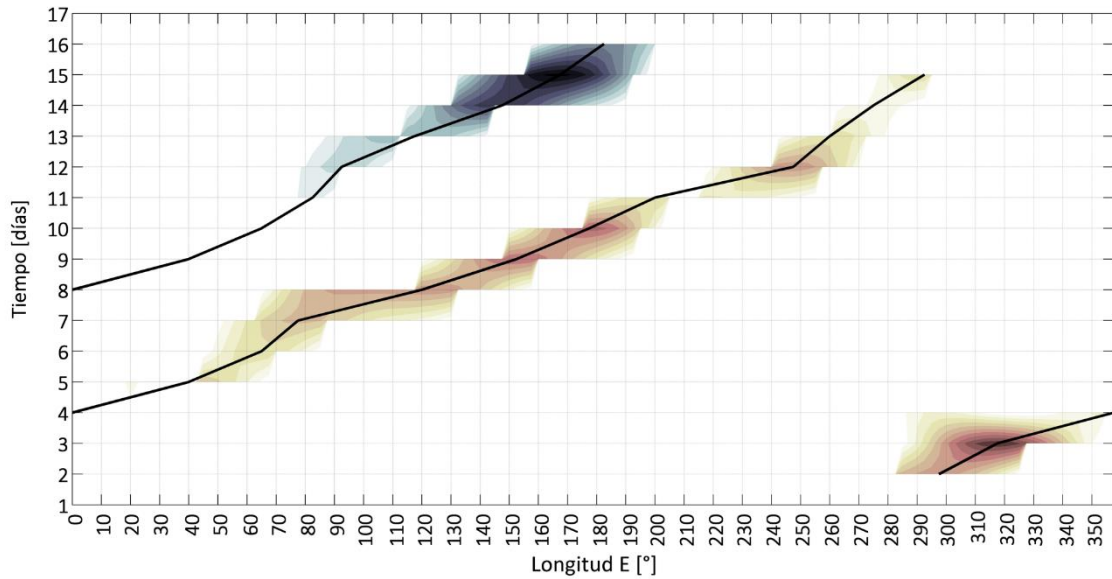


Figura 5: Resultado del algoritmo con umbral 15 m/s. Trayectoria 1 en rosado y trayectoria 2 en azul. Sombreado se muestra el campo de amplitud de la envolvente promediado en el cinturón 40°-65°S y con línea sólida las trayectorias halladas.

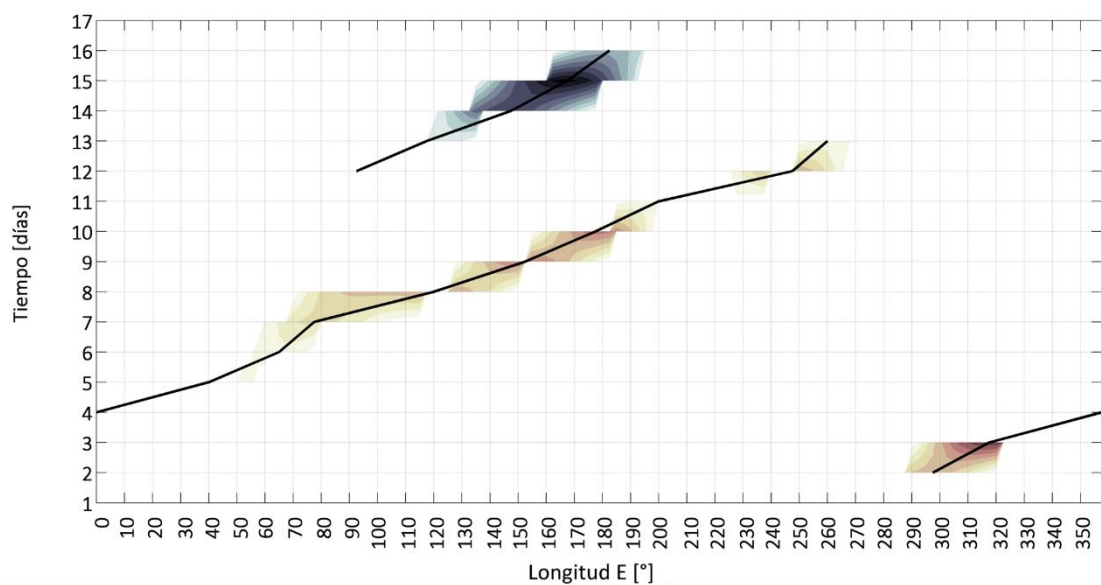


Figura 6: Resultado del algoritmo con umbral 18 m/s. Trayectoria 1 en rosado y trayectoria 2 en azul. Sombreado se muestra el campo de amplitud de la envolvente promediado en el cinturón 40°-65°S y con línea sólida las trayectorias halladas.

2.2.2. Análisis estadístico del conjunto de trayectorias

Determinadas las trayectorias de los paquetes de ondas, se calcularon las siguientes estadísticas: duración, extensión espacial, velocidad media y zonas de formación y disipación.

La duración o tiempo de vida de los paquetes se calculó como $L - 1$, siendo L el largo de las trayectorias determinadas. Como se trabajó con datos diarios la duración quedó expresada en días.

La extensión espacial o recorrido de cada paquete de ondas, se determinó como la diferencia entre las longitudes del último punto de la trayectoria, x_f , y del primero, x_i .

La velocidad media de cada trayectoria se determinó como el cociente entre la distancia recorrida en ° y la duración en días. Este resultado luego se expresó en m/s considerando la equivalencia: $1^\circ/\text{día} \sim 0.82 \text{ m/s}$ para el círculo de latitud considerado.

Las zonas de formación se determinaron a partir de la posición del primer punto de la trayectoria y las de disipación a partir del último.

Se estudió la variabilidad mensual del conjunto determinado y de estas estadísticas dentro de la temporada analizada (DEFM) y también la variabilidad interanual del conjunto calculando la cantidad de trayectorias por temporada y vinculando estos resultados con años Niño y Niña clasificados a partir del índice ONI de NOAA.

Por último, se evaluó la sensibilidad del algoritmo frente al umbral seleccionado calculando nuevamente las estadísticas mencionadas y variando el umbral en el rango 13-18 m/s.

2.2.3. Análisis de un caso particular

Del conjunto de trayectorias generado se eligió una que presentara gran extensión temporal y espacial y que estuviera próxima a la región marcada con el cuadro azul de la figura 2. También se tuvo en cuenta que se tiene acceso a datos TRMM a partir del año 2000 lo que condicionó la búsqueda de trayectorias a años donde hubiera disponibilidad de datos de ambos campos.

Posteriormente se determinó el rango de días en el que el paquete de ondas estuvo próximo a la región recuadrada en azul de la figura 2 y para dicho rango se observó la situación sinóptica y el campo de amplitud de la envolvente de los paquetes vinculando estos resultados con la lluvia acumulada en la región.

Capítulo 3. Resultados y Análisis

3.1. Caracterización de paquetes de ondas extratropicales

Previo a realizar el estudio estadístico del conjunto de trayectorias se calculó la climatología y la desviación estándar del campo de amplitud de la envolvente para observar su estructura espacial y la variabilidad de los datos. Esto se presenta en las figuras 7 y 8 respectivamente.

En estas figuras se observa que este campo tiene valores mínimos en promedio en la región tropical y polar y valores máximos en promedio en latitudes medias. Particularmente para los datos trabajados en el cinturón 40° - 65° S se observan valores en el rango 10-20 m/s en promedio. La desviación estándar muestra que la mayor variabilidad de los datos coincide con las regiones donde se observan mayores valores de amplitud.

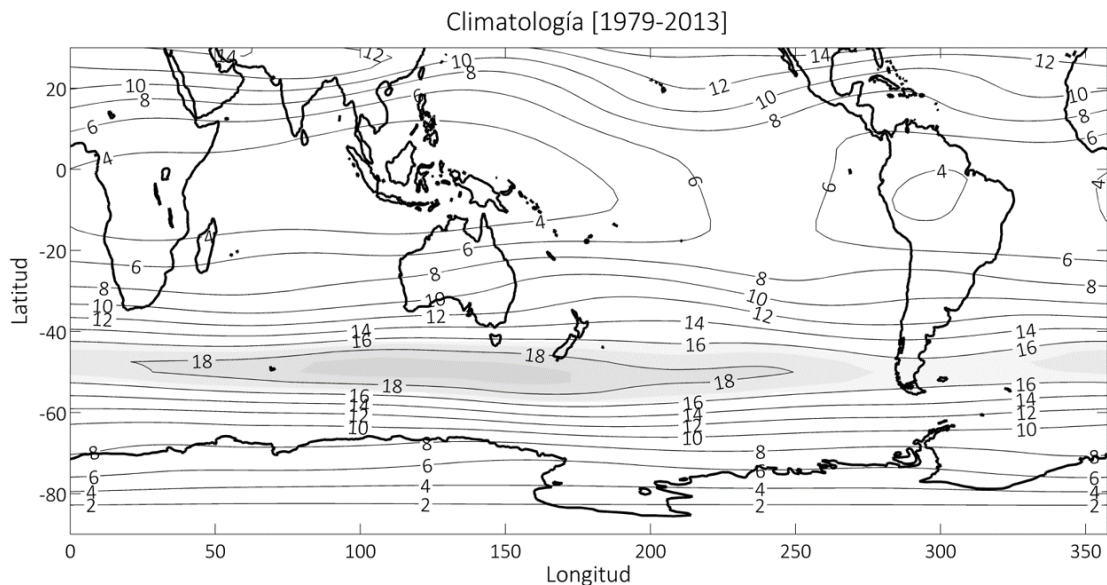


Figura 7: Climatología del campo amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas promediada en la temporada DEFM. Contornos cada 2 m/s y sombreado los valores superiores a 15 m/s.

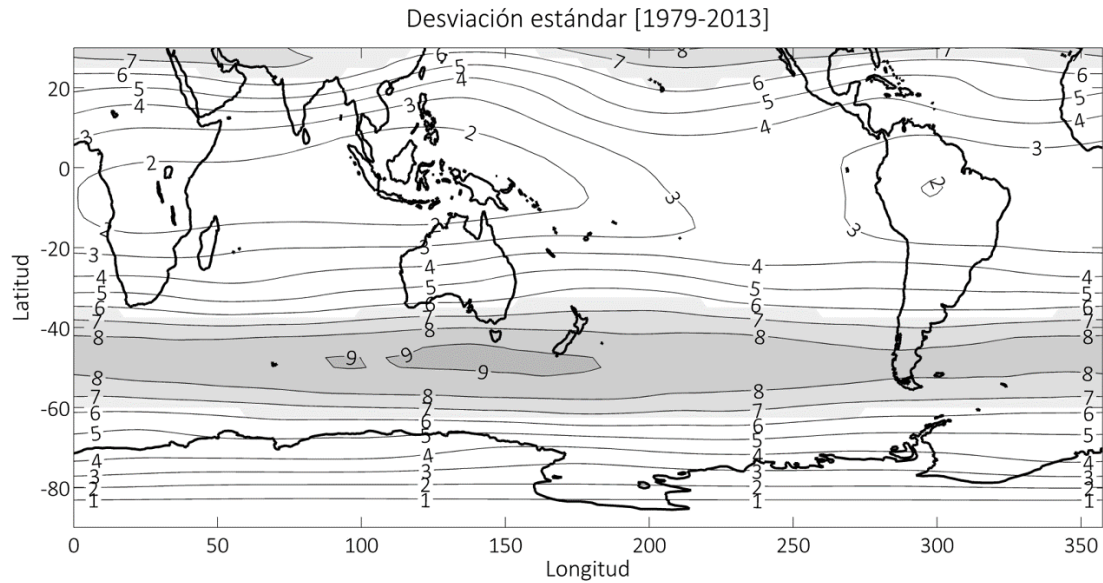


Figura 8: Desviación estándar del campo amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas en la temporada DEFM. Contornos cada 1 m/s y sombreado los valores superiores a 6 m/s.

Como se mencionó en secciones anteriores, se calculó una serie de estadísticas del conjunto de trayectorias para caracterizar los paquetes de ondas, entre ellas: duración, recorrido, velocidad media y zonas de formación y disipación. Los resultados que se presentan a continuación se obtuvieron considerando en el rastreo un valor umbral de 15 m/s.

Aplicando el algoritmo de rastreo con los parámetros descritos en 2.2.1. se obtuvieron 1099 trayectorias en el período considerado, contando en promedio 32 paquetes por temporada (DEFM). Este resultado es similar al obtenido por Grazzini y Vitart [2015] en el hemisferio norte en el que rastrean 104 paquetes por año dando un promedio de 35 paquetes por cuatrimestre.

3.1.1. Duración

La distribución de esta variable se observa en la figura 9 donde se aprecia una distribución asimétrica sesgada positivamente con una cola que alcanza la veintena de días. El límite inferior del conjunto es 3 días y el superior es 23 días.

Como se mencionó en la sección 2.2.1. las trayectorias con duración menor a 3 días fueron descartadas por lo que el límite inferior fue fijado con anterioridad.

Alrededor del 90% de las trayectorias halladas se concentran en el rango 3-8 días, un 8% en el rango 8-14 días y sólo un 2% supera los 14 días. La media del conjunto es 4 días y la desviación estándar es 2.6 días.

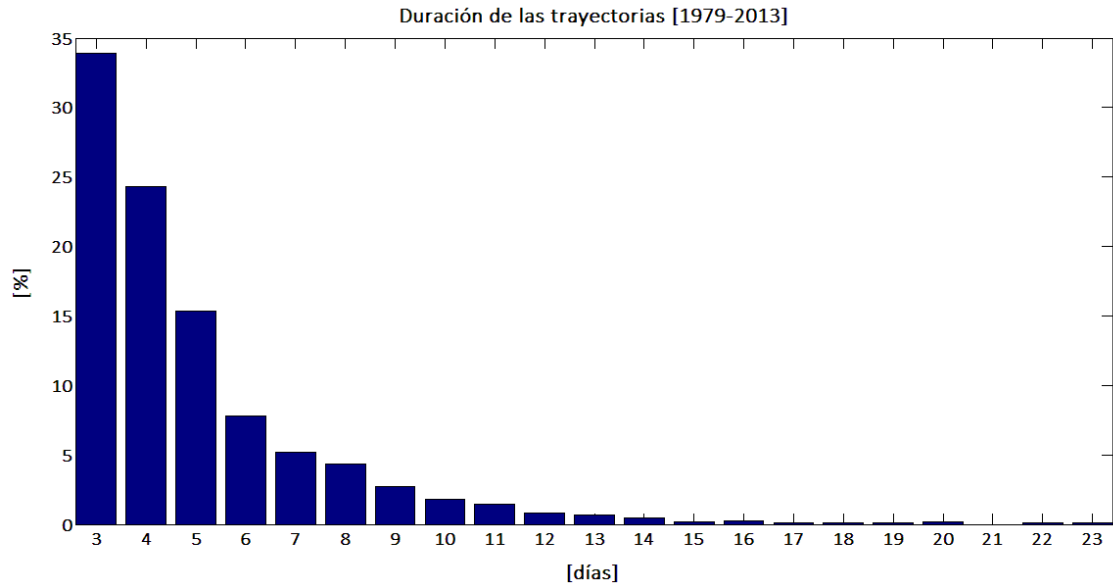


Figura 9: Distribución de la duración de las trayectorias en días. El gráfico está expresado en porcentaje sobre un total de 1099 trayectorias para todo el período.

3.1.2. Recorrido

En la figura 10 se presenta la distribución de esta variable. En ella se observa una distribución asimétrica sesgada positivamente con una cola que supera los 360° de longitud. Es decir, en algunos casos el paquete de ondas da más de una vuelta al planeta manteniendo su coherencia.

Alrededor del 80% de las trayectorias obtenidas se encuentran concentradas en el rango 30°-170° de longitud con un máximo en torno a 88° y sólo un 2% supera los 360° de longitud. Estos resultados son similares a los obtenidos por Souders et al. [2014b].

El mínimo del conjunto es 12° y el máximo es 585°, la media es 125° y la desviación estándar es 80°.

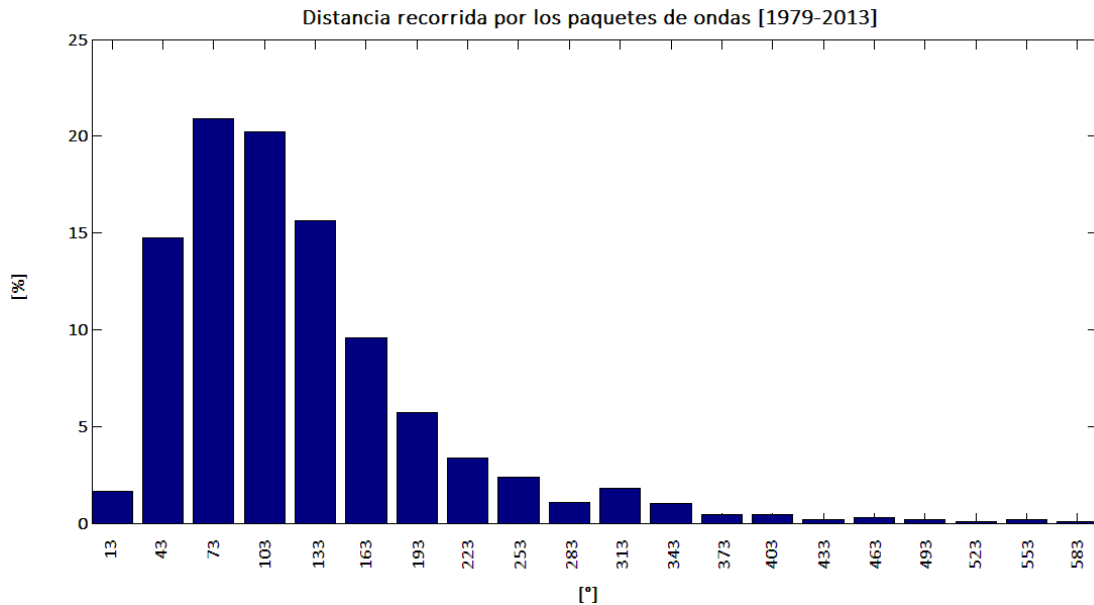


Figura 10: Distribución de la distancia recorrida por los paquetes de ondas en ° de longitud. El gráfico está expresado en porcentaje sobre un total de 1099 trayectorias para todo el período.

3.1.3. Velocidad media

La distribución de esta variable se observa en la figura 11. En comparación con las distribuciones de las variables anteriores muestra poco sesgo hacia valores pequeños y puede considerarse aproximadamente simétrica en torno a 20 m/s. El 78% de los paquetes rastreados se concentran en el rango 15-30 m/s, similar a los resultados presentados por Souders et al. [2014b]. La media del conjunto es 20 m/s y la desviación estándar 6.6 m/s.

Como se mencionó en la sección 2.2.1. en relación con los intervalos que se utilizan para determinar los máximos a seguir del paquete en tiempos anteriores y posteriores al comienzo del rastreo, es posible encontrar trayectorias con pendientes menores a 12 m/s y mayores a 37 m/s (15 °/día y 45 °/día respectivamente) ya que el algoritmo tiene permitido unir tramos de trayectorias que inician y finalizan cerca y tienen pendientes similares y de esta forma se puede modificar la pendiente de la trayectoria completa al unir varios tramos de trayectorias. Esto se observa en la figura 11 donde el mínimo del conjunto es 3 m/s y el máximo 39 m/s.

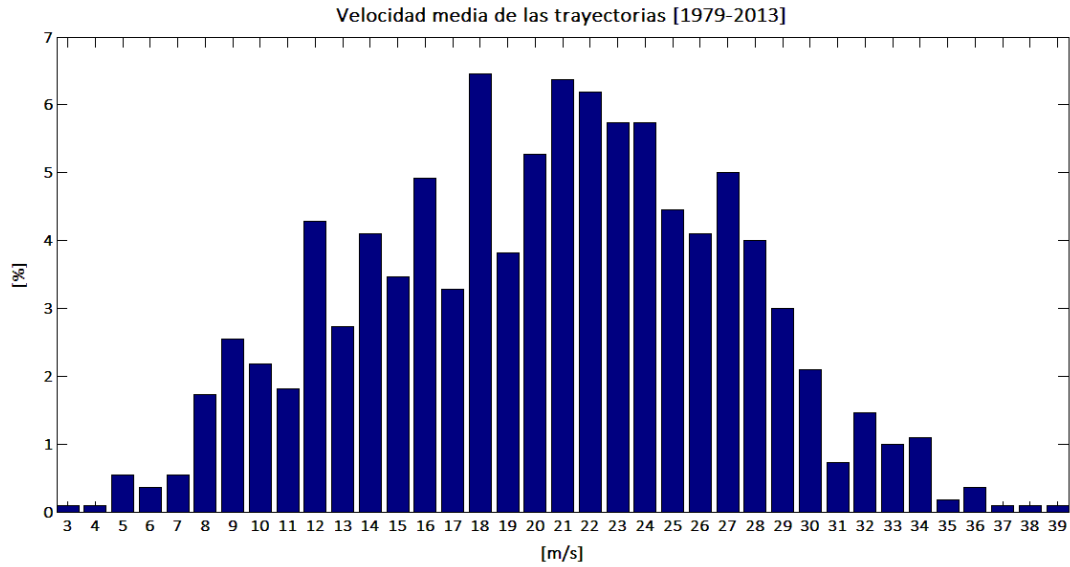


Figura 11: Distribución de velocidad media de las trayectorias en m/s. El gráfico está expresado en porcentaje sobre un total de 1099 trayectorias para todo el período.

Como ejemplo en las figuras 12 y 13 se presentan las resoluciones del algoritmo frente al rastreo de dos paquetes de ondas particulares. En cada figura, en la imagen de la izquierda se observa cada tramo de trayectoria determinado por el algoritmo y en la imagen de la derecha la resolución final del algoritmo interpretando los distintos criterios de unión de tramos de trayectorias.

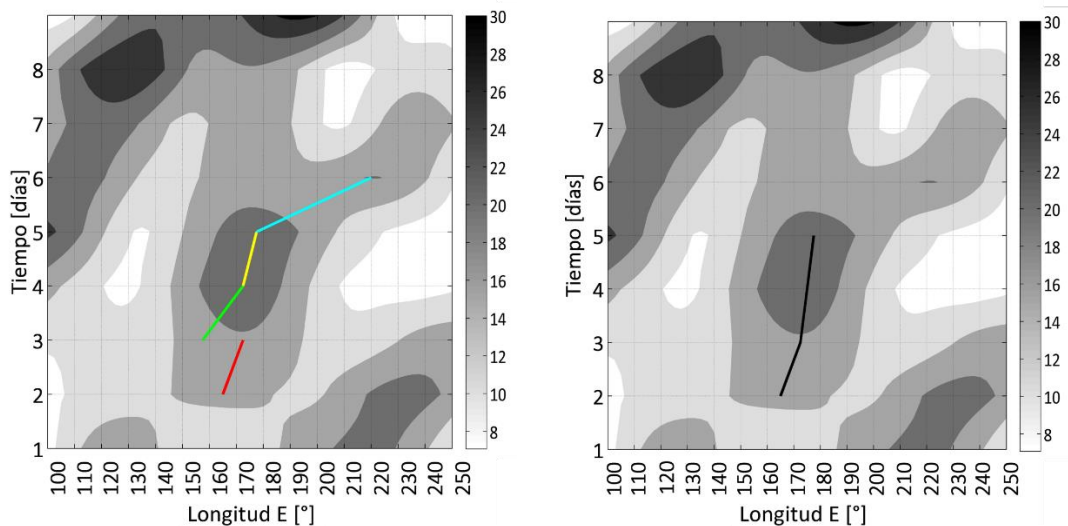


Figura 12: Ejemplo 1: resolución del algoritmo con umbral 15 m/s. (Izq) Resolución primaria siguiendo criterios de rastreo. Cada color determina un tramo de trayectoria independiente. (Der) Resolución secundaria siguiendo criterios de unión de tramos de trayectorias. La zona sombreada representa el campo de amplitud de la envolvente promediado en el cinturón 40°-65° S en m/s.

En el caso de la figura 12 el algoritmo comienza el rastreo el día 3 y busca hacia atrás en el tiempo desde el punto ubicado en 172.5° , primero busca en el intervalo pequeño $[p_i - 30^\circ/\text{día} \pm 15^\circ/\text{día}]$ y luego busca en el intervalo grande determinado por los bordes del paquete en dicho día al recortar el campo con el umbral, como se explicó en la sección 2.2.1. Determina los máximos de ambos intervalos y decide con cual quedarse en función de cercanía entre dichos máximos y posición relativa respecto a p_i . Debido a esto hay tramos de trayectorias que tienen pendientes menores a 12 m/s, que es lo que sucede en los tramos rojo y amarillo de la figura 12. En el tramo verde esto no sucede porque el máximo del intervalo grande cae a la derecha de p_i y el algoritmo no tiene permitido tomar máximos a la derecha de la posición inicial del rastreo cuando busca hacia atrás. El tramo celeste resuelve las condiciones de rastreo de forma ideal tomando el máximo anterior en el intervalo pequeño. En el momento de unir los tramos, el algoritmo une trayectorias cortadas en un mismo día o en un día consecutivo. El tramo verde lo descarta porque no tiene permitido unir un final de trayectoria con un principio que esté a la izquierda de este, por lo que une directamente el tramo rojo con el amarillo, ya que están separados por un día y por menos de 10° de distancia además tienen pendientes similares. Al evaluar la unión con el tramo celeste falla el criterio de pendientes similares por lo que este tramo es descartado y la trayectoria queda como se muestra en la imagen de la derecha de la figura 12.

En el caso de la figura 13 sucede algo similar, pero hacia el otro extremo. El algoritmo comienza rastreo el día 3 en el punto ubicado alrededor de 20° , rastreando el máximo en el tiempo anterior y sigue el rastreo un día después de forma ideal. En el día 4 se suspende el rastreo y se retoma en el día 5 en el punto alrededor de 110° ubicando el máximo en el tiempo anterior en el intervalo pequeño. Al unir las trayectorias los tramos cumplen los criterios de cercanía entre el final y el comienzo y de pendientes similares por lo que la trayectoria final es la unión de los dos tramos como se ve en la imagen de la derecha de la figura 13.

Estos son los casos de 3 m/s y de 39 m/s que se observan en la figura 11 y como se explicó estas velocidades medias fuera del rango 12-37 m/s son el resultado de la aplicación de los criterios de unión de trayectorias. Estos son paquetes de ondas que existen, pero se mueven más lento o más rápido que el rango promedio que se consideró para realizar el rastreo y se rescatan gracias a que se considera la unión hacia atrás descrita anteriormente.

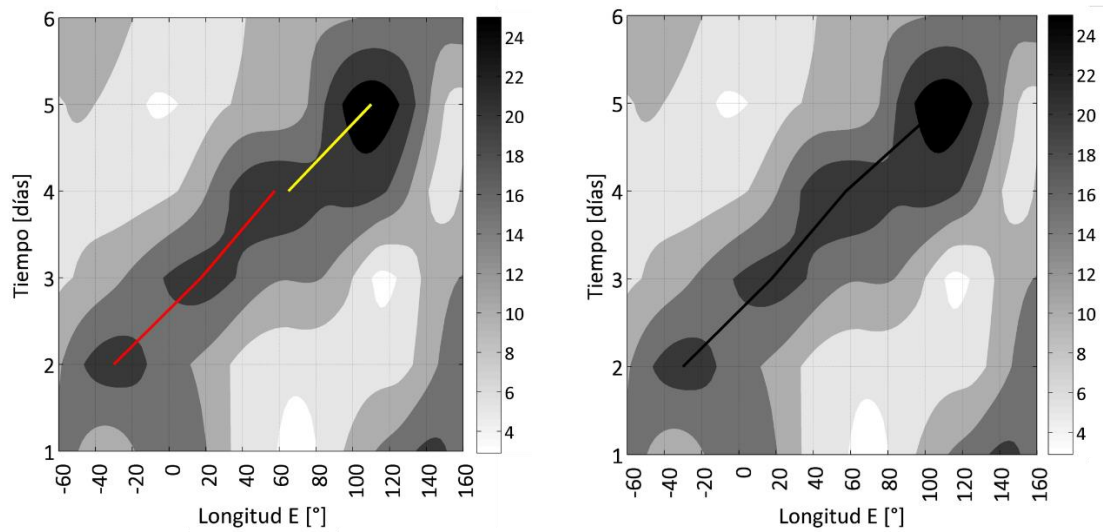


Figura 13: Ejemplo 2: resolución del algoritmo con umbral 15 m/s. (Izq) Resolución primaria siguiendo criterios de rastreo. Cada color determina un tramo de trayectoria independiente. (Der) Resolución secundaria siguiendo criterios de unión de tramos de trayectorias. La zona sombreada representa el campo de amplitud de la envolvente promediado en el cinturón 40°-65° S en m/s.

3.1.4. Zonas de formación y disipación

Las zonas de formación o comienzo de las trayectorias se presentan en la figura 14 y las zonas de disipación o final de las trayectorias en la figura 15.

No se observan zonas destacadas de formación sino máximos y mínimos relativos distribuidos uniformemente en todo el rango de longitudes.

En la distribución de los finales de las trayectorias se destacan algunas regiones de máximos comprendidas en las franjas 30°-50° E, 130°-200° E y 320°-350° E que abarcan el Índico occidental, el Pacífico occidental y el Atlántico occidental respectivamente. La media de este conjunto es 184° y la desviación estándar 96°.

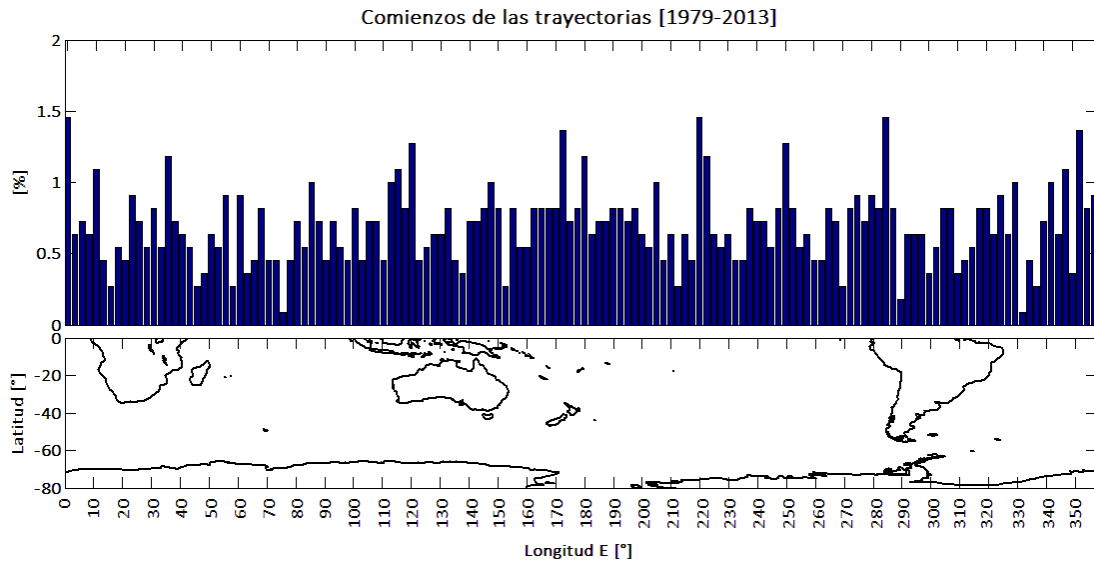


Figura 14: Distribución de las zonas de comienzo de las trayectorias obtenidas. El gráfico está expresado en porcentaje sobre un total de 1099 trayectorias para todo el período.

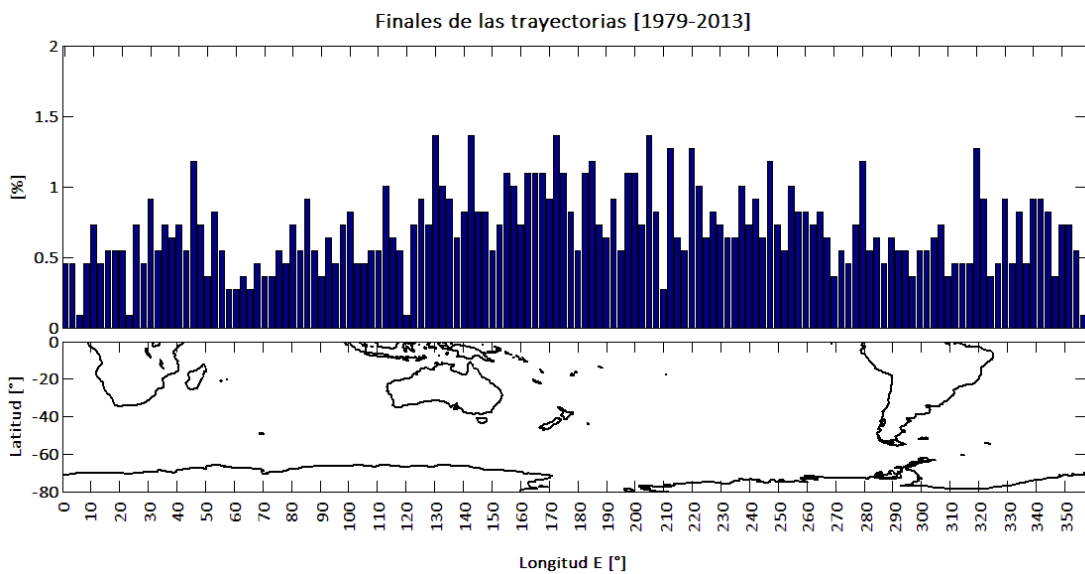


Figura 15: Distribución de las zonas de finalización de las trayectorias obtenidas. El gráfico está expresado en porcentaje sobre un total de 1099 trayectorias para todo el período.

3.2. Variabilidad mensual del conjunto de trayectorias

En este análisis se buscó observar cómo varían las estadísticas presentadas en la sección anterior mes a mes dentro de la temporada de verano. Para ello, se clasificaron las trayectorias obtenidas dentro de cada mes de la temporada en función del primer día rastreado.

Antes de analizar las estadísticas se observó el promedio temporal del campo de amplitud de la envolvente para cada mes, lo cual se presenta en la figura 16. En ella se observan estructuras similares para los cuatro meses, con valores mínimos en zonas tropicales y polares y valores máximos en latitudes medias.

Si se compara mes a mes se observa un máximo del campo en la franja 40° - 60° S entre 100° E y 200° E durante los cuatro meses, con valores en diciembre y febrero levemente inferiores a los de enero y marzo. A su vez, la franja de valores máximos en 40° - 60° S parece estar menos dispersa latitudinalmente en marzo que en diciembre.

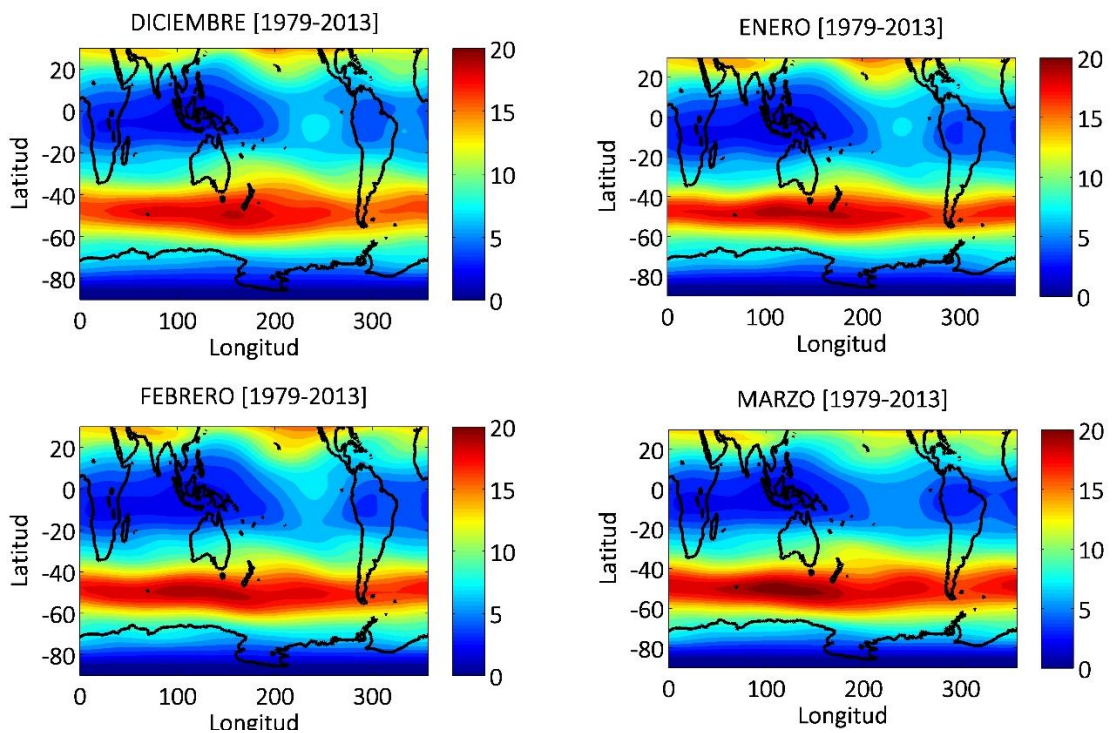


Figura 16: Climatología del campo de amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas para cada mes de la temporada DEFM expresada en m/s.

En el gráfico de la figura 17 se observa la cantidad de trayectorias obtenidas por mes, destacándose un máximo en diciembre y un mínimo en febrero como se detalla en la tabla 1. Esta distribución de paquetes de ondas es similar a la obtenida por Grazzini y Vitart [2015] para la temporada de verano del hemisferio norte.

Cantidad de trayectorias por mes			
Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
296	268	263	272

Tabla 1.

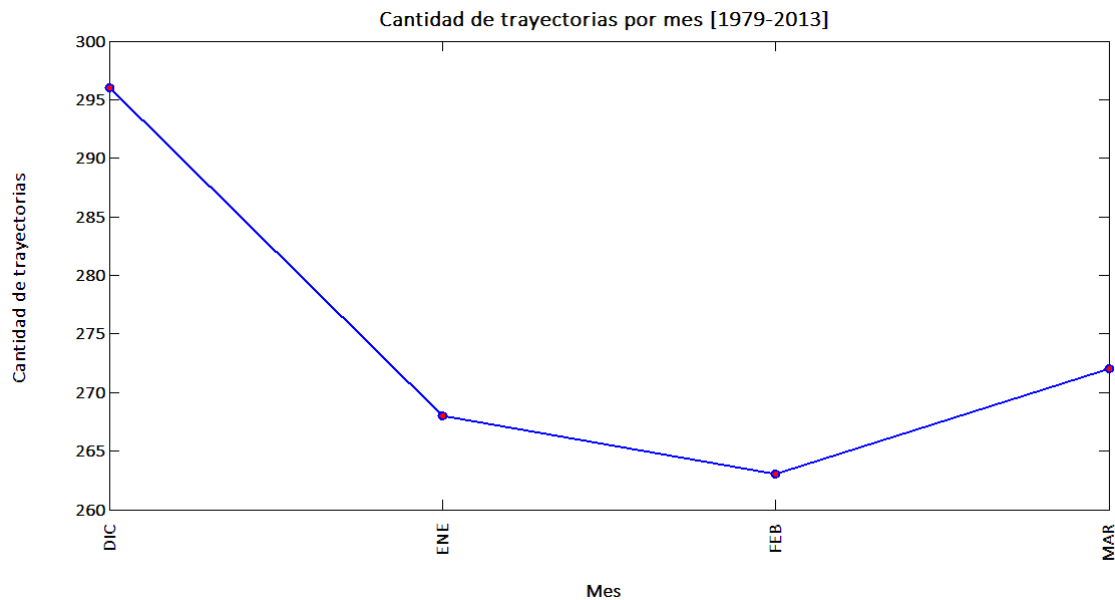


Figura 17: Variabilidad mensual del conjunto de trayectorias obtenido utilizando como valor umbral 15 m/s.

En los siguientes párrafos se presentan los resultados obtenidos para las distintas estadísticas estudiadas. A grandes rasgos se obtienen distribuciones similares tanto en la forma como en los valores alcanzados a las presentadas en la sección 3.1.

Duración

En la figura 18 se presenta esta variable y en ella se observan distribuciones asimétricas sesgadas positivamente en los cuatro meses. Alrededor del 90% de los casos hallados se concentran en el rango de 3-8 días y se observan casos aislados en la cola de las distribuciones que en algunos meses llega hasta la veintena de días.

Particularmente en marzo se observa un aumento en los casos de corta duración y una disminución en los casos de larga duración.

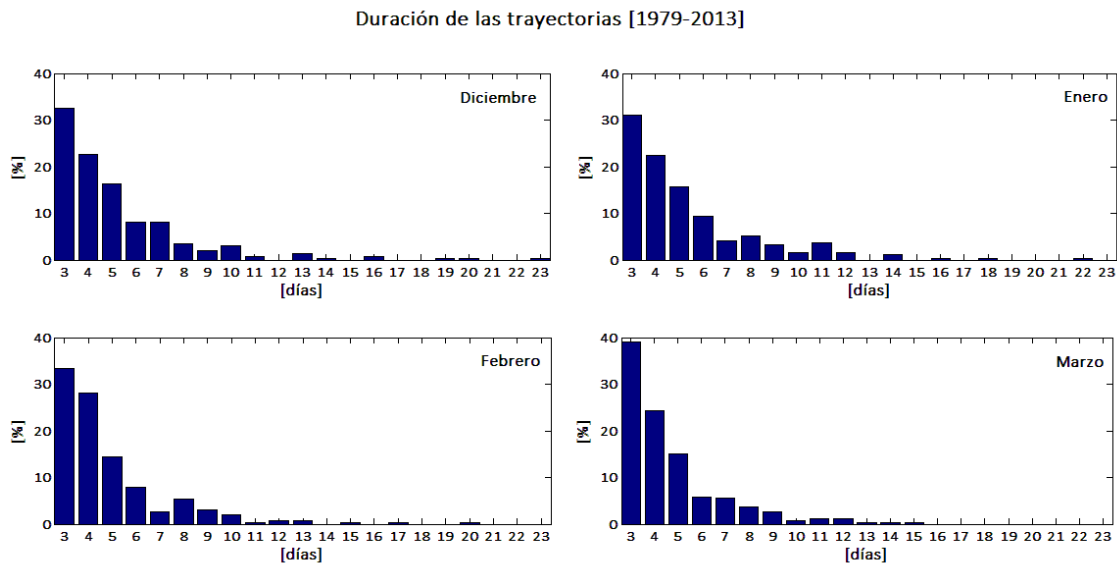


Figura 18: Distribución de la duración de las trayectorias en días, separadas por mes: diciembre, enero, febrero y marzo. Los gráficos están expresados en porcentaje sobre el total de trayectorias para cada mes según tabla 1.

Recorrido

En la figura 19 se presenta la distribución de las distancias recorridas por los paquetes de ondas y en ella se observan distribuciones similares para los cuatro meses, asimétricas sesgadas positivamente y con colas que superan los 360° de longitud.

También se observa cierta similitud entre las distribuciones de diciembre y febrero y entre las de enero y marzo en función del rango donde concentran la mayor cantidad de casos y como se distribuyen en ese rango. En particular, marzo presenta igual número de paquetes que recorren distancias entre 43° a 133° , mientras que febrero muestra un máximo marcado alrededor de 73° .

En los cuatro meses alrededor del 80% de los casos se concentran en el rango 30°-170° de longitud y en marzo se obtienen trayectorias extremas de menor longitud, consistente con la menor duración del paquete.

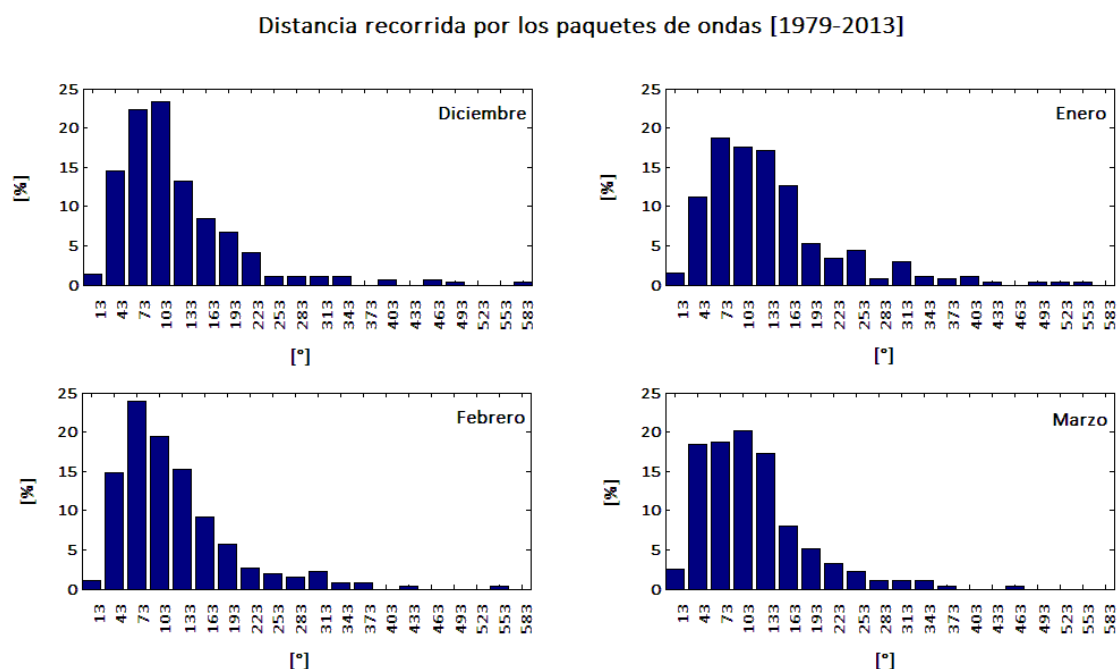


Figura 19: Distribución de la distancia recorrida por los paquetes de ondas en ° de longitud, separadas por mes: diciembre, enero, febrero y marzo. Los gráficos están expresados en porcentaje sobre el total de trayectorias para cada mes según tabla 1.

Velocidad media

En la figura 20 se observa la distribución de esta variable para los cuatro meses. En ella se destaca la similitud entre las distribuciones de diciembre y enero y entre las de febrero y marzo, principalmente en la forma y el rango que concentra la mayor cantidad de casos.

En diciembre alrededor del 60% de los casos se concentran en el rango 18-24 m/s con un máximo en torno a 21 m/s, en enero el 60% se concentran en el rango 21-27 m/s con un máximo en torno a 24 m/s, en febrero el 75% se concentra en el rango 15-27 m/s y en marzo el 70% se concentra en el rango 15-27 m/s. En estos dos últimos meses se observa que en esos rangos no hay velocidades que concentren mayor cantidad de casos, sino que se distribuyen de forma uniforme dentro del rango.

De lo anterior se desprende que los paquetes de ondas en su mayoría, durante diciembre se desplazan más lento que durante enero.

Velocidad media de las trayectorias [1979-2013]

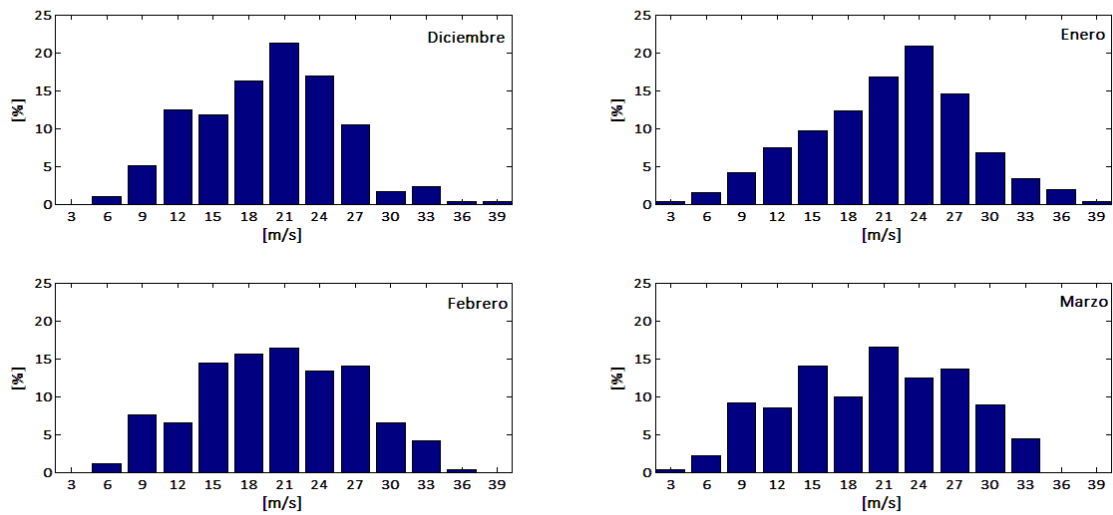


Figura 20: Distribución de la velocidad media de las trayectorias en m/s, separadas por mes: diciembre, enero, febrero y marzo. Los gráficos están expresados en porcentaje sobre el total de trayectorias para cada mes según tabla 1.

Zonas de formación y disipación

Los resultados para las zonas de formación y disipación se presentan en las figuras 21 y 22 respectivamente y en ellos no se observa gran variabilidad mensual para las dos variables.

Respecto a los comienzos de las trayectorias (figura 21) se observan algunas zonas de máximos y mínimos durante todo el período, pero no se destaca una zona de formación en particular, sino la distribución cuasi-uniforme de esta variable en todo el rango de longitudes.

Respecto a los finales de las trayectorias (figura 22), durante diciembre y enero se observa una mayor cantidad de casos distribuidos en torno a 180° E y esto es más notorio durante enero. Durante febrero y marzo parecen estar mejor distribuidos a lo largo de todo el rango de longitudes, aunque en marzo se observa mayor contribución en torno a 130° E y 260° E.

Comienzos de las trayectorias [1979-2013]

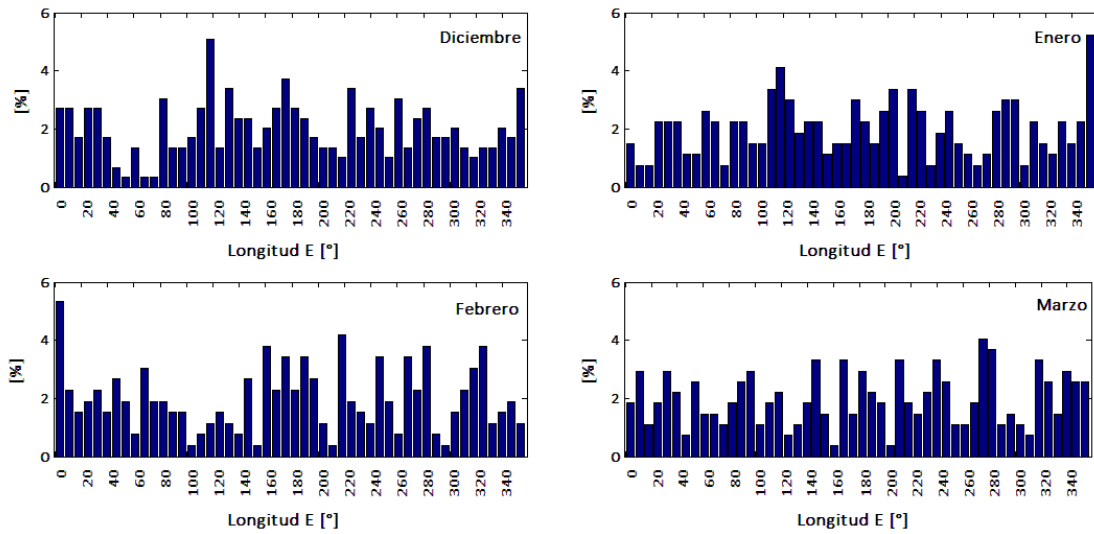


Figura 21: Distribución de las zonas de formación de las trayectorias obtenidas separadas por mes: diciembre, enero, febrero y marzo. Los gráficos están expresados en porcentaje sobre el total de trayectorias para cada mes según tabla 1.

Finales de las trayectorias [1979-2013]

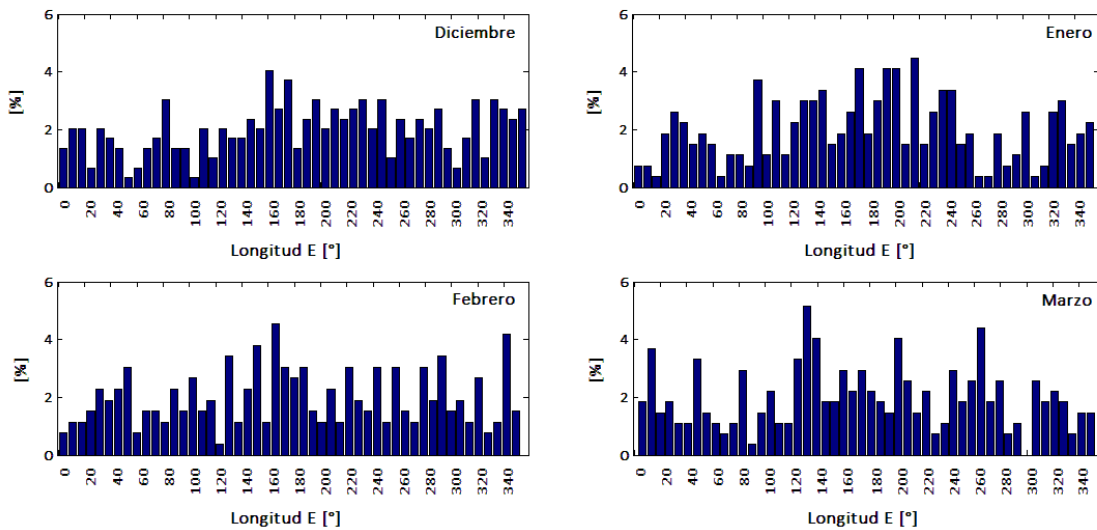


Figura 22: Distribución de las zonas de disipación de las trayectorias obtenidas separadas por mes: diciembre, enero, febrero y marzo. Los gráficos están expresados en porcentaje sobre el total de trayectorias para cada mes según tabla 1.

3.3. Variabilidad interanual del conjunto de trayectorias

Para estudiar la variabilidad interanual del conjunto obtenido, primero se calculó la cantidad de trayectorias determinadas por temporada. Este resultado se presenta en la figura 23, donde se observa gran variabilidad interanual del conjunto con un mínimo de 26 trayectorias en las temporadas D1989-M1990 y D1992-M1993 y un máximo de 41 trayectorias en la temporada D1999-M2000. La media del conjunto es 32 trayectorias y la desviación estándar es 4 trayectorias.

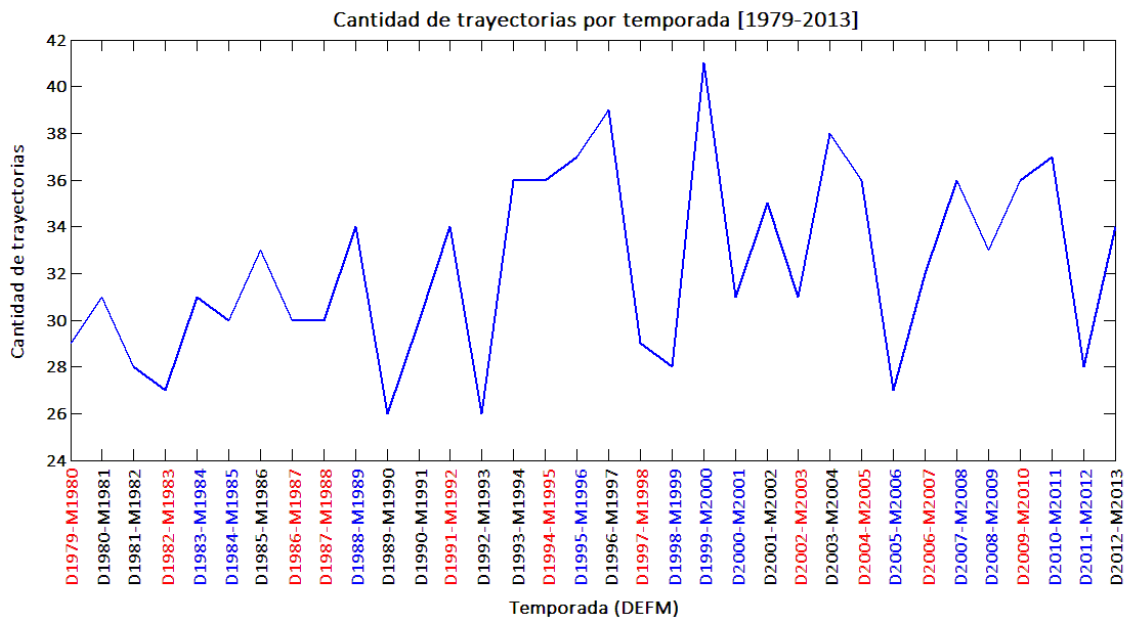


Figura 23: Variabilidad interanual del conjunto de trayectorias obtenido utilizando como valor umbral 15 m/s. En rojo se identifican las temporadas Niño, en azul las temporadas Niña y en negro las temporadas neutras (Fuente: ONI_NOAA).

El promedio de trayectorias durante temporadas Niño, Niña y neutras es 32, 33 y 32 trayectorias respectivamente, por lo cual no se encuentra un cambio en la actividad de los paquetes de ondas relacionado con este fenómeno en términos generales. Si se clasifican los eventos Niño en débiles (79-80, 04-05 y 06-07) y muy fuertes (82-83 y 97-98) el promedio pasa a ser 32 y 28 trayectorias respectivamente lo cual tampoco es una diferencia significativa en la actividad de los paquetes de ondas. Y si se clasifican los eventos Niño en Modoki (79-80, 86-87, 91-92, 94-95, 02-03 y 04-05) y canónicos (82-83, 87-88 y 97-98) el promedio es similar al anterior con 33 y 29 trayectorias respectivamente.

Otra variable que se estudió por temporada fue la duración de las trayectorias (figura 24). En ella se rescata lo observado en la figura 9, donde la mayoría de las trayectorias están concentradas en el intervalo 3-8 días y dentro de este rango la mayor cantidad de eventos se ubican entre 3 y 5 días. Con respecto a las temporadas se observa que la distribución de esta variable no es uniforme temporada a temporada, encontrándose años con muchas trayectorias de poca duración, por ejemplo, D1999-M2000 y otros con los eventos mejor distribuidos en el rango de días, por ejemplo, D1979-M1980.

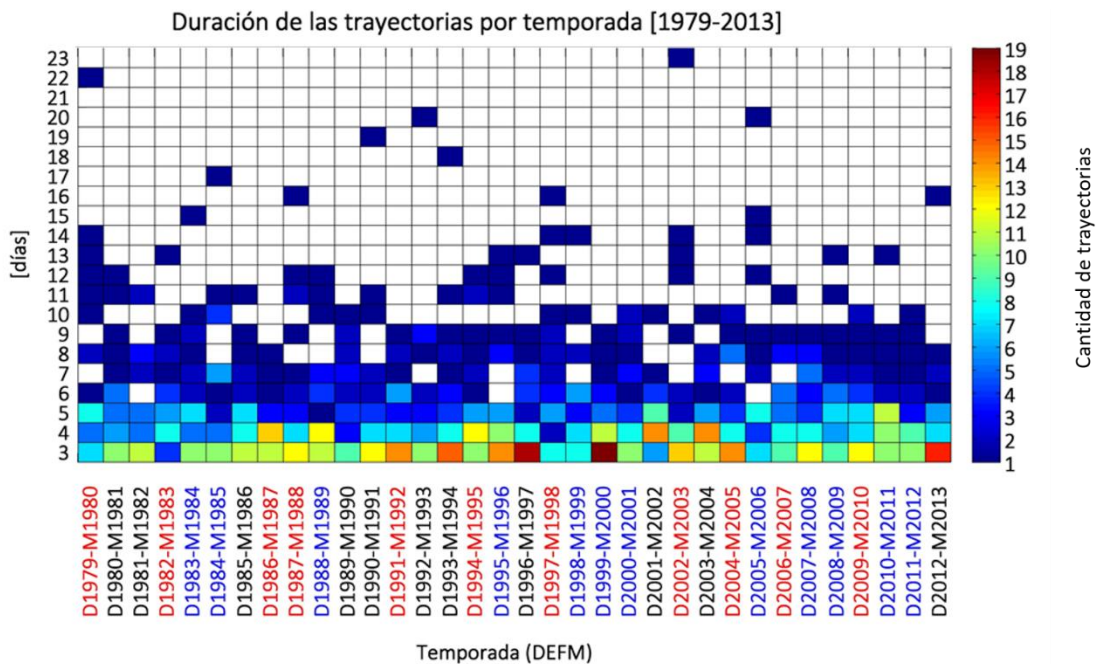


Figura 24: Duración de las trayectorias en días en función de la temporada. Cuadros en color dan la cantidad de trayectorias para una temporada y una duración específica, los cuadros blancos indican 0 trayectorias.

En la figura 25 se presenta la variación de la distancia recorrida por los paquetes discriminada por temporada. En ella se observa gran variabilidad interanual, con temporadas que contienen trayectorias de gran recorrido, por ejemplo, D2002-M2003 y otras de poco recorrido, por ejemplo, D2011-M2012.

Por último, la velocidad media de las trayectorias discriminada por temporada (figura 26) también presenta gran variabilidad interanual, con la mayor cantidad de los casos concentrados en torno a 21 m/s. En esta figura también se destacan temporadas en las que los paquetes de ondas tienden a ser más lentos, por ejemplo, D1999-M2000 o más rápidos, por ejemplo, D2009-M2010.

En ninguna de las tres estadísticas analizadas se destaca una relación con años Niño, Niña y neutros, en función de valores extremos o concentración de mayor cantidad de

casos dentro de cierto rango de valores. Esto puede deberse a que el impacto de El Niño en las trayectorias de los transientes ocurre principalmente en latitudes subtropicales [Barreiro, 2017].

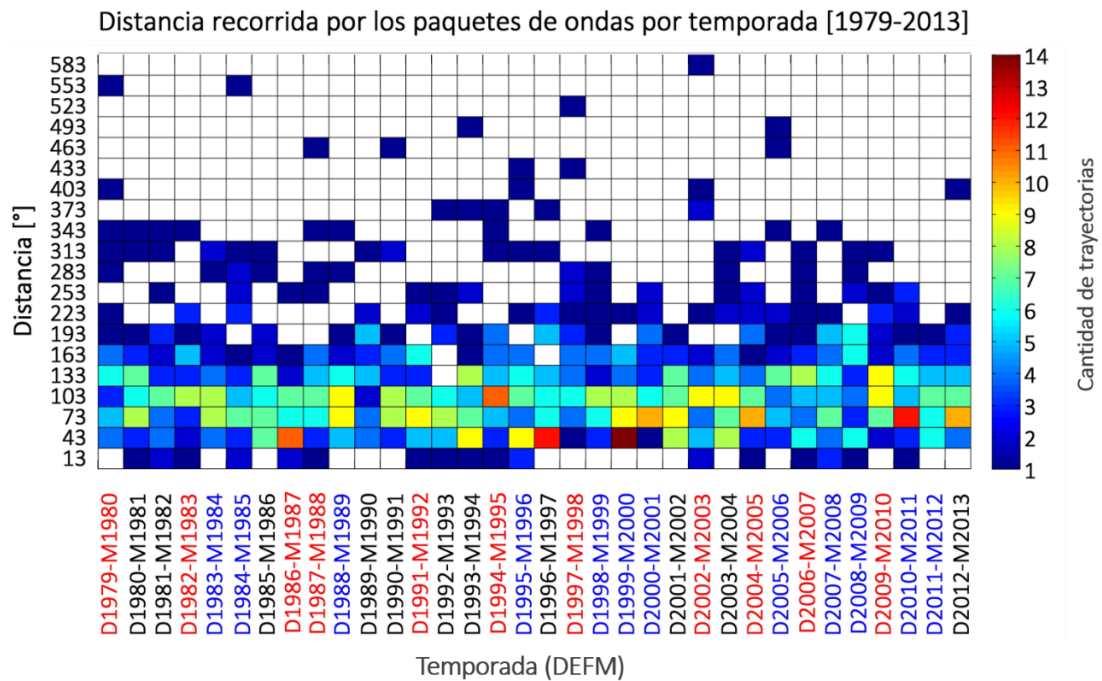


Figura 25: Distancia recorrida por los paquetes de ondas en ° de longitud en función de la temporada.

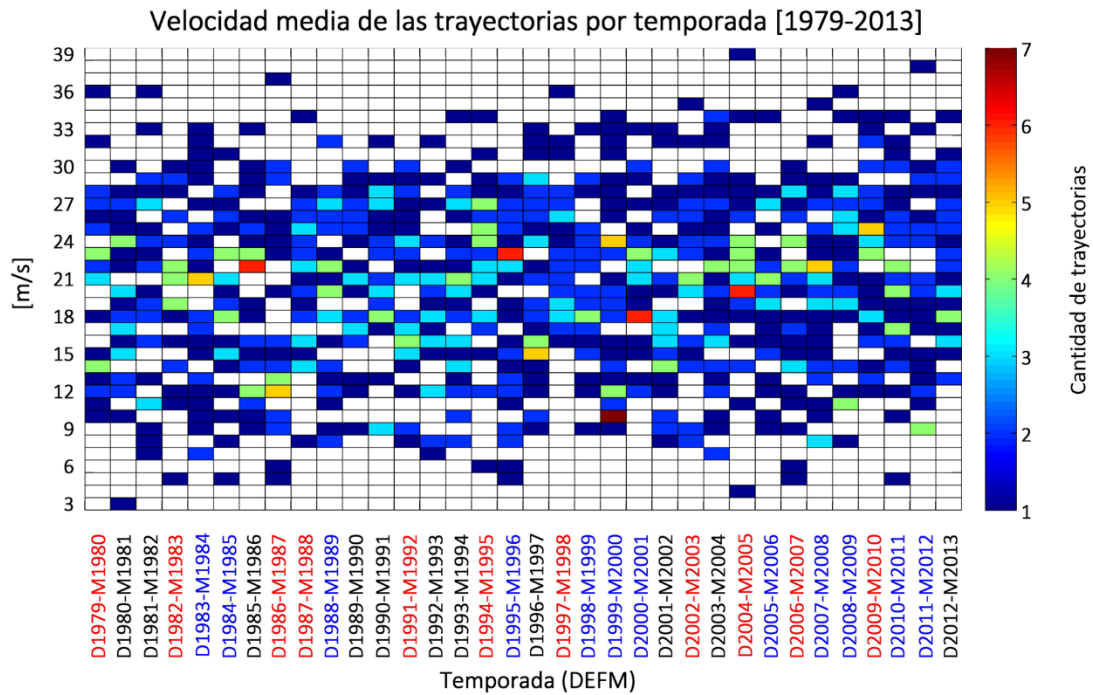


Figura 26: Velocidad media de las trayectorias en m/s en función de la temporada.

3.4. Sensibilidad del algoritmo variando el umbral

En este análisis se buscó observar cuánto y cómo varían las estadísticas calculadas sobre el conjunto de trayectorias determinado por el algoritmo, al cambiar el valor umbral considerado. Para ello, se varió el umbral en el rango 13-18 m/s y se calcularon las mismas estadísticas de la sección 3.1.

Para comenzar se calculó la cantidad de trayectorias determinadas por el algoritmo por temporada. Intuitivamente surge pensar que al aumentar el umbral se debería obtener menor cantidad de trayectorias debido a que el campo queda más recortado y las trayectorias que siguen paquetes con menor amplitud tienden a perderse, mientras que es esperable que suceda lo contrario si se disminuye el umbral.

A grandes rasgos se observa esta idea intuitiva en la figura 27, ya que en la mayoría de las temporadas se observa un mayor número de trayectorias a medida que disminuye el umbral. Sin embargo, algunas temporadas particulares no siguen esta regla lo cual podría deberse a que el campo queda tan recortado que en vez de perder una trayectoria completa al aumentar el umbral esta queda dividida en varias más cortas generando un aumento de la cantidad de trayectorias.

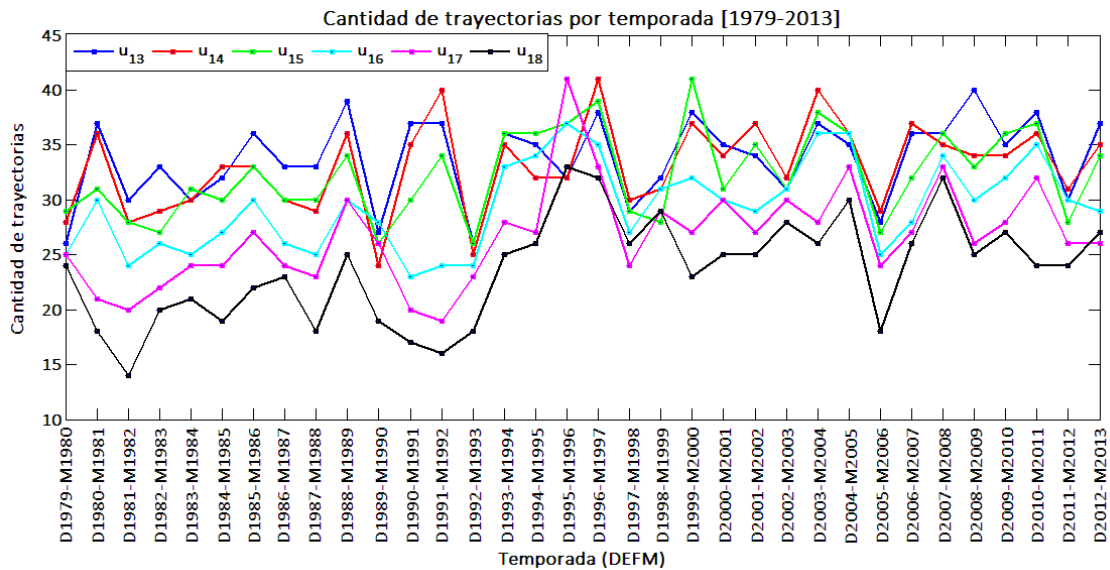


Figura 27: Cantidad de trayectorias por temporada [D1979-M1980 a D2012-M2013] en función del valor umbral utilizado en el rango 13-18 m/s.

Analizando detalladamente la figura 27 se observa un salto en el promedio de trayectorias entre la temporada D1992-M1993 y D1993-M1994 principalmente para los umbrales 16, 17 y 18 m/s. En particular para estos últimos dos valores se pasa de un

promedio de 23 a 29 trayectorias y de 20 a 27 trayectorias respectivamente. Este salto es llamativo porque se observa sólo para los umbrales mayores y además porque se produce a principio de los noventa, cuando el índice del Modo Anular del Sur (SAM) comienza a presentar una tendencia hacia valores positivos, como se observa en la figura 28. En ella se muestra la evolución temporal del índice por cuatrimestre en el período trabajado.

Como este modo de variabilidad tiene influencia en la ubicación latitudinal del jet tiene sentido pensar que pueda existir una conexión entre este modo y la cantidad de trayectorias rastreadas. Como se observó anteriormente en la figura 27, esta conexión se ve reflejada sólo para umbrales altos. El mecanismo físico asociado a esta relación deberá ser estudiado en detalle para determinar si efectivamente existe una relación de causalidad.

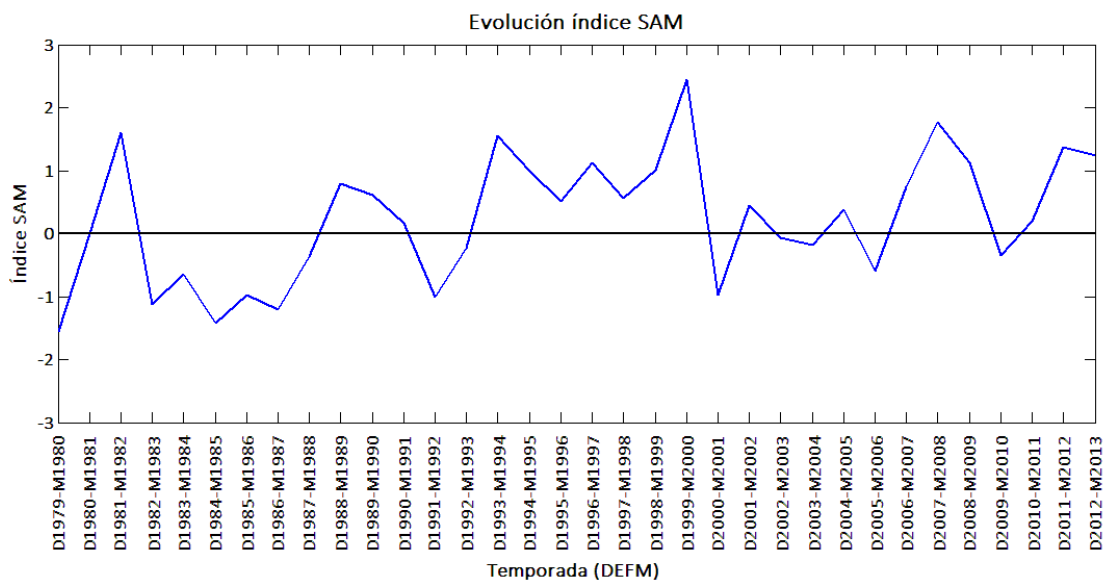


Figura 28: Evolución temporal del índice del Modo Anular del Sur por cuatrimestre DEFM. (Fuente: <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>).

En los siguientes párrafos se discutirá el resultado del resto de las estadísticas en función del valor umbral.

Duración

Respecto a la duración de los paquetes de ondas para todos los umbrales se obtienen distribuciones similares, asimétricas sesgadas positivamente y con largas colas que alcanzan la veintena de días como se observa en la figura 29.

Para todos los umbrales se obtuvo que más del 90% de las trayectorias halladas se encuentran comprendidas en el rango 3-8 días, más precisamente para u13, u14, u15 y u16 el 91% de las trayectorias halladas se ubican en dicho intervalo, para u17 el 92% y para u18 el 93%.

También se observa que a medida que aumenta el valor umbral los pocos casos extremos tienden a disminuir su duración, seguramente por lo mencionado en el punto anterior.

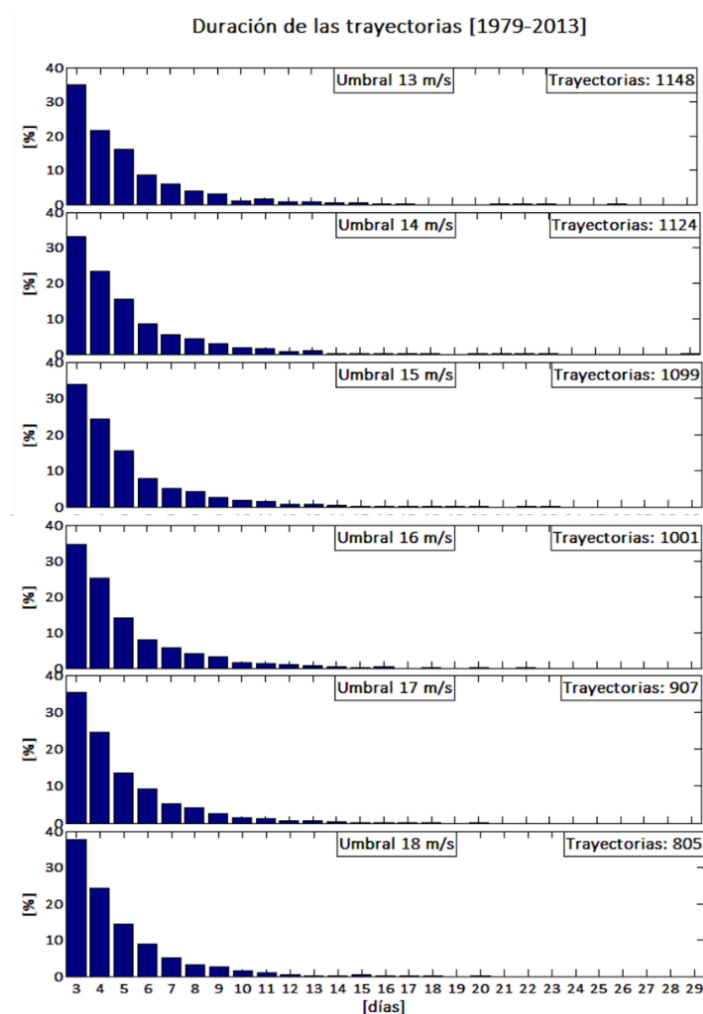


Figura 29: Duración de las trayectorias en días en función del valor umbral utilizado en el rango 13-18 m/s.

Recorrido

Respecto al recorrido de los paquetes se obtiene para todos los umbrales considerados distribuciones con sesgo positivo y todas presentan una larga cola que supera los 360° de longitud. Para los seis umbrales estudiados alrededor del 80% de las trayectorias halladas se concentran en el rango 30-170 ° de longitud, más precisamente para u13 y u14 el 77%, para u15 el 78.9%, para u16 el 79.4%, para u17 el 80.2% y para u18 el 81.5%. A partir de los gráficos y de estos resultados se tiene que a medida que crece el umbral disminuye la distancia recorrida por los casos extremos.

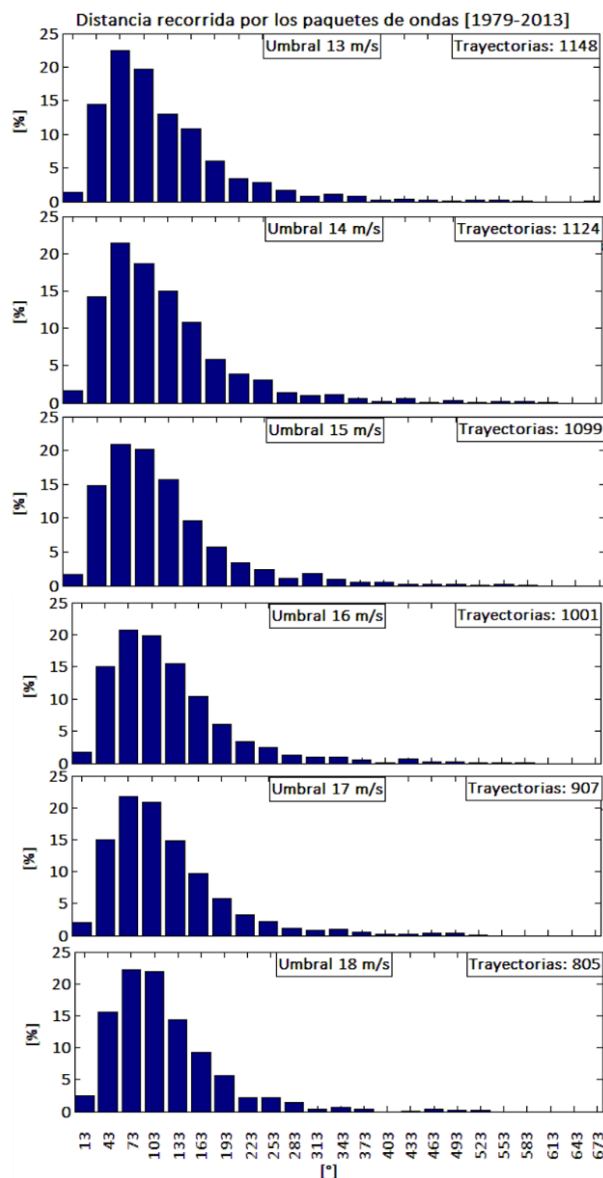


Figura 30: Recorrido de los paquetes de ondas en ° de longitud en función del valor umbral utilizado en el rango 13-18 m/s.

Velocidad media

Para esta variable también se observan distribuciones similares al variar el umbral (figura 31). Alrededor del 60 % de los casos hallados se encuentran concentrados en el rango 15-26 m/s para los seis umbrales considerados.

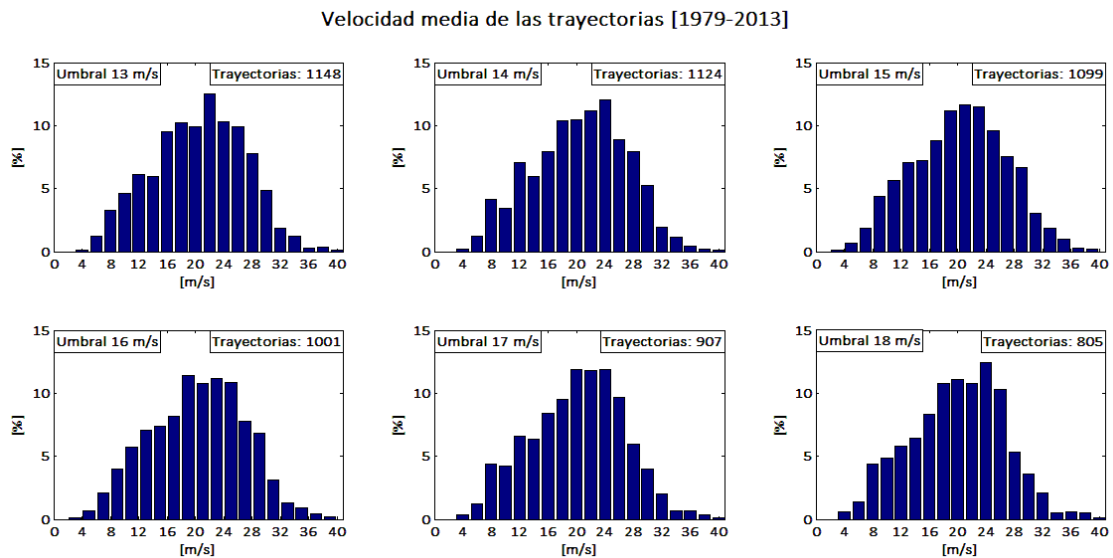


Figura 31: Velocidad media de las trayectorias en m/s en función del valor umbral utilizado en el rango 13-18 m/s.

Zonas de formación y disipación

Analizando visualmente las figuras 32 y 33 se observan distribuciones similares para los seis umbrales considerados y para cada variable en particular.

Respecto al comienzo de las trayectorias (figura 32), para los seis umbrales considerados se obtienen histogramas relativamente uniformes sin destacarse zonas particulares de formación de paquetes.

Los finales de las trayectorias (figura 33) sin embargo, muestran distribuciones más ordenadas con tres zonas de disipación destacadas para los 6 umbrales considerados, estas se ubican en las franjas 30°-50° E, 130°-200° E y 320°-350°E que abarcan en el Índico occidental, el Pacífico occidental y el Atlántico occidental respectivamente.

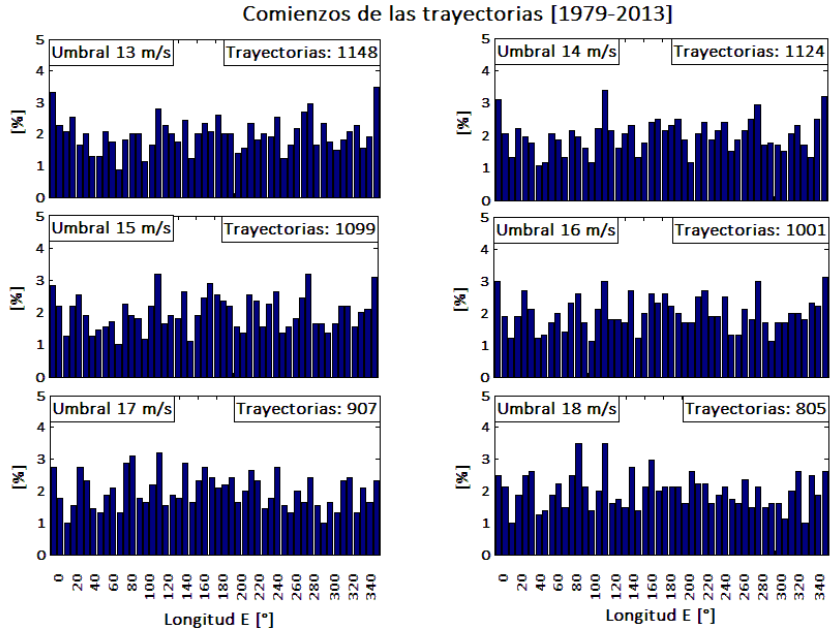


Figura 32: Comienzos de las trayectorias en función del valor umbral utilizado en el rango 13-18 m/s.

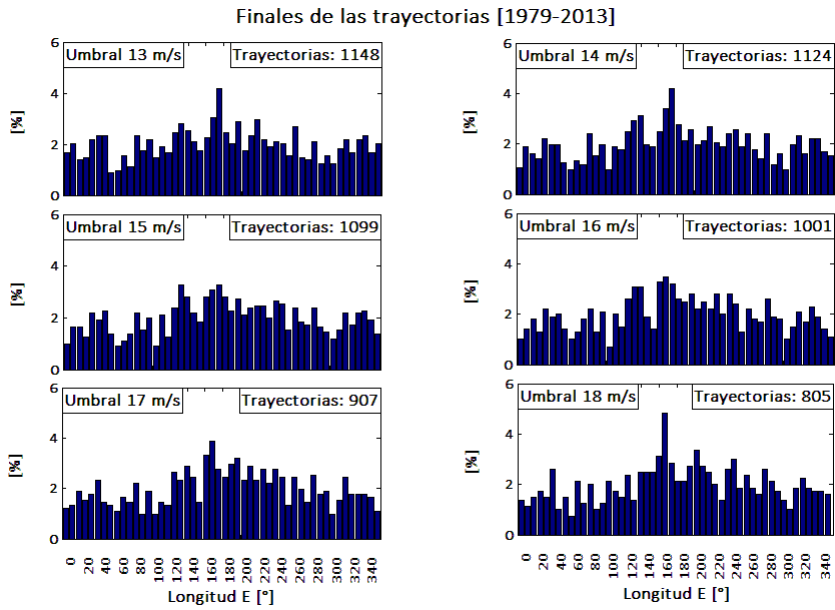


Figura 33: Finales de las trayectorias en función del valor umbral en el rango 13-18 m/s.

3.5. Caso particular

Para este análisis se eligió una trayectoria del conjunto determinado buscando que tuviera gran duración y extensión espacial y además que alcanzara nuestra región [300°E-310°E] en su recorrido.

Luego se analizó la situación sinóptica y la precipitación acumulada en los días en los que el paquete de ondas estuvo próximo a la región mencionada.

Caso particular estudiado – período 28/02/2011-15/03/2011

La trayectoria elegida se presenta en la figura 34, que es un diagrama de Hovmöller del campo de amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas promediado en el cinturón de latitud 40°-65°S.

En ella se puede observar que el algoritmo comenzó a rastrear el paquete de ondas el 1 de marzo alrededor de 70° E y finalizó el rastreo el 14 de marzo alrededor de 320° E. Este paquete de ondas recorrió 250° de longitud y se mantuvo coherente por 14 días. A partir de la figura se puede determinar que el paquete de ondas rastreado se encontró próximo a nuestra región durante los días 12 y 13 de marzo.

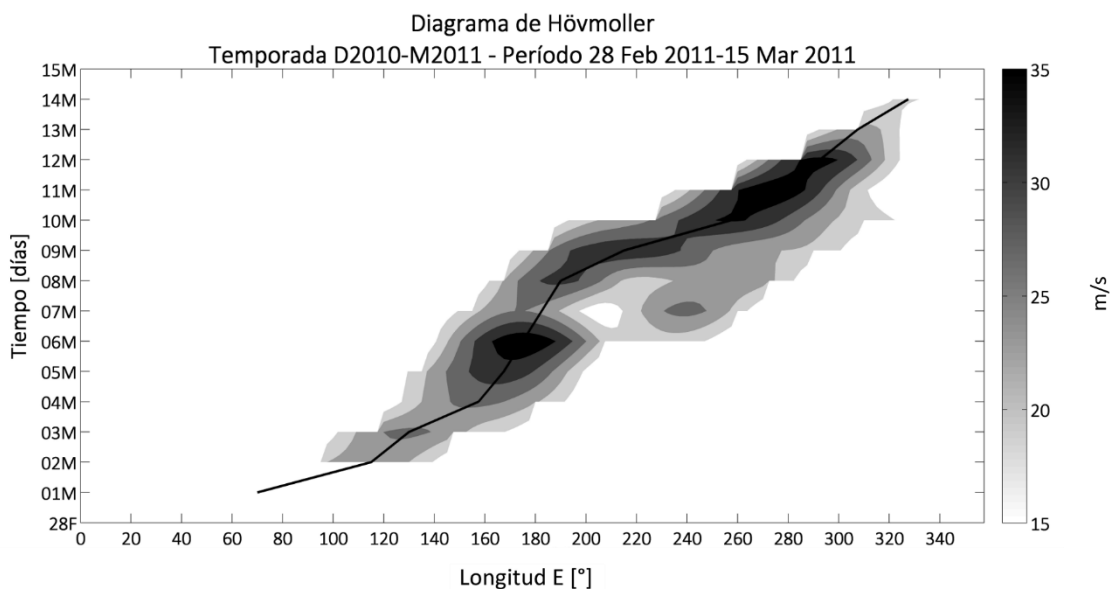
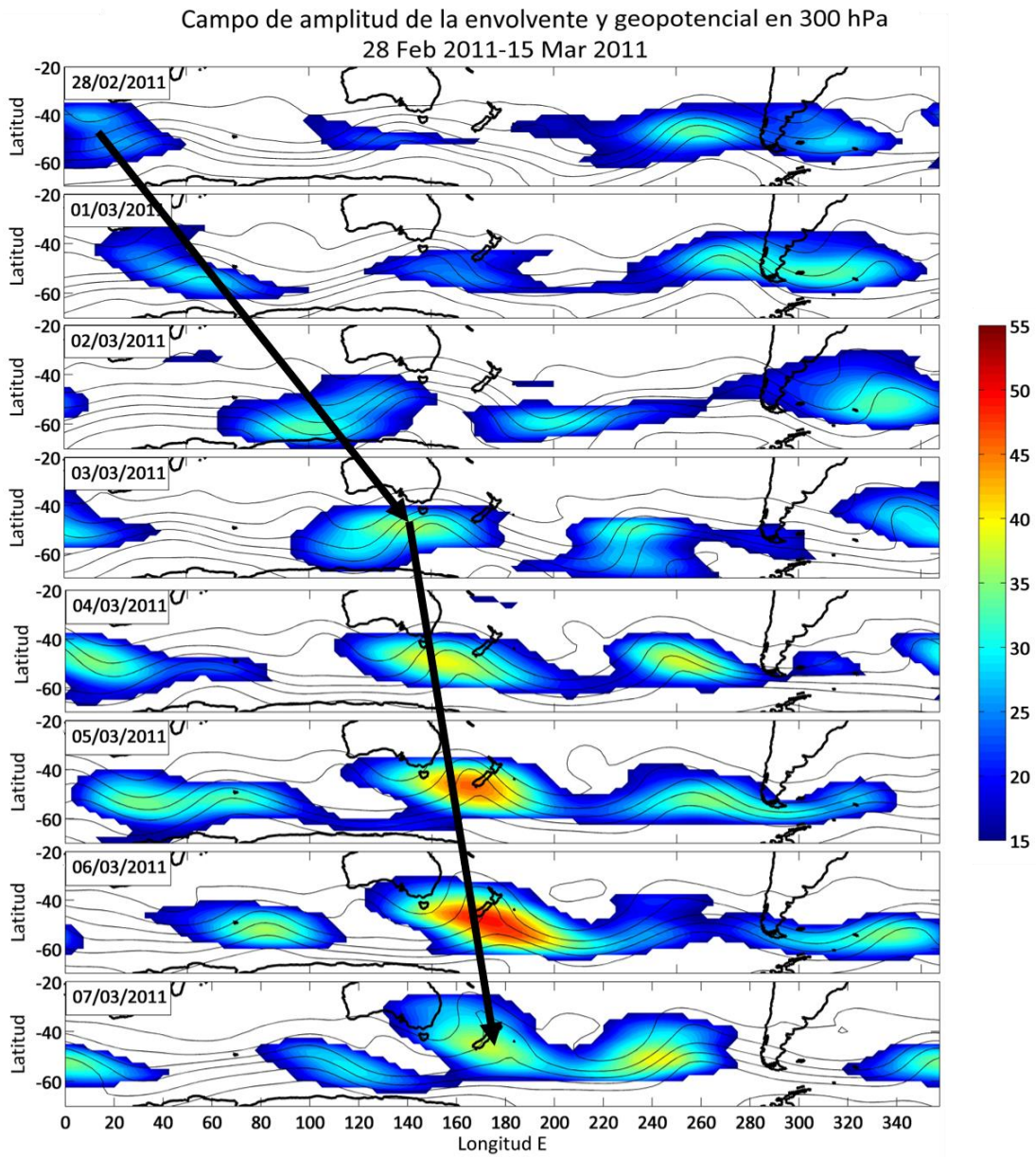


Figura 34: Trayectoria determinada con el algoritmo de rastreo utilizando como valor umbral 15 m/s. Temporada D2010-M2011, período 28/02/2011-15/03/2011. Se muestra en sombreado el campo de amplitud de la envolvente promediado en el cinturón 40°-65°S en m/s y con línea continua la trayectoria hallada.

Campo Z300 y amplitud de la envolvente

En la figura 35 se presenta el campo de amplitud de la envolvente de los paquetes de ondas y el geopotencial en 300 hPa desde el 28/02/2011 hasta el 15/03/2011 con el fin de observar la evolución temporal del paquete de ondas rastreado y del campo de geopotencial. En la figura se indica con flechas la propagación de la perturbación en el período mencionado y se observa su ubicación al sur de América del Sur durante el 12 de marzo desplazándose al este y perdiendo intensidad durante el 13 de marzo. En dicho período se distingue una vaguada en el campo de geopotencial sobre la misma región.



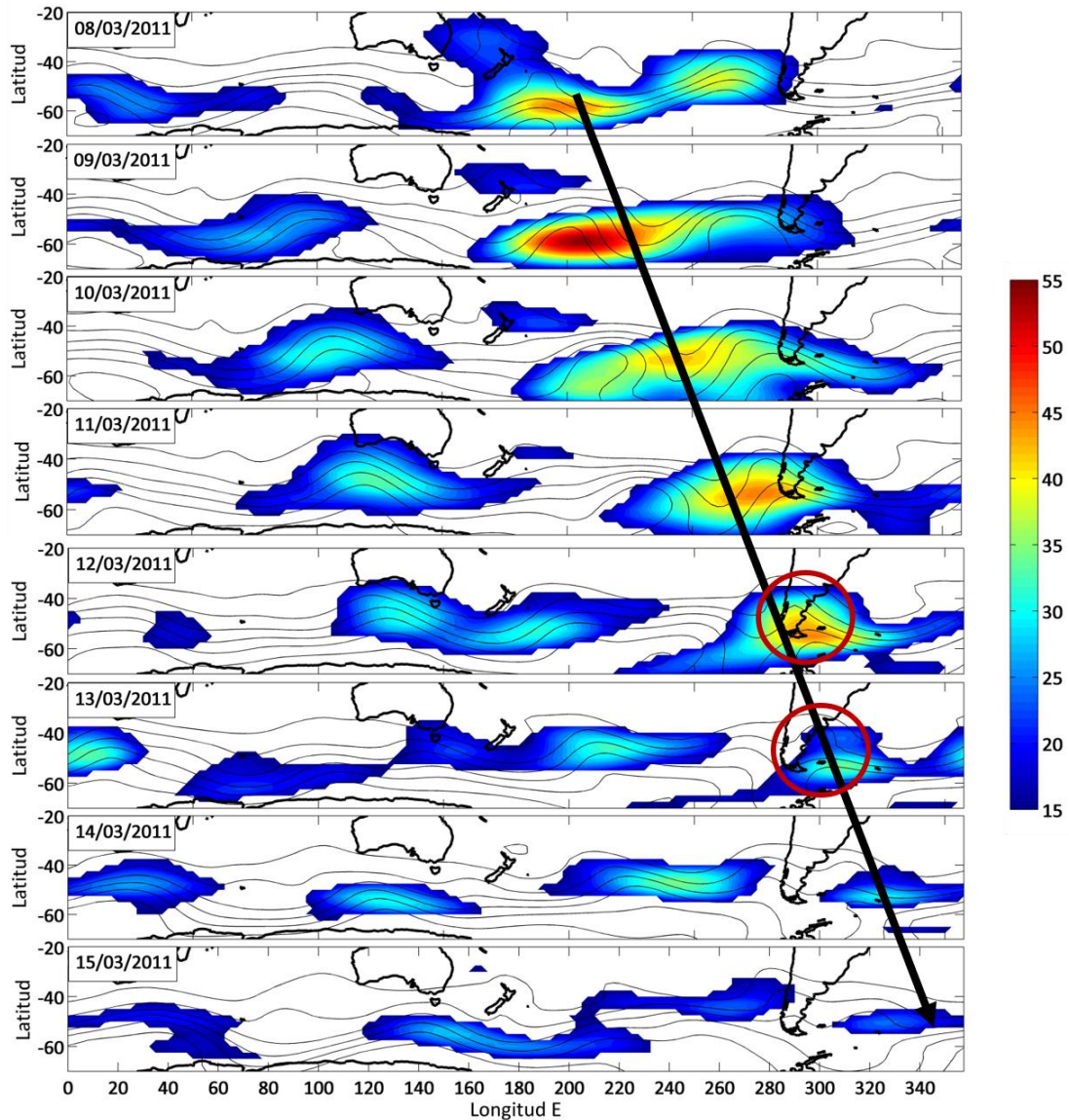


Figura 35: Evolución temporal del campo Z300 y amplitud de la envolvente en el período 28/02/2011-15/03/2011. En colores se tiene el campo de amplitud de la envolvente desde 15 m/s y en contornos el campo Z300 desde 8500 mgp con contornos cada 200 mgp. Las flechas indican la evolución del paquete de ondas rastreado y los círculos indican el momento en que el paquete está sobre la región de interés.

También se observan otros paquetes de ondas al oeste y al este del paquete rastreado que no se dibujaron sus trayectorias en el diagrama de la figura 34 pero que conviven con el rastreado y se desplazan al E.

Situación sinóptica

En la figura 36 se presenta la situación sinóptica durante el 12 y 13 de marzo de 2011, cada 6 horas, en horario UTC. En los 8 mapas se observan las altas semipermanentes del Pacífico y del Atlántico y distintos sistemas transientes.

En el panel superior a las 00Z se observa la presencia de una baja de 999 hPa sobre las Islas Malvinas que se desplaza al SE en el correr del día alcanzando valores de 989 hPa a las 12Z, también se observa el frente frío asociado que alcanza el continente. Desde las 06Z del 12 de marzo se observa la formación de una baja de 1006 hPa sobre la provincia de Buenos Aires que en el correr del período sigue desarrollándose y se profundiza alcanzando valores de 981 hPa a las 18Z del 13 de marzo. Esta baja se desplaza al SE y en su trayecto el frente frío asociado barre la región en la dirección SO-NE alcanzando el sur de Brasil.

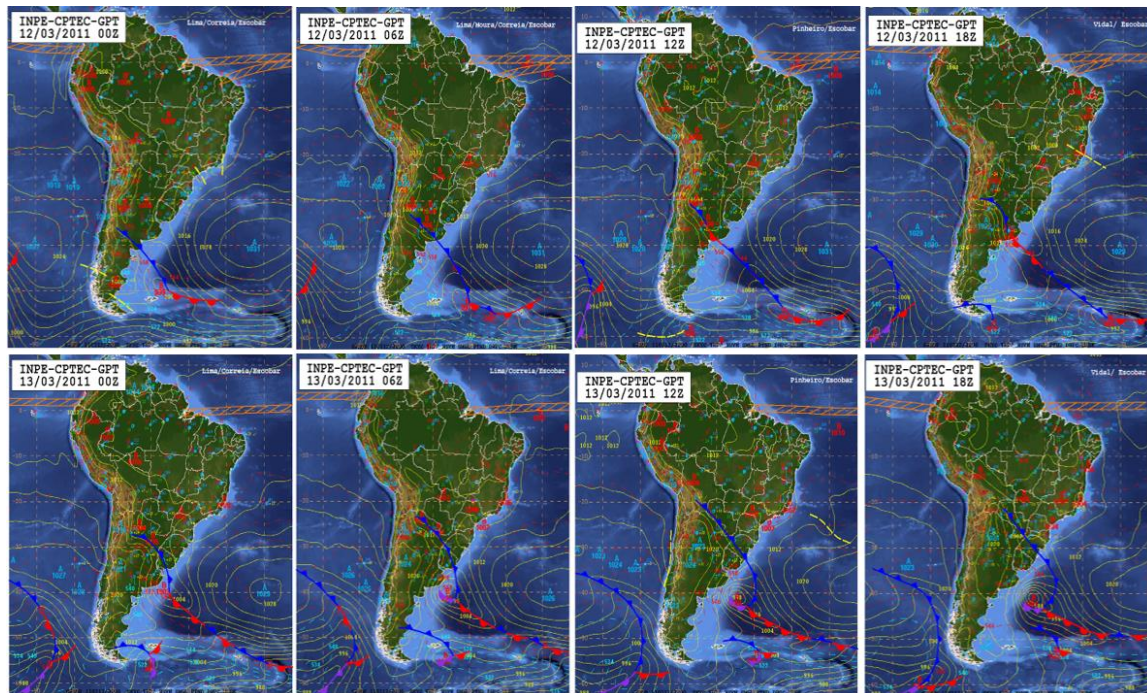


Figura 36: Mapas sinópticos del 12/03/2011 (sup) y 13/03/2011 (inf) para 00Z, 06Z, 12Z y 18Z. (Fuente: INPE-CPTEC).

Precipitación en la región

Para visualizar la precipitación acumulada durante el 12 y 13 de marzo de 2011 se utilizaron datos de TRMM.

Este campo se visualiza en la figura 37 donde se observa el reflejo de lo discutido a partir de los mapas sinópticos, con acumulados de hasta 200 mm en las zonas donde se observa el desarrollo de las bajas y los frentes fríos.

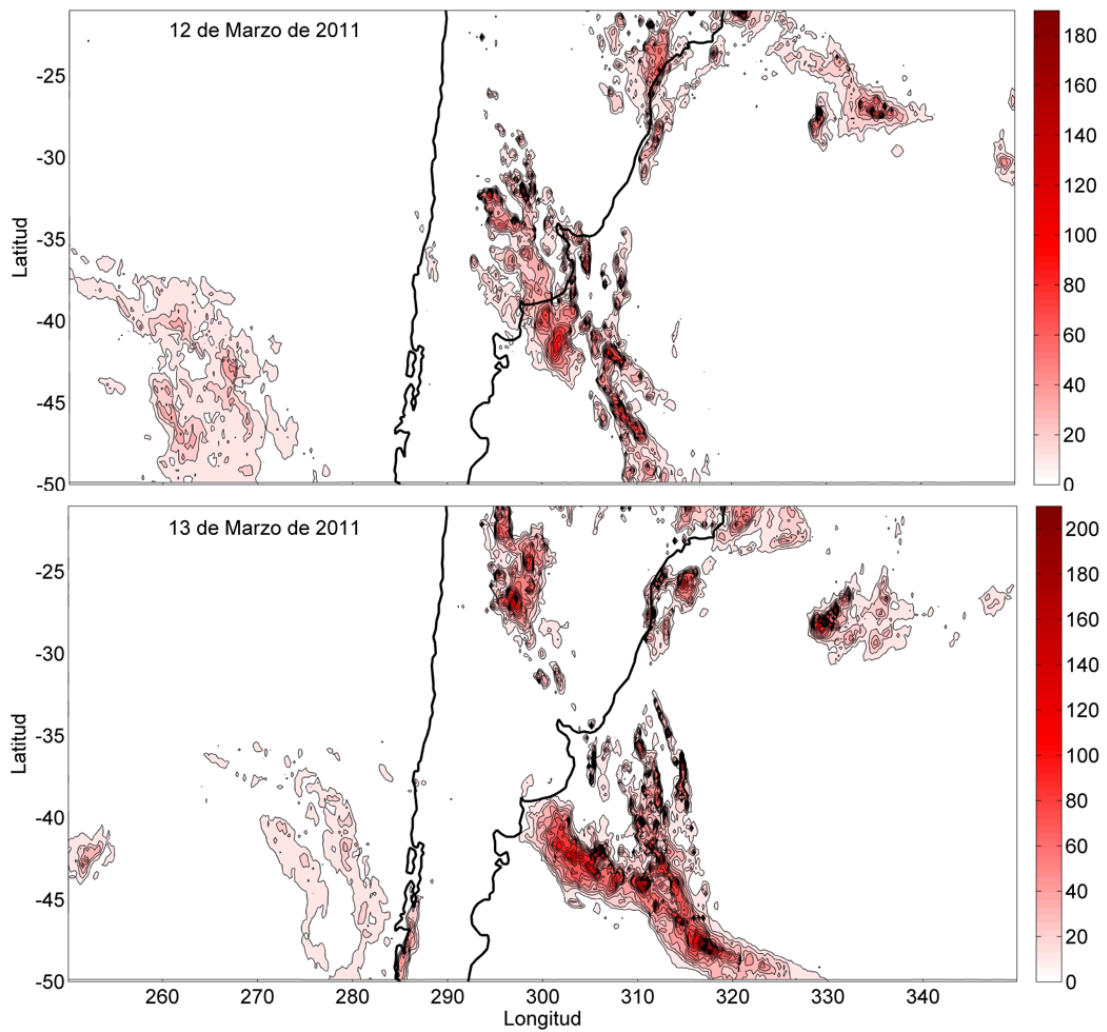


Figura 37: Precipitación en mm durante el 12/03/2011 (sup) y 13/03/2011 (inf). (Fuente: TRMM).

Capítulo 4. Síntesis y Conclusiones

En este trabajo se buscó caracterizar los paquetes de ondas extratropicales en el hemisferio sur durante la temporada de verano, utilizando el campo de amplitud de la envolvente de la velocidad meridional en 300 hPa y determinando sus trayectorias por medio de un algoritmo basado en identificación de características que sigue el trayecto de los máximos del campo. También se estudió la variabilidad mensual e interanual del conjunto de trayectorias determinadas y se eligió del conjunto una trayectoria particular que tuviera buena extensión temporal y espacial y, además, que se acercara a la región de interés para observar su influencia en el campo de precipitación en la región próxima a Uruguay.

Utilizando como valor umbral 15 m/s para recortar el campo de amplitud de la envolvente, se rastrearon 1099 paquetes de ondas generando un promedio de 32 trayectorias por temporada. Se determinó que en su mayoría los paquetes de ondas rastreados se mantienen coherentes entre 3 y 8 días y pueden ser rastreados en ese período, recorren una distancia entre 30° y 170° de longitud y tienen velocidades medias en el entorno a los 21 m/s. Analizando la posición de los comienzos y finales de los rastreos se obtuvo que no se destacan zonas de formación importantes y se observaron tres zonas de disipación notorias comprendidas en el Índico occidental, el Pacífico occidental y el Atlántico occidental que deberían ser estudiadas en detalle para entender si existe alguna razón física que explique este resultado.

Respecto a la variabilidad mensual del conjunto de trayectorias determinado, se observa un máximo de actividad en diciembre y un mínimo en febrero, aumentando nuevamente hacia marzo. En general, se obtuvieron distribuciones similares de las estadísticas estudiadas para todos los meses de la temporada y se ven reflejados en ellas los resultados obtenidos para el conjunto de todo el período. Con respecto a la duración de los paquetes se observa que en marzo aumenta la cantidad de paquetes de corta duración y disminuyen los de larga duración, mientras que respecto al recorrido también se observa que en marzo disminuyen los casos extremos. En la velocidad media se observa que durante diciembre los paquetes tienden a adquirir velocidades más pequeñas que en enero y durante febrero y marzo la mayoría de los casos se concentra en un rango mayor abarcando velocidades desde 15 m/s a 27 m/s.

Se observó también, que el conjunto presenta gran variabilidad interanual tanto en la cantidad de trayectorias obtenidas por temporada como en las estadísticas estudiadas. En general, no se encontró vinculación entre la actividad de los paquetes de ondas caracterizada por la cantidad de paquetes rastreados y El Niño y tampoco entre las características de estos paquetes (duración, recorrido y velocidad media) y El Niño. Por

otro lado, se encontró una posible relación con el Modo Anular del Sur, principalmente para valores altos de umbral elegido para detectar paquetes de ondas.

Respecto a la sensibilidad del algoritmo al variar el umbral mínimo, se concluye que el algoritmo es robusto en los resultados obtenidos ya que al analizar las distribuciones de las variables estudiadas se obtienen distribuciones similares para todos los umbrales considerados. La diferencia principal que se repite variando el umbral, tanto para la duración como el recorrido de los paquetes de ondas, es que al aumentar el valor umbral se observa que los casos extremos tienden a disminuir, lo que es coherente ya que el campo original queda más recortado a medida que aumenta el umbral.

Por último, se analizó una trayectoria particular de un paquete de ondas que duró 14 días para estudiar cómo el seguimiento de paquetes puede ayudar a la predicción del tiempo en la región. Se observó a través de los mapas sinópticos, que bajo la presencia del paquete en altura se desarrolla un sistema de baja presión en superficie sobre la provincia de Buenos Aires y se generan acumulados de lluvia importantes en la región, asociados al pasaje del frente frío vinculado a la baja.

Para finalizar, cabe remarcar que los resultados de este trabajo fueron obtenidos en base a un algoritmo que involucra una serie de parámetros elegidos con cierta coherencia basados en la literatura previa y en el conocimiento de la dinámica atmosférica a los efectos de obtener los mejores resultados posibles. La metodología no mostró sensibilidad importante al variar algunos parámetros dando robustez a los resultados encontrados.

Capítulo 5. Perspectivas

Como trabajo a futuro que podría complementar y fortalecer algunos resultados aquí presentados, se podría desarrollar otro algoritmo que opere con una metodología distinta y de esta forma comparar resultados entre los dos casos desarrollados. Esto permitiría evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado durante este trabajo y además serviría para la consolidación de los resultados obtenidos respecto a las características de los paquetes de ondas en el hemisferio sur, ya que no abundan estudios que realicen el análisis de este fenómeno en nuestro hemisferio.

Como se planteó en el trabajo parece existir cierta conexión entre el Modo Anular del Sur y la cantidad de trayectorias rastreadas evidenciándose sólo para umbrales altos. Esta relación no es obvia y es un aspecto interesante para continuar estudiando.

Por otro lado, el trabajo realizado hasta ahora puede servir como puntapié para indagar en las características físicas de los paquetes de ondas en nuestro hemisferio, como puede ser su estructura vertical o los mecanismos de desarrollo. Se podría analizar, por ejemplo, el balance de energía de los paquetes discutiendo qué procesos son los que aportan en cada etapa de vida de estos.

Otro enfoque interesante es la vinculación de este fenómeno con casos de tiempo severo en nuestra región, por ejemplo, realizando un estudio detallado de las trayectorias halladas y lo que estas provocan en distintos campos en superficie y altura.

Por último, dado que los paquetes de onda pueden ser utilizados para aumentar el horizonte temporal de la predicción del tiempo sería importante determinar la representación de estos en los modelos atmosféricos operativos.

Bibliografía

Barreiro, M., 2017: **Interannual variability of extratropical transient wave activity and its influence on rainfall over Uruguay.** *Int. J. Climatology*, doi:10.1002/joc.5082.

Chang, E. K. M and Yu, D. B., 1999a: **Characteristics of Wave Packets in the Upper Troposphere. Part I: Northern Hemisphere Winter.** *J. Atmos. Sci.* 56: 1708-1728.

Chang, E. K. M., 1999b: **Characteristics of Wave Packets in the Upper Troposphere. Part II: Seasonal and Hemispheric Variations.** *J. Atmos. Sci.* 56: 1829-1747.

Chang, E. K. M., 2000: **Wave Packets and Life Cycles of Troughs in the Upper Troposphere: Examples from the Southern Hemisphere Summer Season of 1984/1985.** *Mon. Weather Rev.* 128: 25-50.

Chang, E. K. M., 2005: **The Impact of Wave Packets Propagating across Asia on Pacific Cyclone Development.** *Mon. Weather Rev.* 133: 1999-2015.

Grazzini, F. and Lucarini, V., 2010: **Climatology of extratropical atmospheric wave packets in the Northern Hemisphere.** arXiv:1011.3564v2 [physics.ao-ph]; <http://arXiv.org> (accessed 1 October 2014).

Grazzini, F. and Vitart, F., 2015: **Atmospheric predictability and Rossby wave packets.** *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 141: 2793-2802.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F. and Wolff D. B., 2007: **The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multilayer, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales.** DOI: 10.1175/JHM560.1.

James, I. N., 2003: **Introduction to Circulating Atmosphere.** Cap. 5: 112-161. Cap. 7: 208-250.

Martius, O., Schwierz, C. and Davies H. C., 2008: **Far-upstream precursors of heavy precipitation events on the Alpine south-side.** *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 134: 417-428.

Orlansky, I. and Chang, E. K. M., 1993: **Ageostrophic Geopotential Fluxes in Downstream and Upstream Development of Baroclinic Waves.** *J. Atmos. Sci.* 50/2: 212-225.

Pisciottano, G., Díaz, A., Cazes, G., and Mechoso C. R., 1994: **El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay.** *J. Clim.* 7: 1286-1302.

Souders, M. B., Colle, B. A., and Chang, E. K. M., 2014a: **A Description and Evaluation of an Automated Approach for Feature-Based Tracking of Rossby Wave Packets.** *Mon. Weather Rev.* 142: 3505-3527.

Souders, M. B., Colle, B. A., and Chang, E. K. M., 2014b: **The Climatology and Characteristics of Rossby Wave Packets Using a Feature-Based Tracking Technique.** Mon. Weather Rev. 142: 3528-3548.