




## NUEVA CLIMATOLOGÍA DE CICLONES EXTRATROPICALES EN EL MAR ARGENTINO Y SU IMPACTO EN LA SEGURIDAD NÁUTICA

Julieta Camila Arce<sup>1</sup> , María Paula Llano<sup>2,3</sup>  y Alvaro S. Scardilli<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Argentina

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

(Manuscrito recibido el 23 de mayo de 2025, en su versión final el 20 de octubre de 2025)

### RESUMEN

El conocimiento del comportamiento de los ciclones extratropicales es fundamental para la planificación náutica, ya que permite mitigar su impacto en las embarcaciones. Este estudio empleó datos de presión a nivel del mar y viento del reanálisis NCEP/DOE (1979-2022), analizados mediante un algoritmo automatizado para la identificación y seguimiento de ciclones, que se complementa con técnicas estadísticas. Se construyó una climatología estacional de características ciclónicas como origen, duración, distancia recorrida, profundización de presión e intensidad del viento en el océano Atlántico Sudoccidental, particularmente en el Mar Argentino. Se identificó un máximo de ciclones en la temporada otoño-invierno, mientras que el otoño y primavera registraron los casos más duraderos. Las mayores distancias recorridas y profundizaciones de presión se observaron en invierno. Espacialmente, se determinaron tres áreas de ciclogénesis constantes: la región costera de Argentina, Uruguay y sur de Brasil, y dos al sur de Tierra del Fuego y el Pasaje de Drake, próximas a la Península Antártica. Las trayectorias predominantes coincidieron con las áreas de mayor recurrencia de ciclogénesis. En términos de severidad, los vientos más intensos se concentraron en invierno, y al considerar la estructura propia de estos ciclones, la mayor severidad ocurre en el sector norte. Considerando la escala Beaufort, se estableció un umbral de riesgo de 35 nudos, relevante para la seguridad náutica. El análisis mostró que, nuevamente, el invierno presentó la mayor cantidad de ciclones que mantuvieron este umbral durante todo su tiempo de vida, destacándose como la estación con mayor impacto potencial en la actividad marítima. Los casos de naufragios analizados muestran que diversos eventos fueron afectados por ciclones en las costas patagónicas, haciendo fundamental el conocimiento climatológico y geográfico de estos sistemas para la preparación de los buques ante eventos severos y la mejora de la adaptación de la actividad marítima para su seguridad.

*Palabras clave:* ciclones extratropicales, Mar Argentino, océano Atlántico Sur, seguridad náutica .

## NEW CLIMATOLOGY OF EXTRATROPICAL CYCLONES IN THE ARGENTINE SEA AND THEIR IMPACT ON NAUTICAL SAFETY

### ABSTRACT

Understanding the behavior of extratropical cyclones is crucial for nautical planning, as it allows for the mitigation of their impact on vessels. This study used sea level pressure and wind data from the NCEP/DOE reanalysis (1979-2022), analyzed through an automated algorithm for cyclone identification and tracking, complemented by statistical techniques. A seasonal climatology of cyclonic characteristics such as origin, lifetime, distance traveled, pressure deepening, and wind intensity was constructed for the Southwestern Atlantic Ocean, particularly in the Argentine Sea. A maximum of cyclones was identified in the autumn-winter season, while autumn and spring recorded the longest-lasting events. The greatest distances traveled and pressure deepenings were observed in winter. Spatially, three consistent cyclogenesis areas were determined: the coastal region of Argentina, Uruguay, and southern Brazil, and two south of Tierra del Fuego and the Drake Passage, near the Antarctic Peninsula. The predominant trajectories coincided with the areas of highest cyclogenesis recurrence. In terms of severity, the most intense winds were concentrated in winter, and considering the inherent structure of these cyclones, the greatest severity occurs in the northern sector. Considering the Beaufort scale, a risk threshold of 35 knots was established, relevant for nautical safety. The analysis showed that, again, winter presented the highest number of cyclones that maintained this threshold throughout their lifetime, standing out as the season with the greatest potential impact on maritime activity. The analyzed shipwreck cases show that various events were affected by cyclones on the Patagonian coasts, making climatological and geographical knowledge of these systems fundamental for the preparation of vessels against severe events and the improvement of maritime activity adaptation for safety.

*Keywords: extratropical cyclones, Argentine Sea, South Atlantic ocean, nautical safety.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los ciclones extratropicales (CE), fenómenos clave en la dinámica atmosférica de latitudes medias, no solo impactan significativamente en las áreas terrestres, sino que también representan una amenaza para la seguridad náutica, al generar condiciones extremas en el océano que desafían tanto a la navegación como a la predicción meteorológica. Las regiones afectadas sufren un gran número de patrones de tiempo tales como el pasaje de frentes, precipitaciones, vientos y ráfagas persistentes, oleaje agitado, ondas de tormenta, entre otros.

Los vientos intensos asociados a dichos CE están vinculados a una serie de efectos adversos, tales como cambios en el nivel del mar, que incrementan los riesgos a lo largo de las costas, inundaciones en las zonas cercanas a los estuarios, daños a las estructuras costeras e intrusión de agua salada en los acuíferos, entre otros (Possia et al., 2011; Pousa et al., 2013). Dada la complejidad de la dinámica de los CE, a lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos para su identificación y seguimiento, lo que permitió obtener características como su tiempo de vida (duración temporal desde la primera detección del algoritmo hasta la

última), trayectorias preferenciales y distancias recorridas, entre otros.

Los primeros trabajos sobre este tema en el hemisferio sur se realizaron a través de mapas sinópticos construidos con observaciones, como es el caso de Taljaard (1967). Este estudio identificó un máximo de ciclogénesis alrededor de los 45°S en todas las estaciones del año. Posteriormente, Gan y Rao (1991) en otro de los primeros estudios de la región, descubrieron que los CE son más frecuentes en invierno que en el resto de las estaciones. Dentro de estos trabajos, las definiciones de los sistemas eran menos precisas, definiendo los ciclones solamente como centros de baja presión con al menos una isobara cerrada, sin ninguna condición adicional. Con distintas fuentes de información, como la proporcionada por los satélites, trabajos como el de Satyamurty et al. (1990) estudiaron los ciclones a partir de los patrones nubosos formados. Analizaron diversos casos de ciclogénesis, concluyendo que el máximo de estos eventos se produce en verano. Además, recalcaron que el sur de Sudamérica es una región preferente para la formación de ciclones.

Los estudios mencionados muestran resultados contradictorios en cuanto a la estación de máxima frecuencia, lo cual puede deberse al tipo de dato utilizado. Sin embargo, ambos coincidieron en que las áreas de ciclogénesis más activas eran cercanas al Golfo de San Matías (42,5°S, 62°O) durante el verano y sobre Uruguay (alrededor de 31°S, 55°O) durante el invierno.

La herramienta más utilizada para este tipo de trabajos a nivel global en la actualidad son los reanálisis, una combinación de datos observados y modelados. Dado que existen diferentes métodos de asimilación de datos, así como distintas configuraciones y resoluciones horizontales en los modelos atmosféricos, los conjuntos de reanálisis varían entre sí, lo que ha generado distintos resultados en las climatologías a lo largo del tiempo.

Simmonds y Keay (2000) presentaron una climatología basada en 40 años de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), y encontraron que la mayor densidad de ciclones se ubica entre los 45° y 70°S en todas las estaciones, con un eje de mayor densidad al sur de los 60°S. Reconstruyeron el tiempo de vida de los ciclones, constatando un promedio de poco más de 3 días y describieron que la distancia recorrida varía ampliamente, con una longitud media de la trayectoria de aproximadamente 2300 km en invierno y 1950 km en verano. En particular, Mendes et al. (2010) propuso continuar y ampliar la climatología de los trabajos previos, siguiendo con los datos del NCEP/NCAR entre los años 1949 y 2003. En primer lugar, encontraron nuevamente una región significativa para la formación de CE, ubicada cerca de la costa de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil. El invierno y el verano son las estaciones con mayor cantidad de ciclogénesis, predominando la estación fría. En segundo lugar, en relación con el tiempo de vida, los sistemas tuvieron una duración principal de 2 a 3 días; y por último, en relación con la frecuencia de la profundización máxima, el invierno es la estación con mayor intensificación de ciclones comparado con el resto de las estaciones. A su vez, es la estación con la mayor distancia media recorrida, con alrededor de 1500 km.

Los cambios en las condiciones atmosféricas y oceánicas, incluidos los asociados con la variabilidad climática, son factores a los que los CE son sensibles. Estudiar cómo están cambiando estos sistemas y sus características a lo largo del tiempo proporciona información valiosa para evaluar los modelos climáticos y entender los mecanismos dinámicos del cambio y sus consecuencias. A raíz de esto, las climatologías de ciclones extratropicales se han desarrollado de forma continua hasta la actualidad. No obstante, sus resultados muestran una fuerte dependencia de factores como el conjunto de datos empleado,

las metodologías utilizadas, las variables consideradas en los criterios de identificación, y la delimitación espacial y temporal del estudio. Estas decisiones influyen significativamente en los resultados obtenidos, lo que puede derivar tanto en coincidencias como en divergencias con estudios previos, y dificulta la obtención de conclusiones comparables entre distintas investigaciones. Es por eso que Marrafon et al. (2021) resume las climatologías comparativas desarrolladas entre 2010 y 2020 y sintetizan los resultados de las tendencias obtenidas en cada una. Los trabajos que analizaron llegaron a conclusiones similares, donde los CE en el hemisferio sur ocurren principalmente entre los 35°S y 60°S, obteniendo su máxima frecuencia alrededor de los 45°S, y cerca del círculo antártico. Incluso, han destacado el este de Sudamérica, en especial de Argentina, como una región generadora de ciclones. Sin embargo, han diferido en cuestiones como la significancia de la tendencia y el signo de ésta.

Como se nombró anteriormente, los CE tienen un impacto significativo en áreas costeras, lo que resulta crucial para actividades náuticas en el Mar Argentino, un sector del Atlántico Sudoccidental de gran relevancia. Estas zonas están expuestas a fenómenos severos que, según Stephenson (2008), están asociados a pérdidas en términos de vidas humanas, capital o calidad ambiental, donde el riesgo dependerá de la probabilidad del evento, la exposición al peligro y la vulnerabilidad del lugar afectado. Estos eventos están fuertemente relacionados al viento generado por los sistemas de baja presión, es por eso que estudios como el de Laurila et al. (2021) han investigado los CE, mostrando que los asociados a ráfagas intensas se desarrollan mayoritariamente sobre áreas marinas y coinciden temporalmente con la presión mínima a nivel del mar. Asimismo, se destaca que los vientos sostenidos son responsables de la formación de olas, lo que plantea retos para la navegación, como señala Mateichuk et al. (2023). Las condiciones de tormenta afectan la toma de decisiones de la tripulación, y los métodos actuales de

navegación en estas situaciones son de eficacia limitada. Estudios recientes (Jing et al., 2021; Waskito et al., 2022; Maki et al., 2022; Lee et al., 2022) se han enfocado en mejorar la representación de condiciones meteorológicas severas y la operación de diferentes tipos de embarcaciones.

La importancia de abordar estos desafíos ha sido subrayada por el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS, 2020), que insta a los gobiernos a proporcionar servicios meteorológicos marinos para garantizar la seguridad náutica. Asimismo, organismos como la Organización Meteorológica Mundial y la Organización Marítima Internacional priorizan el desarrollo del conocimiento en meteorología marina, permitiendo mejorar la planificación de rutas comerciales y la seguridad ante fenómenos severos (WMO, 2022)

En base a todo lo expuesto, el objetivo de este trabajo es realizar una nueva climatología de la ocurrencia de ciclones extratropicales a partir de los datos del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), describiendo su distribución espacial y variabilidad temporal sobre el Mar Argentino y parte del Océano Atlántico Sudoccidental. Además, se enfocará la atención en estudiar casos severos de ciclones extratropicales y su impacto en la seguridad náutica hacia el final del trabajo.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Datos

En este estudio se utilizan datos del Reanálisis-2 del NCEP (National Center of Environmental Prediction)/ DOE (Department of Energy) (Kanamitsu et al., 2002), cuyo objetivo de creación fue corregir los errores y actualizar las parametrizaciones de los procesos físicos del Reanálisis-1 NCEP/NCAR, tales como la cobertura de nieve, el albedo oceánico, la humedad relativa y su relación con la nubosidad, entre otros (Betts et al., 2006). El período

a estudiar comprende desde enero 1979 a diciembre 2022.

Se utilizaron los datos de presión a nivel del mar (SLP) en intervalos de 6 horas, viento zonal y meridional (estos dos últimos a 10 m); los cuales están distribuidos espacialmente en una retícula de  $2,5^\circ$  de latitud por  $2,5^\circ$  de longitud. Con el viento zonal y meridional se calculó la intensidad del viento horizontal a 10 metros.

La resolución del reanálisis seleccionado, junto con el uso de la variable presión a nivel del mar, resulta adecuada para la identificación y el seguimiento de ciclones extratropicales, ya que permite evitar la detección de sistemas espurios o poco realistas que pueden surgir al emplear datos de mayor resolución, como los de ERA5 (Marrafon et al., 2022; Kodama et al., 2019; Sinclair, 1994). Además, si bien la resolución utilizada puede no captar sistemas de baja presión de menor escala, es considerada suficiente para el estudio de ciclones extratropicales de escala sinóptica, que constituyen el foco de este trabajo.

Si bien el Mar Argentino está definido como el sector del océano que cubre la porción menos profunda del margen continental argentino y se extiende, en términos generales, desde la boca del estuario del Río de la Plata en el norte, hasta el banco Burdwood en el sur, y desde la costa argentina hasta el comienzo del talud; el área de estudio se amplía fuera de estos límites imaginarios para cubrir toda la zona de responsabilidad nacional para la seguridad náutica. Ésta última zona nombrada, denominada NAVAREA VI, se extiende desde la costa de Argentina y desde el meridiano  $67^\circ 16' O$  hasta los  $20^\circ O$  y desde el paralelo de latitud  $35^\circ 50' S$  hacia el sur hasta las costas antárticas. Esta área también incluye la Península Antártica, el Mar de Bellingshausen, el Mar de Weddell y el Océano Atlántico Sudoccidental.

Con el fin de incorporar una porción del océano Pacífico Sur (ya que muchos de los sistemas

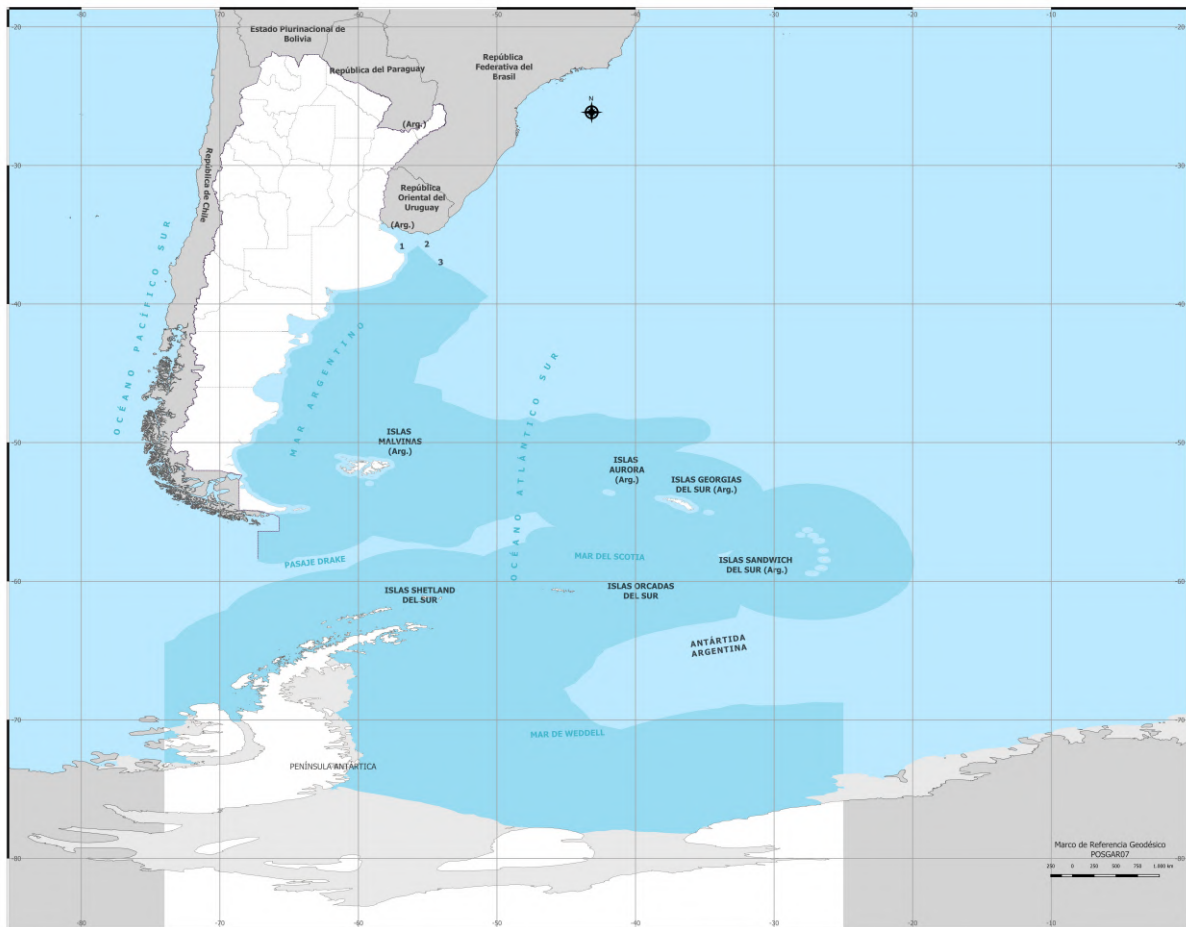
analizados tienen origen allí), el área de estudio en la Figura 1 finalmente se delimita entre las latitudes  $20^\circ S$  y  $80^\circ S$ , y longitudes  $80^\circ O$  a  $0^\circ$ .

## 2.2. Algoritmo de identificación de ciclones extratropicales

El algoritmo implementado para detectar CE en el sector de estudio seleccionado sigue al descrito por Blender et al. (1997) y Trigo et al. (1999), y más recientemente adaptado por Mendes et al. (2007) y Mendes et al. (2010). Un candidato a CE es identificado como un mínimo de SLP en un área de  $5 \times 5$  puntos de retícula (aproximadamente  $1,000 \text{ km} \times 1,000 \text{ km}$ ), que no debe superar el valor de 1010 hPa y que además el gradiente de presión entre los límites de ese área y dicho mínimo debe ser al menos de 1,1 hPa en 500 km.

El seguimiento temporal o trayectoria de los ciclones se realiza con un enfoque lagrangiano, utilizando la metodología del “vecino más cercano” (por su nombre en inglés, nearest neighbour), al igual que en los trabajos de referencia. La trayectoria de cada ciclón se determina suponiendo que el candidato toma la ruta de distancia mínima de un tiempo anterior a uno posterior, que en la resolución temporal de los datos implica un paso de seis horas, y que dentro de su trayectoria, el centro del ciclón estará siempre representado por el valor mínimo de SLP que este tome (siempre respetando el umbral mínimo y el valor del gradiente). Si el vecino más cercano no está dentro de un área impuesta por una velocidad máxima de ciclón de 33 km/h en la dirección oeste y de 90 km/h en cualquier otra, entonces la trayectoria se detiene. Estos valores se determinaron empíricamente observando el comportamiento de los ciclones en campos de presión a nivel del mar por los autores de los trabajos previos.

Una vez identificadas las trayectorias, sólo se utilizan aquellas que duraron 24 horas o más, con el fin de evitar el registro de eventos débiles con poco impacto en el tiempo meteorológico en la zona de estudio (Gan y



*Figura 1:* Dominio de estudio. El área sombreada indica los límites de la plataforma continental, la línea punteada azul indica el límite exterior de la zona económica exclusiva y la línea punteada amarilla indica el límite exterior de la plataforma continental. Los elementos geográficos representados en este mapa han sido aportados por la Comisión Nacional del Límite Exterior de la Plataforma Continental (COPLA) y el Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

Rao, 1991; Dal-Piva, 2001; Trigo, 2005). Las trayectorias también son filtradas para eliminar aquellas que corresponden exclusivamente a regiones continentales, evitando así clasificar como ciclones del Mar Argentino a sistemas que no cumplen con los criterios oceánicos necesarios. Una vez obtenidas las trayectorias finales, estas se clasifican según la estación del año en que ocurren, manteniendo el criterio meteorológico donde el verano abarca los meses de diciembre, enero y febrero (DEF); el otoño incluye marzo, abril y mayo (MAM); el invierno se clasifica con junio, julio y agosto (JJA); y por último, la primavera tiene los restantes meses de

septiembre, octubre y noviembre (SON).

Para estudiar la tendencia y su significancia se utiliza el test no paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall 1948), y la estimación no paramétrica de Sen (1968) se emplea para conocer la pendiente (siendo la pendiente el valor de la mediana entre todas las pendientes dadas entre pares de datos consecutivos), utilizando el paquete estadístico “trend” para R (Pohlert, 2016). La ventaja del test de Mann-Kendall es que no es necesario que los datos sigan una distribución normal.

### 2.3. Distancias recorridas por los ciclones extratropicales

Para estudiar las trayectorias de los CE, se asumió que la distancia total es la suma de los kilómetros recorridos en cada paso, calculados a través de la fórmula de Haversine:

$$d = r \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)} \quad (1)$$

Dicha fórmula es utilizada para calcular la distancia (d) entre dos puntos en la superficie de una esfera, presentada inicialmente por Sinnott (1984) y ampliamente utilizada para seguir sistemas sinópticos (por ejemplo Cox, 2018; Nilsson, 2020). Las distancias entre puntos sucesivos en la trayectoria asumen una superficie esférica para la Tierra, de radio r, y permite calcular distancias geodésicas a partir de las coordenadas de latitud ( $\varphi_1, \varphi_2$ ) y longitud ( $\lambda_1, \lambda_2$ ). Dado que la fórmula no tiene en cuenta la esfericidad achatada en los polos de la Tierra, se introduce una ligera aproximación, pero resulta adecuada para la escala de trayectorias analizada.

### 2.4. Profundización de los ciclones extratropicales

Una forma de cuantificar la intensificación de los ciclones es a través de la profundización, es decir, con la caída de la presión en el tiempo. Esto es natural, dado que está directamente relacionada con la generación de mínimos de vorticidad local. Siguiendo a varios autores, la tasa de profundización usada se ha ajustado geográficamente a una latitud de referencia, para tener en cuenta el hecho de que los ciclones en diferentes latitudes con gradientes similares producirían vientos geostroficados diferentes y, por lo tanto, no deberían considerarse con intensidades idénticas (por ejemplo, Serreze et al. 1997; Trigo et al. 1999; Gulev et al. 2001). Para el área de estudio se usó como referencia

geográfica media ( $\varphi_{ref}$ ) la latitud de 45°S, y  $\varphi_m$  representa la latitud media de cada ciclón durante las horas en las que la tasa es calculada:

$$\frac{dp}{dt_{adj}} = \frac{dp \sin(\varphi_{ref})}{dt \sin(\varphi_m)} \quad (2)$$

Como el interés recae en encontrar aquellos ciclones que se han profundizado a lo largo del tiempo, solo se representan las tasas negativas en la sección de Resultados. Para cada ciclón que efectivamente se profundizó se calculó el cambio de presión para cada paso de tiempo desde el inicio de la trayectoria hasta el mínimo alcanzado. Finalmente, se seleccionó el máximo cambio para cada uno de ellos (la tasa máxima de profundización ajustada).

### 2.5. Análisis de clusters para las trayectorias

El análisis de conglomerados o clusters es una técnica de clasificación que tiene por objetivo agrupar un conjunto de objetos o datos en grupos, de manera que aquellos dentro de cada grupo sean más similares entre sí que con los objetos de los otros clusters. En meteorología, este tipo de análisis se utiliza para identificar patrones comunes en distintas variables (como podrían ser la presión, la temperatura, la precipitación, entre muchas otras). Con el fin de caracterizar las trayectorias típicas de los sistemas, se llevó a cabo un análisis de clusters utilizando el método K-means, para cada estación del año. Se ha demostrado que dicha técnica estadística de agrupamiento es útil para agrupar datos ambientales (Clifton y Lundquist, 2012; Jiang et al., 2016; Nielsen et al., 2025).

Para evitar sesgos en el análisis, se realizó un filtrado de las trayectorias con variación mínima o nula en latitud o longitud ya que estas podrían representar ciclones estacionarios o con movimiento reducido, lo que no contribuiría a la identificación de patrones de movimiento. Dado que K-means requiere especificar el número de

clusters  $k$ , se utilizaron dos métodos comunes para seleccionar el número óptimo: el método del codo (“elbow method”) y el análisis de la silueta (“silhouette analysis”). Diversos trabajos utilizan ambas metodologías propuestas por Kodinariya et al. (2013) para la elección, como por ejemplo el de Di Bernardino et al. (2022), quien hace uso de estas dos técnicas para estudiar patrones sinópticos de viento.

Cada trayectoria fue sintetizada en un punto calculando el promedio de las latitudes y de las longitudes a lo largo de todo el recorrido para cada ciclón. Este paso permite simplificar en puntos promedio, que luego serán utilizados en el análisis de K-means, un método muy similar se aplica en el trabajo de Corporal-Lodangco et al. (2014). Una vez definidos los clusters se identificó para cada uno el punto más cercano al centroide del conglomerado, y de este se tomó su trayectoria completa como trayectoria representativa del grupo. Cada cluster está representado por un color distintivo, donde la trayectoria representativa de cada conglomerado se destaca con una línea de mayor grosor. Las trayectorias restantes que pertenecen a cada cluster se presentan con el mismo color, pero con menor espesor de línea, con el fin de visualizar de manera general el área de influencia de cada conglomerado dentro del dominio.

## 2.6. Análisis del viento en los ciclones extratropicales

Para cuantificar la severidad de los ciclones en el área de estudio se optó por utilizar la intensidad del viento horizontal a 10 metros (construida a partir de las componentes zonal y meridional) ya que esta variable es crucial para caracterizar el estado del mar, que ocupa la mayor parte del dominio analizado, dado su impacto directo en el oleaje y por lo tanto en la seguridad náutica (Heij y Krapp, 2015). Se seleccionó el valor de viento máximo ( $V_{max}$ , en adelante) asociado a cada ciclón en cada tiempo de su trayectoria. Esto se logra ubicando los centros de los CE hallados previamente en el conjunto de datos de viento, no solo en su inicio, sino en cada

tiempo de su trayectoria, y seleccionando el  $V_{max}$  alrededor del área de  $5 \times 5$  puntos de grilla planteada en la metodología. Adicionalmente se construyeron cuatro cuadrantes arbitrarios alrededor de los ciclones con el fin de no solo identificar el valor absoluto de los máximos de viento, sino de ver en qué sector se encuentran. Estos últimos quedaron definidos como NE-E, SE-S, SO-O y NO-N.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1. Climatología de ciclones extratropicales en el Mar Argentino y en el océano Atlántico Sudoccidental

#### 3.1.1. Ciclogénesis

A partir de los criterios de identificación y seguimiento de la sección anterior, se detectaron un total de 8870 ciclones a lo largo de los 44 años de estudio, con una media anual de 202 ciclones. El valor máximo se registró en 2009 con un valor de 241 eventos y un mínimo de 169 ciclones en 1985; lo que sugiere una variabilidad interanual en la cantidad de ciclones.

Al agrupar los ciclones extratropicales por estación, representados en la Figura 2 según la frecuencia absoluta, el otoño obtiene el máximo con 2394, seguido por el invierno con 2340. El verano se ubica en tercer lugar con 2092 y la primavera es la estación con menor cantidad, reuniendo 2044 ciclones. La diferencia entre las estaciones no es sustancial, distribuyéndose de manera relativamente homogénea, y este comportamiento es consistente con Simmonds y Keay (2000) quienes reportan medias de ciclones prácticamente equivalentes para otoño, invierno y primavera. Mendes et al. (2007) y Gan y Rao (1991) identifican el invierno como la estación con mayor frecuencia absoluta, y Satyamurty et al. (1990) lo identifica en el verano. Sin embargo, en todos estos trabajos, las diferencias entre estaciones no son lo suficientemente marcadas como para destacar una sobre las demás de manera concluyente.

En verano, el pico de actividad se presenta en 2014 con un total de 61 casos, mientras que en otoño el máximo corresponde a 2018 con 69 eventos. En invierno, el mayor número de ciclones extratropicales se observa en 2011, con 73 eventos registrados, y en primavera el máximo ocurre en 2002 con 68 casos. Estos resultados indican que el invierno contiene el año de mayor cantidad de ciclones extratropicales (resultados similares obtuvieron Gan y Rao (1991), donde los máximos anuales están de mayo a julio), y en particular, la primavera tiene el año de menor cantidad de eventos con 31 ciclones en 1986.

Para evaluar la posible existencia de un comportamiento determinístico estacional se aplicó el test de Mann-Kendall, el cual indica la presencia de tendencia con un 95% de confianza, para el invierno, el verano y el otoño. Para estas estaciones se calcula adicionalmente la pendiente de Sen, la cual para el invierno y el verano muestra un aumento de aproximadamente un CE cada 5 años, y para el otoño de uno cada 3,5 años.

Para estudiar la ciclogénesis de manera espacial, se partió de la posición inicial de cada una de las trayectorias de ciclones identificadas en cada estación del año y se construyó una malla que abarca todos los puntos de intersección de latitud y longitud dentro de la resolución horizontal del conjunto de datos utilizado. Esto permitió contabilizar cuántos eventos ocurrieron dentro de cada celda y obtener una distribución espacial de la frecuencia absoluta de ciclogénesis en cada estación del año.

Con el objetivo de visualizar patrones más detallados y continuos en la distribución espacial se empleó la función de densidad de Kernel (Weglarczyk, 2018), una herramienta estadística no paramétrica que proporciona una imagen más fluida de la distribución generada anteriormente, facilitando la identificación de regiones con mayor concentración de eventos. En la Figura 3, se muestra para cada estación la densidad de ciclogénesis, y las referencias en

estos gráficos etiquetan el valor relativo de la densidad estimada en cada región del dominio. Estos valores no tienen una unidad física directa, sino que son valores que representan cuán densamente están agrupados los puntos de datos en ciertas áreas (cuanto mayor sea el valor, mayor será la probabilidad de que se origine un ciclón en esa región). En este tipo de gráfico, la escala de densidad depende de la dispersión y el número de puntos de datos, y es por eso que las etiquetas suelen ser números muy pequeños. La representación resultante facilita la identificación de núcleos correspondientes a regiones con mayor actividad ciclogénica.

Durante el invierno, se encuentran tres regiones principales de máxima cantidad de ciclogénesis. Esto concuerda bien con estudios previos de Satyamurty et al. (1990), Gan y Rao (1991), Simmonds y Keay (2000), Hoskins y Hodges (2005), Mendes et al. (2007), Gramscianinov et al., (2019), entre otros. El primer área ciclogénica se ubica sobre la región costera entre Uruguay y el sur de Brasil (con el máximo extendiéndose hacia la zona del Río de la Plata), mientras que la segunda área y tercer área se ubican al sur de la isla Grande de Tierra del Fuego y el pasaje Drake, junto a las primeras islas de la península Antártica. Para las estaciones restantes, la posición geográfica de las regiones más activas permanece bastante constante, aunque en verano están ligeramente desplazados hacia el norte en la zona costera. A diferencia de Mendes et al. (2007), no se encuentra que el otoño sea menos activo en términos de ciclogénesis. A pesar de utilizar una metodología y/o datos diferentes, los resultados presentados aquí concuerdan en general con los principales mecanismos asociados con el desarrollo de ciclones frecuentemente sugeridos para esta área, a saber, la inestabilidad baroclínica asociada a los vientos del oeste y el desarrollo de ciclones inducido por la orografía en el lado de sotavento de la cordillera de Los Andes (Gan y Rao, 1991; Gan y Rao, 1994; Sinclair, 1995; Bonatti y Rao, 1987).

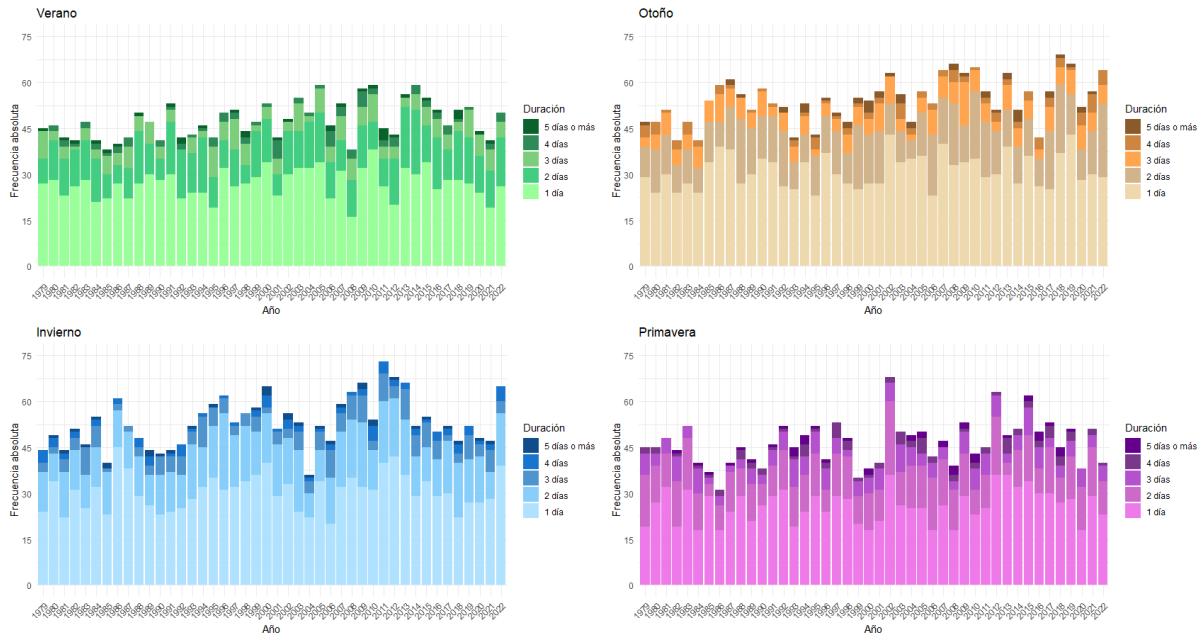


Figura 2: Cantidad de ciclones extratropicales, discriminados por tiempo de vida en días, por estación, para los años 1979 a 2022.

El máximo identificado en las proximidades de los  $60^{\circ}$  S y  $77,5^{\circ}$  O puede deberse no solo a ciclones que se originan en esa región, sino también a aquellos que han viajado desde el océano Pacífico Sur y que, debido a las limitaciones del dominio utilizado, no han sido completamente considerados en el análisis.

### 3.1.2. Tiempo de vida y distancia recorrida

Las Figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, histogramas del tiempo de vida de los ciclones y la distancia total recorrida para los sistemas originados dentro del área de estudio. Estos gráficos presentan la frecuencia en términos relativos, es decir, el número de ciclones de cada clasificación está ponderado por el total de ciclones registrados en esa estación específica. De este modo, los datos se expresan como un porcentaje del total estacional, permitiendo comparar las características estacionales del año.

Para todas las estaciones, como muestra la Figura 4, el mayor porcentaje de ciclones

corresponde a los que tienen una duración de un día, representando entre el 26 % y el 28 % de los casos, dependiendo de la época del año. A partir de este punto, la frecuencia de ciclones disminuye a medida que aumenta la duración de los mismos. La distribución con la cola más extensa corresponde al otoño, con casos que alcanzan hasta 9 días de duración, seguida de la primavera, donde se observan ciclones que persisten hasta 8 días. Por su parte, en el estudio de Mendes et al. (2010), se reportan tiempos de vida superiores, alcanzando hasta 12 días y esto se atribuye al dominio geográfico considerado, que incluía una porción del océano Pacífico Sur. De manera similar, Simmonds y Keay (2000a) reportan una media de duración de ciclones en el hemisferio sur de algo más de 3 días, con máximos que llegan hasta 14 días, resaltando la influencia que tiene el dominio de estudio en la evaluación de la duración de estos sistemas.

Analizando más en detalle los resultados de la Figura 2 (que fue previamente presentada para mostrar la frecuencia absoluta por año) se agrupa el tiempo de existencia de los ciclones en cinco categorías: 1 día, 2 días, 3 días, 4 días,

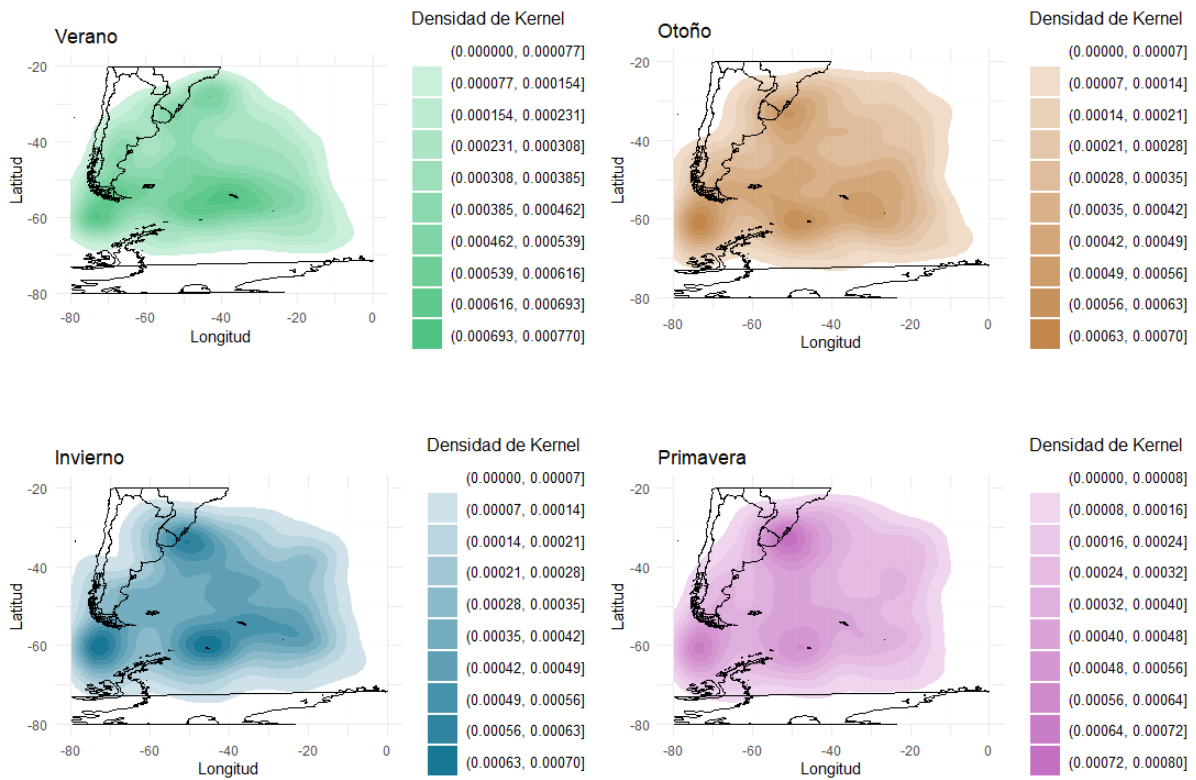


Figura 3: Densidad de ciclogénesis por estación cada estación para el período de 44 años.

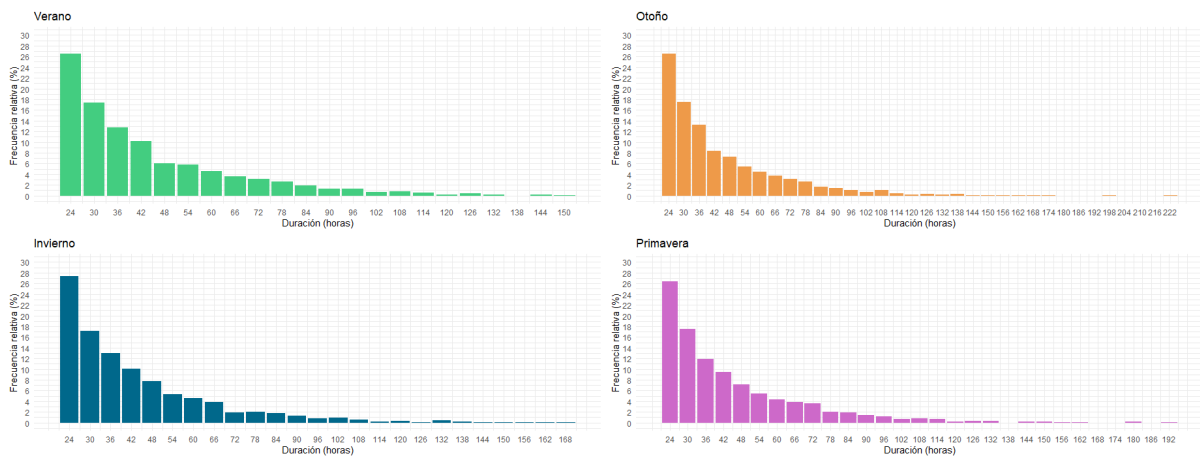


Figura 4: Distribución del tiempo de vida (cada 6 horas) de los ciclones extratropicales con un mínimo de 1 día, por estación, para el período de 44 años.

y 5 días o más. La categoría “1 día” incluye aquellos ciclones cuya duración oscila entre 24 y 36 horas, mientras que en la categoría “2 días” se agrupan los sistemas que persisten entre 42 y 60 horas. Del mismo modo, la categoría

“3 días” abarca aquellos que duran entre 66 y 84 horas, y la categoría “4 días” incluye los ciclones con una duración de entre 90 y 108 horas. Finalmente, la categoría de “5 días o más” agrupa a todos aquellos sistemas cuya duración

incluye y supera las 114 horas. Los resultados de este análisis indican que el otoño acumula 48 casos que duran 5 días o más (los mismos se producen en sólo 27 años del período de estudio) y la primavera acumula 44 casos (en 26 años), siendo estas estaciones de transición las que más casos reúnen. Restan el invierno con 35 ciclones de 5 días o más (en 28 años) y el verano con 34 casos en 26 años. En cuanto a las distribuciones de los ciclones que duran uno o dos días, se observa un comportamiento uniforme entre las cuatro estaciones del año.

Los resultados relacionados a las distancias recorridas obtenidos se presentan en la Figura 5, agrupados en intervalos de 250 km, desagregados por estación del año. El invierno es la estación con la mayor distancia recorrida, con 8090,7 km. Al igual que las estaciones restantes, tiene su máxima frecuencia en el intervalo de 750 a 1000 km, pero a diferencia de ellas, el invierno es el que más casos computa en el intervalo de 1500 a 1750 km. Los máximos restantes se ubican en 7634 km para la primavera, 6790,2 km para el otoño y 6149,6 para el verano. La trayectoria con longitud más larga se produce en invierno, mientras que la más corta se encuentra en verano (lo mismo sucede por ejemplo en Simmonds y Keay, 2000a).

Aunque las figuras muestran una disminución constante de la frecuencia en las distancias de trayectoria más largas, alrededor del 1 al 2% de los sistemas viajan entre 3000 y 3250 km. Para las distribuciones de verano y otoño, los intervalos que abarcan de 0 a 500 km tiene ligeramente mayor frecuencia comparado con el invierno y la primavera. Esto puede deberse a la aparición de sistemas cuasi estacionarios sobre el continente relativamente cálido (Mendes et al., 2010).

### 3.1.3. Intensidad (profundización) de los ciclones

En la Figura 6 se presentan los resultados de la tasa máxima de profundización de los CE, construidas a partir de las metodologías de

la sección 2.4. Para los datos utilizados en el estudio, el invierno presenta el caso de mayor profundidad, con una caída de -18,35 hPa en 6 horas (seguido por el otoño con -17,47 hPa/ 6h, la primavera con -17,03 hPa/ 6h y finalmente el verano con -15,29 hPa/ 6h).

Particularmente, en el invierno, el segundo y tercer intervalo (de derecha a izquierda) concentran la mayor frecuencia relativa, comparado al resto de las estaciones donde esto sucede entre el primer y segundo intervalo. Esto indicaría que, no solo el invierno alcanza el valor más alto de máxima profundización, sino que tiene una media de profundización mayor que la del resto. Esto fue efectivamente confirmado, calculando la media de todos los valores de tasa máxima de profundización para todas las estaciones, obteniendo un valor máximo de -4,49 hPa/6h en invierno. En rasgos generales, las distribuciones en forma y valores alcanzados son similares a las encontradas en Mendes et al. (2010).

### 3.1.4. Trayectorias de los ciclones

Los resultados obtenidos del análisis de cluster mencionado en la sección de Metodología muestran variaciones en función de la estación del año, y para el verano y el otoño ambos métodos (elbow method y silhouette analysis) sugieren en que el número óptimo de clusters es  $k=3$ . Sin embargo, en invierno y primavera, sugieren que  $k=2$  funciona mejor. Una vez establecidos dichos clusters e identificada la trayectoria representativa para cada uno, se graficaron para el área de estudio en la Figura 7, siguiendo lo descrito en la sección de Metodologías para el estilo del gráfico.

Los clusters identificados se dividen en dos grandes regiones con trayectorias definidas: una que abarca la zona de la costa bonaerense de Argentina, la costa uruguaya y el sur de Brasil (predominante en verano-otoño); y otra que se localiza en la región cercana a la península Antártica y el pasaje Drake. Esta última región muestra una subdivisión en dos trayectorias: una

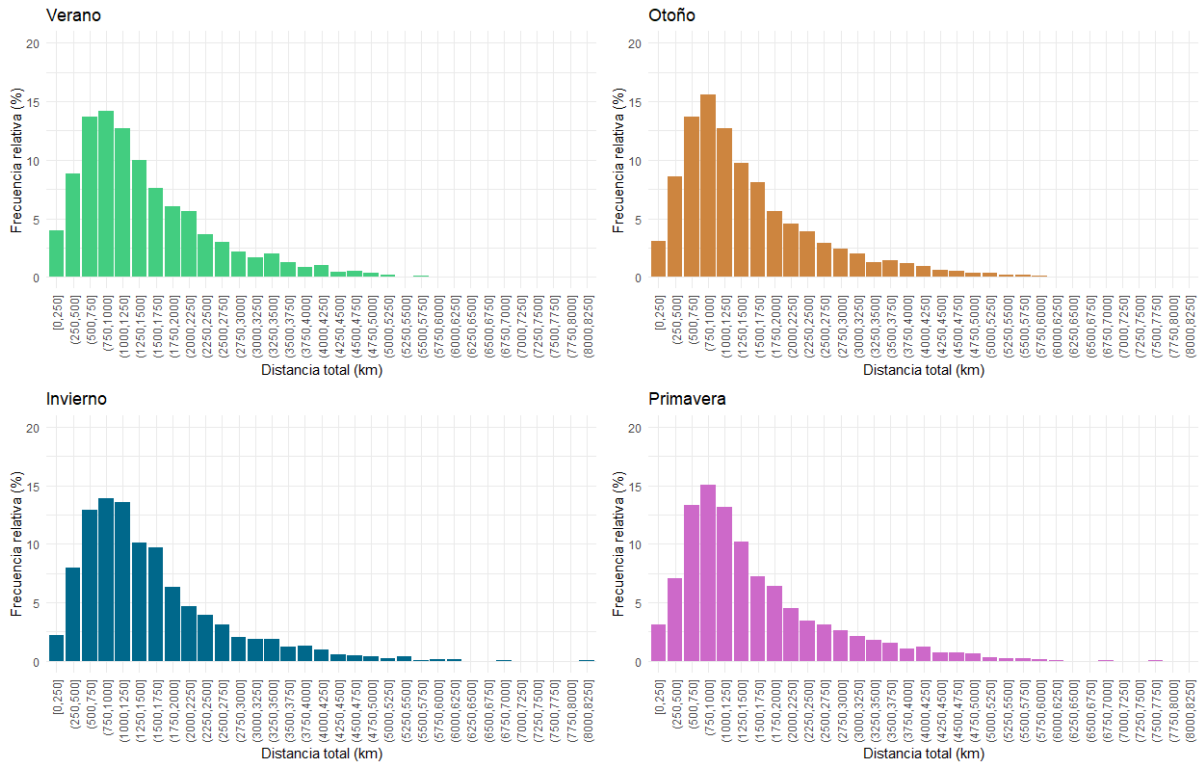


Figura 5: Distribución de la distancia total recorrida de los ciclones extratropicales, por estación, para el período de 44 años.

que se origina en el continente, en la región de la isla Grande de Tierra del Fuego (cuyo punto de origen varía al norte o al sur según la estación del año), y otra que se inicia sobre los límites del Mar Argentino y continúa su desplazamiento principalmente zonal alrededor de los 55°S sobre el océano Atlántico, hacia el sur. Las regiones mencionadas previamente coinciden con zonas de ciclogénesis, tal como se discutió en la sección 3.1.1. Estas áreas son de particular relevancia debido a la frecuencia con la que se desarrollan sistemas en las mismas.

### 3.2. Viento y severidad en los ciclones extratropicales

La Tabla I resume los valores estadísticos de  $V_{max}$  registrados en nudos (kt), obtenidos a partir de las metodologías de la sección 2.4, y se puede ver claramente que los valores extremos están presentes en el invierno. Además, al clasificar todos los  $V_{max}$  por el cuadrante en el que se encontraban, se observó que los del sector

norte (NE-E, NO-N) son dominantes.

Así como se hizo el análisis de profundización ( $dp/dt$ ), se procedió a examinar el cambio temporal del  $V_{max}$ , a fin de analizar su aceleración. Esto incluyó los incrementos en  $V_{max}$  en cada paso temporal de todas las trayectorias, los cuales se clasificaron en intervalos y se representaron en la Figura 8. Las distribuciones estacionales exhiben patrones similares y el máximo cambio se dió en el invierno, con 33,51 kt en 6 horas.

Este cálculo adicional se realizó también para relacionar directamente la variación de la intensidad del viento con el cambio de presión. Para ello, se identificó en cada ciclón el momento de máxima profundización (mínimo  $dp/dt$ ) y el momento de máxima aceleración (máximo  $dV/dt$ ). En todas las estaciones el valor máximo de  $dV/dt$  ocurre 6 horas después del mínimo  $dp/dt$ . Este resultado es consistente, dado que el apretamiento isobárico precede a la

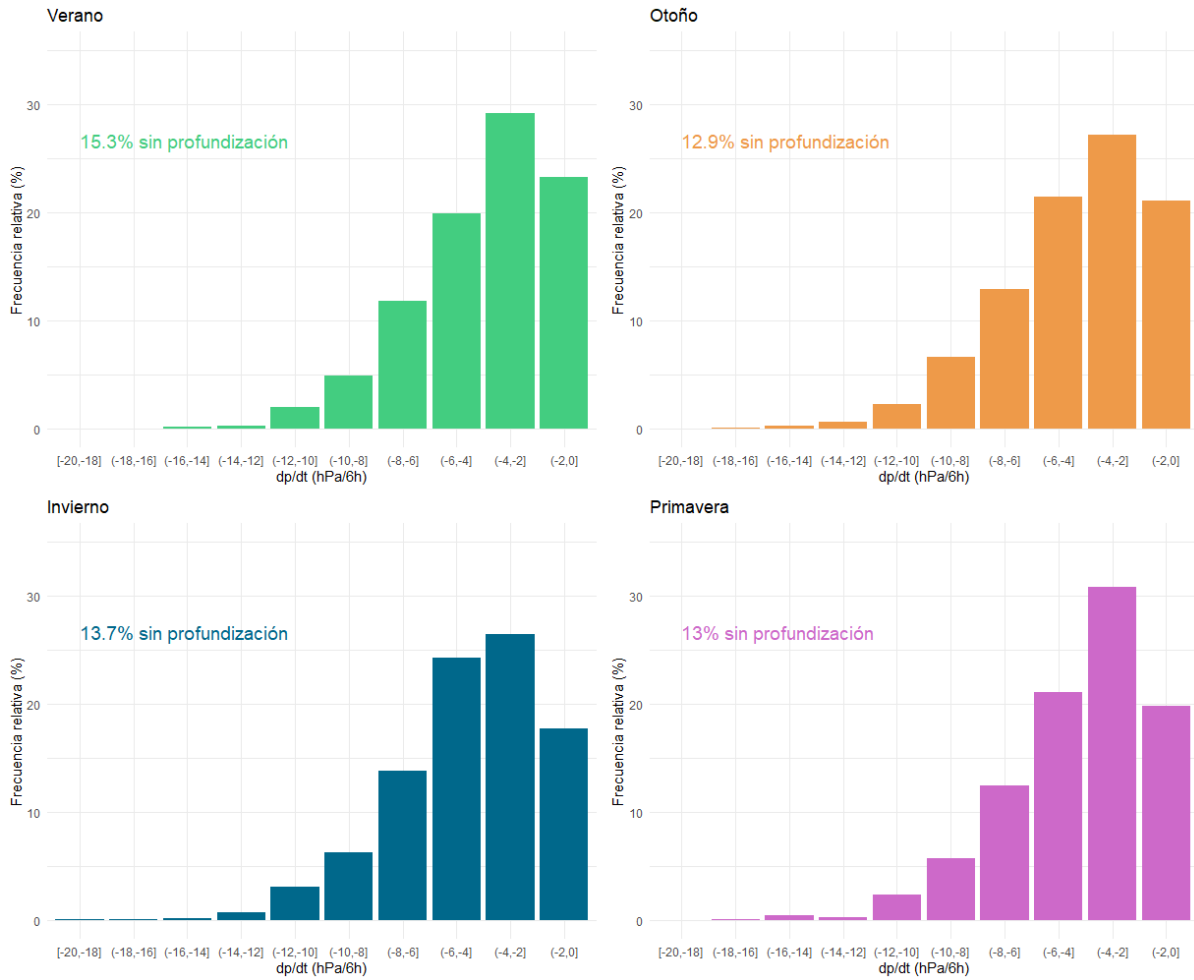


Figura 6: Distribución de la tasa máxima de profundización, ajustada geostróficamente a 45° S, por estación, para el período de 44 años. El porcentaje de ciclones sin profundización representa a aquellos que fueron detectados en su mínimo de presión y por lo tanto su tasa de cambio fue positiva.

	Min	2 <sup>do</sup> cuartil	Mediana	Media	3 <sup>er</sup> cuartil	Max
<b>Verano</b>	9,93	28,59	34,11	34,50	40,02	70,76
<b>Otoño</b>	9,49	30,54	36,31	36,74	42,57	77,44
<b>Invierno</b>	8,34	31,55	37,55	38,00	44,16	82,59
<b>Primavera</b>	9,66	29,82	35,66	35,98	41,87	68,77

Tabla I: Resumen estadístico para la variable  $V_{max}$  (kt) para todas las estaciones del año, de 1979 a 2022.

intensificación del viento en el sistema.

Después de examinar los valores máximos de  $V_{max}$  en su conjunto, se definió un criterio

de severidad para los ciclones en el área de estudio. Dado que la intensidad del viento está estrechamente ligada a la altura de las olas en mar abierto, se utilizó la escala Beaufort

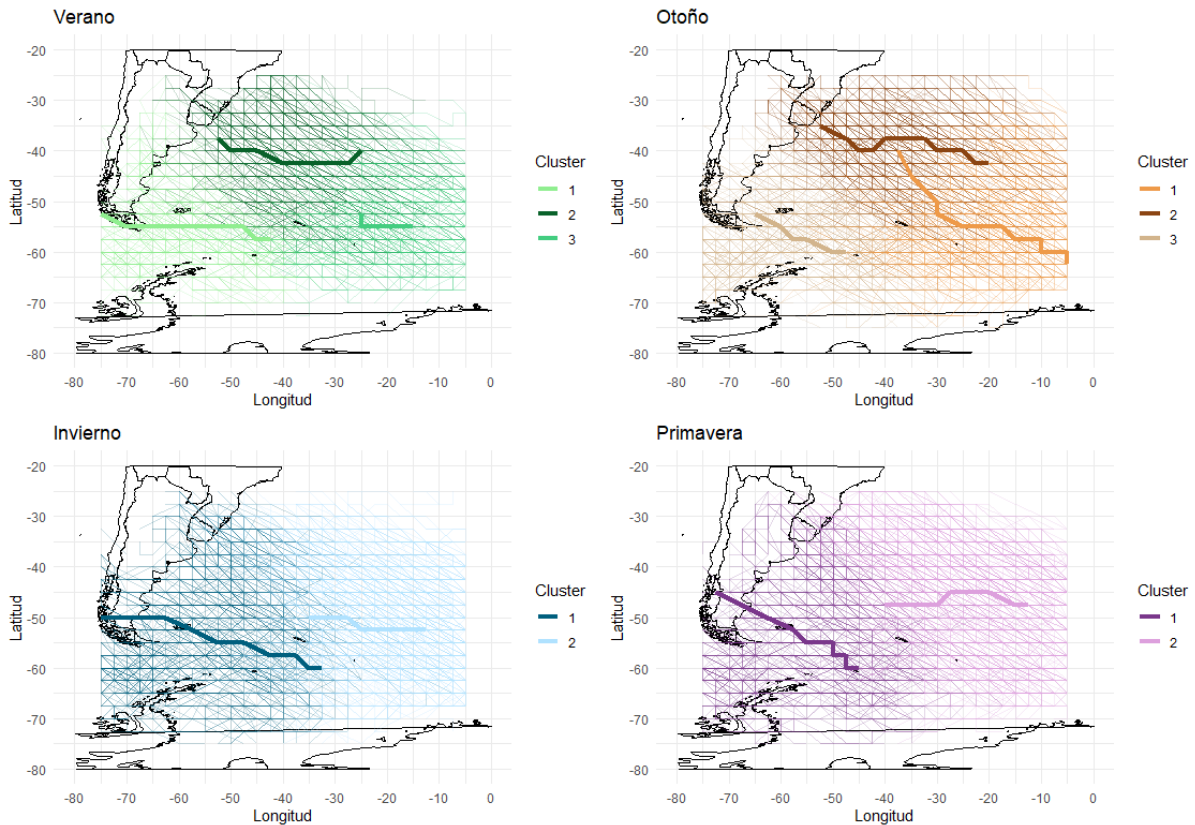


Figura 7: Clusters de trayectorias por estación luego de aplicar K-means. En línea gruesa se grafica la trayectoria representativa de cada cluster.

como referencia para establecer dicho criterio. En la actualidad, esta escala se usa ampliamente en meteorología para clasificar la velocidad del viento en función de sus efectos tanto en el mar como en tierra. Es por eso que el Servicio de Hidrografía Naval cuenta con un Atlas de olas (Publicación H-5182, 2019) utilizado por los buques en la zona de responsabilidad nacional, en base al cual se obtuvo el umbral de severidad. Tras un análisis detallado, se determinó que a partir de una intensidad del viento de 35 kt se representa un nivel de severidad significativo asociado a una altura de ola promedio de 6 a 7,5 m. Este umbral no solo impacta la navegabilidad de pequeñas embarcaciones, sino que también supone riesgos operativos para buques de mayor tamaño y está comprendido dentro de la clasificación de fuerza 8 de la escala Beaufort. En la Tabla I se puede apreciar que el valor de 35 nudos se encontraba en torno al valor medio de los datos. Este hallazgo sugiere

que los ciclones extratropicales representan una influencia significativa en la seguridad náutica, con una tendencia a afectar diversos tipos de embarcaciones bajo el criterio seleccionado.

Se calculó para todos los ciclones el porcentaje de tiempo de vida en que presentaron  $V_{max}$  que superan o igualan el umbral de severidad, y los resultados se presentan en la Tabla II. La clasificación se dividió en cuatro categorías: un 0% si en ningún momento alcanzó el umbral; mayor a 0% y hasta 50% si el ciclón cumplió con el umbral en algún momento hasta la mitad de su duración total; mayor al 50% y menor al 100%; y, finalmente, aquellos ciclones que durante toda su vida presentaron  $V_{max}$  iguales o mayores a 35 nudos. Cabe destacar que el invierno muestra la mayor frecuencia relativa en los intervalos (50-100) y 100%, lo que sugiere que esta es la estación con mayor probabilidad de desarrollar eventos longevos severos que

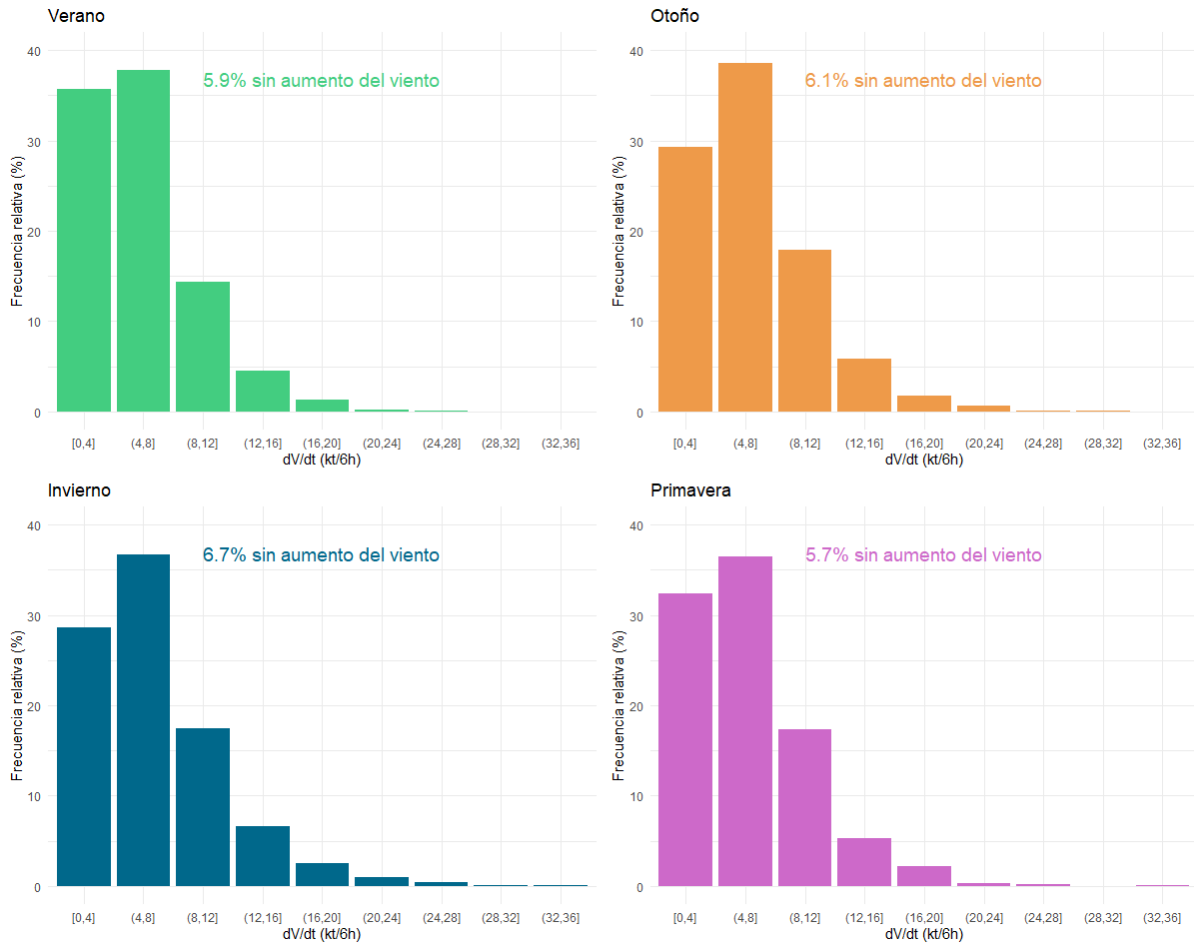


Figura 8: Distribución de la tasa de aceleración de  $V_{max}$ , por estación, para el período de 44 años. El porcentaje de ciclones sin aumento del viento representa a aquellos que durante su trayectoria la variable sólo disminuyó o se mantuvo constante.

impactan la seguridad náutica.

En la Figura 9, se muestran las trayectorias de aquellos sistemas que pasaron el total de su vida con vientos máximos superiores a 35 nudos (los ciclones de la columna 100% de la tabla anterior). En este gráfico, se representan las trayectorias individuales y se incluye una capa de densidad que muestra la concentración de las mismas. Se observa que los máximos de densidad se concentran sobre el océano Atlántico, mientras que el área de influencia de estas trayectorias varía ligeramente entre estaciones. Laurila et al. (2021) realizó un análisis similar en el norte europeo, donde clasificaron a los CE según las ráfagas de viento asociadas, encontrando también que los

más intensos tienden a originarse y ocurrir sobre áreas marinas. Durante el verano, las trayectorias más australes alcanzan un máximo de densidad en torno a los  $55^{\circ}$  S y  $25^{\circ}$  O. En otoño, aunque el máximo se sitúa en una posición similar, se observa una distribución más amplia que abarca tanto zonas más septentrionales como áreas cercanas a la península Antártica. En primavera, el patrón es similar, con el máximo de ocurrencia más desplazado hacia el norte. Por último, el invierno presenta un patrón distintivo respecto a las otras estaciones, con trayectorias más cercanas al continente y una densidad máxima desplazada hacia la costa, indicando una mayor proximidad de estos eventos severos al continente en esta estación.

	0%	(0%-50%]	(50%-100%)	100%
<b>Verano</b>	670	566	530	326
<b>Otoño</b>	542	600	738	514
<b>Invierno</b>	422	543	779	596
<b>Primavera</b>	511	533	618	382

Tabla II: Frecuencia absoluta de casos porcentaje de vida con  $V_{max}$  igual o mayor a 35 nudos de los ciclones extratropicales.

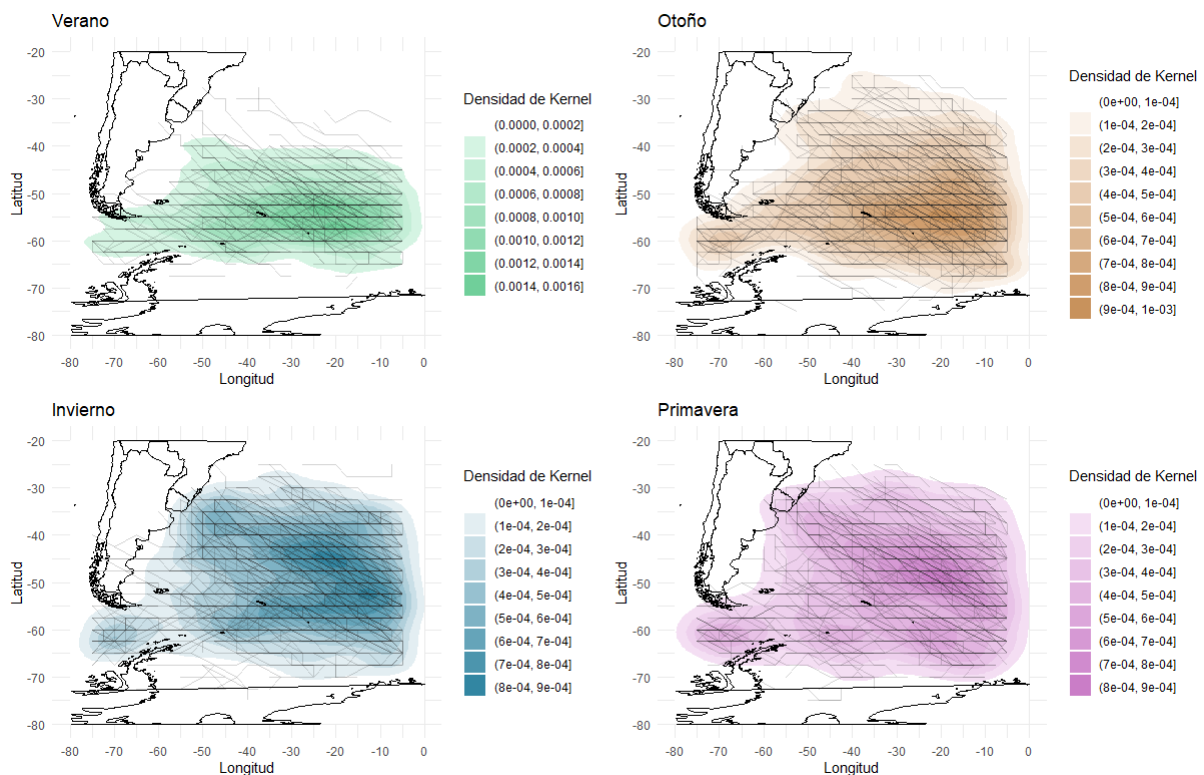


Figura 9: Densidad de ciclones con toda su vida con  $V_{max}$  igual o mayor a 35 nudos, por estación, cada estación para el período de 44 años.

### 3.3. Relación entre eventos de naufragio y ciclones extratropicales en el Mar Argentino

Con el objetivo de vincular los ciclones extratropicales con situaciones concretas de riesgo para la navegación, se incorporó al análisis una base de datos perteneciente a la Junta de Seguridad en el Transporte (JST) que contiene registros de naufragios ocurridos en el Mar Argentino entre los años 1983 y 2017. Esta base incluye información detallada de cada evento,

tales como el nombre de la embarcación, la fecha del siniestro, las coordenadas geográficas del acaecimiento, y la indicación de si hubo víctimas fatales asociadas al hecho.

En la Figura 10 (panel izquierdo) se presentan las ubicaciones geográficas de los naufragios según los registros de la JST. Cabe aclarar que algunas localizaciones se sitúan sobre y dentro de tierra firme, lo cual podría responder a imprecisiones en la georreferenciación original. Estos casos, en general, no mostraron una

conexión directa con eventos de actividad ciclónica significativa. Cabe señalar que los 102 casos analizados no necesariamente representan la totalidad de los hundimientos ocurridos entre 1983 y 2017, sino únicamente aquellos que fueron provistos por la JST. Además, algunos registros debieron ser descartados por falta de información geográfica precisa sobre el lugar del siniestro.

Cada uno de los eventos fue inspeccionado manualmente mediante la superposición de los campos de presión a nivel del mar y viento a 10 metros, junto con la climatología de ciclones extratropicales previamente elaborada. Debido a la falta de información sobre la hora exacta de ocurrencia de los siniestros, se analizaron los cuatro horarios sinópticos disponibles (00, 06, 12 y 18 UTC) correspondientes a la fecha del naufragio. La relación entre el ciclón y el naufragio se determinó como factible cuando el registro de posición de hundimiento coincidía exactamente con el centro del ciclón o estaba en algún punto dentro del área abarcada por dicho sistema (siempre dentro de la región con isobaras cerradas); lo cual podría haber generado las condiciones severas para afectar la seguridad náutica.

Del total de los 102 eventos registrados, se identificaron 33 casos (equivalentes al 32,4%) con posible vinculación a ciclones extratropicales. La distribución estacional de estos casos muestra una mayor incidencia durante el verano y el invierno. Geográficamente, los naufragios se concentran principalmente sobre la costa patagónica, una región que, según los resultados previos de este estudio, presenta una elevada frecuencia de trayectorias ciclónicas.

Si bien algunos eventos podrían haber sido vinculados a ciclones si los criterios establecidos en el algoritmo de reconocimiento fueran distintos, los casos identificados muestran que el impacto no se limita al hundimiento de embarcaciones, sino que al menos 19 personas perdieron la vida, cifra que podría ser mayor

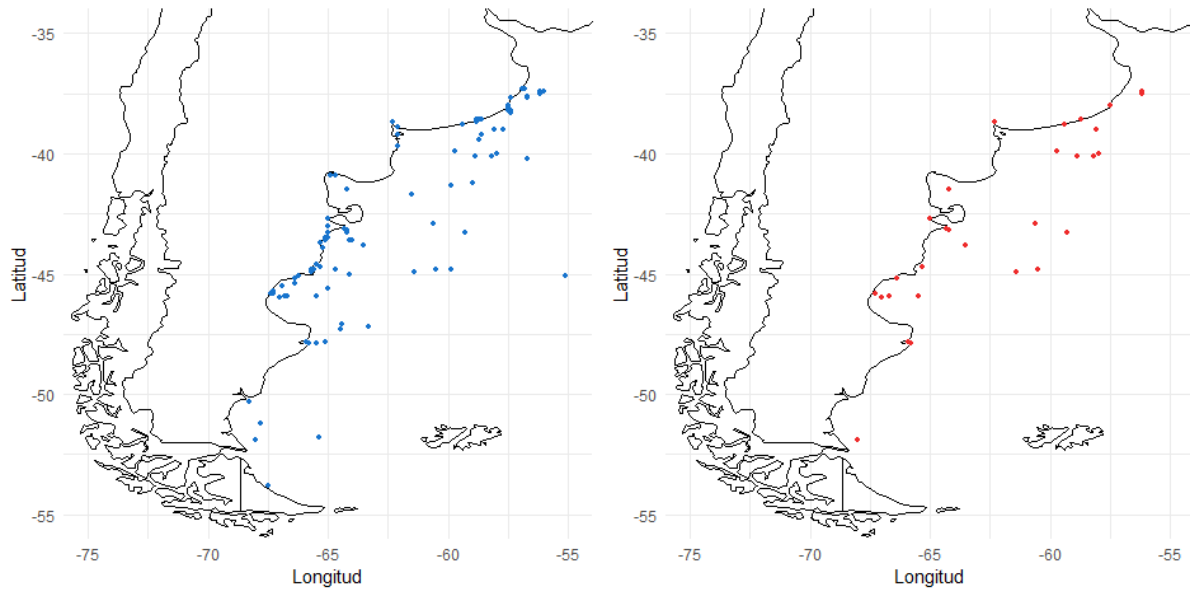
considerando la falta de datos en varios informes. Esto resalta la necesidad de continuar realizando este tipo de estudios que integren información meteorológica para mejorar la prevención y la seguridad en la navegación.

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron diversos aspectos climatológicos de los ciclones extratropicales en la costa y Mar Argentino, así como en el océano Atlántico Sudoccidental. Este análisis entre 1979 y 2022 proporcionó nueva información que contribuye al entendimiento de estos sistemas, que afectan la región marítima del país y a sus usuarios, además de ser útil para futuras investigaciones. Algunas de las características analizadas incluyeron las zonas de mayor ciclogénesis, la duración de los ciclones, su profundización y las distancias recorridas dentro del área de estudio. Estas propiedades, así como su identificación inicial, fueron abordadas de manera similar a estudios previos realizados en la región. No obstante, otras metodologías -como la identificación y agrupación de trayectorias preferenciales- fueron adaptadas a partir de trabajos desarrollados en otras regiones del globo y aplicadas en este contexto.

Aunque los resultados obtenidos coinciden en parte con los de investigaciones anteriores (como en el caso de las trayectorias identificadas por Mendes et al., 2010), el enfoque empleado permite nuevas formas de visualización e interpretación de los datos. Prueba de ello es el aporte más novedoso de este trabajo que utiliza la intensidad del viento para identificar las zonas geográficas más afectadas por ciclones extratropicales severos, así como en la exploración de su posible vínculo con eventos de naufragio frente a las costas argentinas.

Se encontraron regiones características para la formación de ciclones ubicadas sobre la región costera entre Uruguay y el sur de Brasil (con el máximo extendiéndose hacia la zona del Río de la Plata), y hacia el sur de la isla Grande de Tierra del Fuego y el pasaje Drake, junto



*Figura 10:* Distribución de los hundimientos registrados por Prefectura Naval Argentina entre 1983 y 2017. En el panel izquierdo se encuentran todos los casos informados y en el derecho, aquellos que pudieron estar afectados por un ciclón extratropical.

a las primeras islas de la península Antártica. La mayor densidad de ciclones extratropicales se observó al sur de los 45°S en todas las estaciones. El otoño y el invierno fueron las estaciones con mayor cantidad de ciclones formados en esta región.

En cuanto al tiempo de vida, el otoño y la primavera resaltaron con los ciclones más duraderos; sin embargo, el invierno se destacó por contener los casos con mayor distancia recorrida. En lo que respecta a la profundización, el invierno también se distinguió, ya que presentó tanto el mayor valor absoluto de la tasa en seis horas como la media más elevada de las cuatro estaciones.

Para comprender mejor el recorrido promedio de los ciclones, se utilizó un análisis de clusters que arrojó dos regiones con trayectorias definidas: una que abarca la zona de la costa bonaerense de Argentina, la costa uruguaya y el sur de Brasil; y otra en la región cercana a la península Antártica y el pasaje Drake. Esta última región muestra una subdivisión en dos trayectorias: una que se origina en el continente, en la región de la

isla Grande de Tierra del Fuego (cuyo punto de origen varía al norte o al sur según la estación del año), y otra que se inicia sobre los límites del Mar Argentino. Estos resultados muestran poca variabilidad en la región de influencia de los ciclones en las áreas estudiadas.

Se empleó la intensidad del viento a 10 metros para cuantificar la severidad de estos sistemas en el océano Atlántico Sudoccidental. El análisis estadístico del viento horizontal máximo mostró que el valor absoluto más alto se observa en el invierno. Al clasificar estos máximos por el cuadrante de ubicación, se encontró la mayor ocurrencia en la zona norte. Luego de establecer un criterio de severidad de viento igual o superior a 35 nudos, se encontró que la frecuencia de ciclones que pasan la totalidad de su vida bajo este umbral es mayor en invierno, estación que se destaca como la de mayor impacto potencial en la seguridad. La ubicación de estos casos se posiciona predominantemente sobre el océano.

El análisis de los naufragios junto con la ocurrencia de los CE sugiere que hay

una relación estrecha entre estos eventos, lo que refuerza la importancia de integrar el conocimiento climatológico de los ciclones extratropicales en la planificación marítima, especialmente en regiones propensas a su desarrollo, con el fin de reducir riesgos y preservar vidas humanas.

Agradecimientos: A la Junta de Seguridad en el Transporte por la información sobre naufragios en el Mar Argentino. A los/as revisores/as por sus interesantes y valiosos comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- Betts, A. K., Zhao, M., Dirmeyer, P. A., & Beljaars, A. C. M. (2006). Comparison of ERA40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22). <https://doi.org/10.1029/2006JD007174>
- Blender, R., Fraedrich, K., & Lunkeit, F. (1997). Identification of cyclone track regimes in North Atlantic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123(539), 727-741. <https://doi.org/10.1002/qj.49712353910>
- Clifton, A., & Lundquist, J. K. (2012). Data clustering reveals climate impacts on local wind phenomena. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(8), 1547-1557. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-11-0227.1>
- Corporal-Lodangco, I. L., Richman, M. B., Leslie, L. M., & Lamb, P. J. (2014). Cluster analysis of North Atlantic tropical cyclones. *Procedia Computer Science*, 36, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.096>
- Cox, T. S., Hoi, C. S., Leung, C. K., & Marofke, C. R. (2018). An accurate model for hurricane trajectory prediction. 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2, 534-539. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/COMPSAC.2018.10290>
- Dal Piva, E. (2001). Estudio de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. Master Thesis, INPE-8498-DTI/781, 162pp. <http://marte3.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.50/doc/publicacao.pdf>
- Di Bernardino, A., Iannarelli, A. M., Casadio, S., Pisacane, G., Mevi, G., & Cacciani, M. (2022). Classification of synoptic and local-scale wind patterns using k-means clustering in a Tyrrhenian coastal area (Italy). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2), 30. <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00871-z>
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1994). The influence of the Andes Cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 122(6), 1141-1157. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122%3C1141:Tiotac%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122%3C1141:Tiotac%3E2.0.CO;2)
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1991). Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119, 1293-1302. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2)
- Gulev, S. K., Zolina, O., & Grigoriev, S. (2001). Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, 17, 795-809. <https://doi.org/10.1007/s003820000145>
- Heij, C., & Knapp, S. (2015). Effects of wind strength and wave height on ship incident risk: Regional trends and seasonality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.016>
- Jiang, N., Qian, W., & Leung, J. C.-H. (2016). The global monsoon division combining the k-means clustering method and low-level cross-equatorial flow. *Climate Dynamics*, 47, 2345-2359. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2967-5>
- Jing, Q., Sasa, K., Chen, C., Yin, Y., Yasukawa, H., & Terada, D. (2021). Analysis of ship maneuvering difficulties under severe weather based on onboard measurements and realistic simulation of ocean environment. *Ocean*

- Engineering, 221, 108524. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108524>
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., & Potter, G. L. (2002). NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1631-1643. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>
- Kendall, M. G. (1948). *Rank Correlation Methods*. Oxford University Press, New York.
- Kodinariya, T. M., & Makwana, P. R. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6), 90-95.
- Laurila, T. K., Gregow, H., Cornér, J., & Sinclair, V. A. (2021). Characteristics of extratropical cyclones and precursors to windstorms in northern Europe. *Weather and Climate Dynamics*, 2(4), 1111-1130. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-1111-2021>
- Lee, S. W., Sasa, K., Chen, C., Waskito, K. T., & Cho, I. S. (2022). Novel safety evaluation technique for ships in offshore anchorage under rough seas conditions for optimal ship routing. *Ocean Engineering*, 253, 111323. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111323>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Maki, A., Maruyama, Y., Dostal, L., Sakai, M., Sawada, R., Sasa, K., & Umeda, N. (2022). Practical method for evaluating wind influence on autonomous ship operations. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(4), 1302-1313. <https://doi.org/10.1007/s00773-022-00901-w>
- Marrafon, V. H., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., & Crespo, N. M. (2021). Extratropical Cyclones in the Southern Hemisphere: comparison among different Reanalyses. *Revista Brasileira de Climatología*, 28(1), 48-73. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14339>
- Mateichuk, V., Zinchenko, S., & Tovstokoryi, O. (2023). Automatic Control of the vessel in a storm. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, (26-27), 120-132. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20015.61605>
- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., & Mendes, M. C. (2010). Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 239-250. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0161-6>
- Mendes, D., Souza, E. P., Trigo, I. F., & Miranda, P. M. (2007). On precursors of South American cyclogenesis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 59(1), 114-121. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00215.x>
- Nielsen, E. B., Katurji, M., Zawar-Reza, P., & Cullen, N. (2025). Air temperature trends and extreme warming events across regions of Antarctica for the period 2003-2021. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(9), e2024JD043042. <https://doi.org/10.1029/2024JD043042>
- Nilsson, E., Engelke, W., Friederici, A., & Hotz, I. (2020). Tracking and Visualizing Multi-Center Cyclones. <https://doi.org/10.31219/osf.io/jqtua>
- Pohlert, T. (2016). Non-parametric trend tests and change-point detection. CC BY-ND, 4, 1-18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.4243>
- Possia, N., Vidal, L., & Campetella, C. (2011). Un temporal de viento en el Río de la Plata. *Meteorológica*, 36, 95-110.
- Pousa, J., D'Onofrio, E., Fiore, M., & Kruse, E. (2013). Environmental impacts and simultaneity of positive and negative storm surges on the coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Earth Science*, 68, 2325-2335. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1911-9>
- Satyamurty, P., Ferreira, C. D. C., & Gan, M. A. (1990). Cyclonic vortices over South America. *Tellus*, 42(1), 194-201. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.00016.x>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*,

- 63(324), 1379-1389. <https://psycnet.apa.org/doi/10.2307/2285891>
- Simmonds, I., & Keay, K. (2000b). Variability of Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958–97. *Journal of Climate*, 13(3), 550-561. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C0550:VOSHEC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C0550:VOSHEC%3E2.0.CO;2)
- Simmonds, I., & Keay, K. (2000a). Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5), 873–885. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013\(0873:MSHECB\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013(0873:MSHECB)2.0.CO;2)
- Sinclair, M. R. (1995). A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 123(6), 1601-1619. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123%3C1601:ACOCFT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123%3C1601:ACOCFT%3E2.0.CO;2)
- Sinnott, R. W. (1984). Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*, 68(2), 159.
- SOLAS, I. (2020). Consolidated Text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and Its Protocol of 1988. International Maritime Organization, London.
- Stephenson, D. B., Diaz, H. F., & Murnane, R. J. (2008). Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. *Climate Extremes and Society*, 340, 11-23.
- Taljaard, J. J. (1967). Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6, 973–987. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006\(0973:DDAMOC\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006(0973:DDAMOC)2.0.CO;2)
- Trigo, I. F. (2006). Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 26(2), 127-143.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., & Bigg, G. R. (1999). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of Climate*, 12(6), 1685-1696. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C1685:OCOCIT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C1685:OCOCIT%3E2.0.CO;2)
- Waskito, K. T., Sasa, K., Chen, C., Kitagawa, Y., & Lee, S. W. (2022). Comparative study of realistic ship motion simulation for optimal ship routing of a bulk carrier in rough seas. *Ocean Engineering*, 260, 111731. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111731>
- Weglarczyk, S. (2018). Kernel density estimation and its application. ITM Web of Conferences, 00037. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20182300037>
- World Meteorological Organization. (2022). Maritime Forecasting, Meteorology and WMO: History and Evolution. MMO Series No. 4, Geneva.