

Caracterización de la precipitación y el viento en la climatología asociada a ciclones

Tu Nombre

29 de enero de 2026

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación	7
1.1.1. Objetivo General	7
1.1.2. Objetivos Específicos	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Ciclones extratropicales en el Hemisferio Sur	9
2.1.1. Definición, estructura y terminología básica	9
2.1.2. Storm tracks del Hemisferio Sur y su variabilidad	9
2.2. Ciclogénesis en Sudamérica y Atlántico Sur	9
2.2.1. Rol de los Andes y la ciclogénesis a sotavento	9
2.2.2. Hotspots y regionalización (RG1–RG3)	10
2.2.3. Ambientes de génesis y trayectorias típicas	10
2.3. Identificación y tracking objetivo de ciclones	10
2.3.1. Criterios de detección: presión vs vorticidad (850 hPa)	10
2.3.2. Métricas del ciclón: intensidad, tamaño, velocidad y duración	11
2.3.3. Sensibilidad a reanálisis y consistencia entre bases	11
2.4. Ciclo de vida y fases del ciclón	11
2.4.1. Ciclo de vida y evolución temporal de propiedades	11
2.4.2. Definición operativa de fases: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento	11
2.4.3. No linealidad y transiciones de fase	12
2.5. Viento y precipitación asociados a ciclones y sus extremos	12
2.5.1. Organización espacial de viento y precipitación en ciclones	12
2.5.2. Extremos en superficie y desplazamiento respecto al centro	12
2.5.3. Justificación del análisis por región y fase	13
2.6. Enfoques multivariados para patrones espacio-temporales	13
2.6.1. EOF/PCA: concepto y utilidad en meteorología	13
2.6.2. EOF por fase y por región: interpretación física	13
2.6.3. Distribuciones de extremos (KDE/histogramas) como complemento	13
3. Metodología	15
3.1. Diseño general del estudio	15

Índice general

3.2.	Datos y preprocesamiento	15
3.2.1.	Reanálisis atmosférico y periodo de estudio	15
3.2.2.	Dominio espacial y variables meteorológicas	16
3.2.3.	Homogeneización de escala y control de sesgos	17
3.3.	Detección y seguimiento de ciclones	17
3.3.1.	Variable de detección: vorticidad relativa en 850 hPa	17
3.3.2.	Identificación de centros y construcción de trayectorias	17
3.3.3.	Métricas de intensidad y consistencia	18
3.4.	Clasificación del ciclo de vida por fases	18
3.4.1.	Razonamiento para una clasificación por fases	18
3.4.2.	Método de clasificación: CycloPhaser	19
3.5.	Regionalización de la ciclogénesis y clasificación espacial	19
3.5.1.	Regiones preferenciales de génesis	19
3.5.2.	Estructura relativa al centro: cuadrantes y distancia radial	20
3.6.	Análisis estadístico y síntesis	20
3.6.1.	Compuestos por fase, región y estación	20
3.6.2.	Distribuciones y extremos condicionados	21
3.6.3.	Consistencia, sensibilidad y comparación con literatura	21
3.7.	Resumen operativo del procedimiento	22

Capítulo 1

Introducción

En el contexto del cambio climático antropogénico, la comunidad científica internacional ha puesto un énfasis renovado en comprender la dinámica de los eventos meteorológicos extremos. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC presentado por Masson-Delmotte and Zhai (2022), existe evidencia inequívoca de que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas están aumentando en regiones específicas del globo, destacándose el Sudeste de América del Sur (SES) como una de las zonas más vulnerables. Esta tendencia cualitativa ha sido recientemente cuantificada para el dominio oceánico: estudios climatológicos actualizados indican un incremento positivo en la frecuencia de ciclogénesis durante el verano austral, con una tasa de aumento de aproximadamente 1.7 eventos por década en el sector sur del Atlántico (Padilha Reinke et al., 2026). Estos sistemas de baja presión no solo actúan como el principal mecanismo de variabilidad atmosférica en latitudes medias, sino que están dinámicamente acoplados a desastres hidrometeorológicos, siendo responsables directos de vientos destructivos, marejadas y tormentas intensas que afectan severamente la infraestructura costera de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil (Reboita et al., 2018; Sinclair and Catto, 2023). Impactos asociados, como las marejadas ciclónicas y las olas extremas, son también una consecuencia directa de la intensidad y trayectoria de estos sistemas, habiéndose documentado tendencias recientes vinculadas a cambios en la intensidad y velocidad de los ciclones (Gramcianinov et al., 2023).

Para comprender la génesis de estos eventos, es imperativo situarlos en el contexto de la circulación general del Hemisferio Sur. A diferencia de su contraparte boreal, este hemisferio presenta una configuración dominada por la “oceánidad”. La existencia de un cinturón oceánico casi continuo alrededor de la Antártida permite que los vientos del oeste (*westerlies*) fluyan con una persistencia e intensidad notables a lo largo de todo el ciclo anual (Simmonds and Keay, 2000a). Dentro de este flujo zonal, los ciclones se organizan en un corredor de tormentas o *storm track* bien definido, caracterizado como una estructura en espiral asimétrica que nace en las latitudes medias y se curva progresivamente hacia el sureste (Hoskins and Hodges, 2005). Esta trayectoria transporta los sistemas hacia las altas latitudes, convergiendo finalmente en la costa de la Antártida,

1. Introducción

una región de alta disipación y decaimiento descrita frecuentemente en la literatura como el “cementerio de ciclones” (Simmonds and Murray, 1999).

Dentro de este dominio circumpolar, el continente sudamericano introduce una perturbación orográfica fundamental. La Cordillera de los Andes interactúa mecánicamente con el flujo incidente de los oestes, forzando la compresión de la columna de vorticidad a barlovento y su estiramiento vertical a sotavento. Por conservación de la vorticidad potencial, este proceso favorece la formación de centros de baja presión al este de la cordillera, fenómeno conocido como *lee cyclogenesis* (Gan and Rao, 1991; Inatsu and Hoskins, 2004).

Este forzante topográfico, sumado a la fuerte baroclinicidad costera, consolida tres focos principales de acción o “hotspots” que presentan características dinámicas heterogéneas: la región subtropical frente al sureste de Brasil (RG1), la zona de transición sobre el Río de la Plata y Uruguay (RG2), y la región patagónica en el sur de Argentina (RG3) (Reboita et al., 2010b; de Jesus et al., 2021).

Revisiones climatológicas recientes confirman que, aunque el Atlántico Sur presenta una media de aproximadamente 200 sistemas anuales, la distribución de sus impactos varía drásticamente entre estas regiones, lo que justifica un análisis diferenciado por latitud de génesis (Reboita et al., 2026). Estos focos han sido validados mediante ensambles multi-modelo recientes, que muestran que los modelos regionales (RegCM4) mejoran significativamente la representación de la ciclogénesis en RG1 y RG2, mientras que en RG3 la influencia de los modelos globales es más determinante (de Jesus et al., 2021).

En línea con esta regionalización, climatologías previas basadas en tracking objetivo ya identificaban una región costera recurrente asociada a Argentina–Uruguay–sur de Brasil y tiempos de vida típicos del orden de 3 días (Mendes et al., 2010). Aunque los detalles dependen del reanálisis y del algoritmo, estos resultados respaldan el tratamiento por regiones de ciclogénesis y la necesidad de analizar explícitamente la evolución intra-ciclo (fases) para vincular dinámica e impactos en superficie.

La variabilidad de la actividad ciclónica en estos focos es controlada por la estructura de la corriente en chorro en altura y su acoplamiento con capas bajas. Vera et al. (2002) demostraron que las perturbaciones de escala sinóptica se propagan a través de guías de onda polar y subtropical. Sin embargo, para la generación de eventos extremos, es crucial la interacción vertical. Estudios recientes destacan que los ciclones intensos en la costa este (RG1 y RG2) están frecuentemente asociados a una configuración de vaguada profunda y a la entrada ecuatorial del jet de niveles altos, lo que maximiza la divergencia superior (Padilha Reinke et al., 2026). Estudios con downscaling dinámico han demostrado que estas configuraciones, junto con los vientos intensos en capas bajas (1000 hPa), son mejor representadas por modelos regionales que por modelos globales,

1. Introducción

subrayando la importancia de la resolución espacial para capturar los acoplamientos verticales en la costa este de Sudamérica (de Jesus et al., 2021). Simultáneamente, el transporte meridional de humedad desde los trópicos, mediado por el Chorro de Bajos Niveles de Sudamérica (SALLJ), juega un rol determinante en la alimentación de la precipitación extrema durante la fase de intensificación, creando un ambiente termodinámico propicio para el desarrollo explosivo (Reboita et al., 2026; Machado et al., 2020). En invierno, además, la propagación de perturbaciones baroclínicas que cruzan los Andes puede reorganizar la estructura de bajos niveles: se ha documentado que la intensificación es máxima del orden de 1000 km al este de la cordillera, donde el transporte de humedad desde latitudes tropicales en el flanco oriental del ciclón favorece la ocurrencia de precipitación sobre el sudeste de Sudamérica y actúa como fuente diabática que contribuye a reforzar el sistema (Vera et al., 2002). Este marco físico respalda que los máximos de precipitación asociados a ciclones no necesariamente se localizan con el mínimo de presión, y refuerza la necesidad de caracterizar la huella espacial completa de viento y precipitación.

Un desafío central y a menudo subestimado en la caracterización de estos sistemas es la asimetría espacial de sus impactos en superficie. Este comportamiento asimétrico ha sido documentado de forma robusta para latitudes medias del Hemisferio Sur, no solo para viento y lluvia, sino también para el estado del mar. Sinclair and Catto (2023), mediante composites ciclón–centrados y análisis de campos de viento y precipitación, demostraron que los máximos de viento superficial se organizan sistemáticamente en el cuadrante cálido del sistema. Esta distribución asimétrica ha sido corroborada en análisis multi-modelo para el Atlántico Sur, donde los vientos más intensos en 1000 hPa asociados a ciclogénesis intensa se localizan consistentemente en los sectores noreste de los sistemas (de Jesus et al., 2021). Estudios recientes que vinculan ciclones con olas extremas refuerzan esta idea, mostrando que la ocurrencia de estas no depende solo de la intensidad del ciclón (vorticidad o viento máximo), sino también de su velocidad de desplazamiento, ya que ciclones más lentos permiten una interacción prolongada del viento con la superficie oceánica, modulando así la huella espacial del impacto (Gramcianinov et al., 2023). Estos hallazgos enfatizan que la estructura espacial y la evolución dinámica del ciclón, y no únicamente su profundidad central, controlan la localización e intensidad de los impactos extremos.

La literatura tradicional ha tendido a utilizar la presión mínima central como el principal *proxy* de intensidad. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que existe un desacoplamiento espacial sistemático en el Atlántico Sur: los eventos extremos de viento superficial (10 m) tienden a concentrarse al norte de los centros de mínima presión, mientras que los extremos de presión se ubican más al sur (Padilha Reinke et al., 2026). Este hallazgo tiene implicaciones críticas para la evaluación del riesgo, sugiriendo

1. Introducción

que analizar la intensidad del ciclón únicamente siguiendo su centro geométrico subestima sistemáticamente el riesgo en las zonas periféricas del sistema frontal. Por lo tanto, se hace necesario transitar de un enfoque puntual a una caracterización de la estructura espacial completa de los campos de viento y precipitación.

La complejidad de estos sistemas ha impulsado una evolución en los métodos de clasificación. Históricamente, se utilizó el diagrama de fases de Hart (2003), basado en la estructura térmica y la simetría del sistema. Aunque es un estándar global, este método presenta limitaciones en el Atlántico Sur, donde predominan transiciones rápidas y sistemas híbridos que no encajan en las categorías clásicas (Reboita et al., 2022). En respuesta, se han desarrollado enfoques adaptados a la región. Couto de Souza et al. (2024) propusieron el *CycloPhaser*, un método automatizado que utiliza la tasa de cambio de la vorticidad relativa en 850 hPa para identificar fases dinámicas objetivas (incipiente, intensificación, madurez y decaimiento). Más recientemente, marcos integrales como *SyCLOPS* han comenzado a integrar parámetros de asimetría térmica para distinguir rigurosamente entre ciclones extratropicales puros y sistemas subtropicales, permitiendo una depuración más precisa de las bases de datos climáticas (Han and Ullrich, 2025).

Paralelamente a la detección, la caracterización de impactos ha avanzado mediante técnicas estadísticas. En el Hemisferio Norte, Graf et al. (2017) aplicaron Análisis de Componentes Principales (PCA) a precursores dinámicos, demostrando que la ciclogénesis ocurre en un continuo físico más que en categorías discretas.

Más recientemente, Eisenstein et al. (2023) aplicaron EOF/PCA a campos atmosféricos asociados a ciclones extratropicales, mostrando que los modos dominantes representan configuraciones físicas recurrentes del sistema (vinculadas a la orientación del jet, la baroclinidad y la distribución de humedad), y que la variabilidad de los impactos extremos puede explicarse por combinaciones lineales de pocos modos principales. Este principio de reducir la complejidad también se aplica al estudio de impactos específicos; por ejemplo, Gramcianinov et al. (2023) demostraron que los cambios en la ocurrencia de olas extremas en el Atlántico pueden interpretarse a través del balance entre la intensidad del ciclón y su velocidad de desplazamiento, dos parámetros clave de su estructura dinámica. Estos resultados sugieren que la complejidad aparente de los ciclones puede reducirse a un espacio de baja dimensión, siempre que el análisis preserve la coherencia espacial del sistema.

De manera complementaria, estudios previos en Sudamérica, como el de Bitencourt et al. (2010), establecieron relaciones estadísticas preliminares entre la profundidad del ciclón y el viento costero. Sin embargo, estos trabajos estuvieron limitados por la resolución de los datos y solían abordar los mecanismos dinámicos y los impactos por separado. Aún falta en la literatura un arcabouço comparativo robusto que describa cómo

1. Introducción

se estructura la organización espacial conjunta de los extremos de viento y precipitación integrando la fase del ciclo de vida y la región de génesis.

En este contexto, Liang et al. (2018) demostraron que el uso de EOF multivariado (MEOF) permite identificar patrones acoplados entre circulación atmosférica y precipitación, revelando modos coherentes que no emergen en análisis univariados. Sus resultados indican que la precipitación extrema asociada a ciclones no responde únicamente a la intensidad dinámica, sino a configuraciones espaciales específicas del campo de viento y humedad, reforzando la necesidad de enfoques integrados y multivariados.

La reciente disponibilidad del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), con su sistema de asimilación 4D-Var y alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria), permite por primera vez resolver la estructura fina de estas tormentas y superar los sesgos de intensidad presentes en generaciones anteriores de reanálisis. Validaciones específicas para el Atlántico Sur indican que ERA5 mejora la representación de los vientos superficiales en un 20 % respecto a ERA-Interim (Gramcianinov et al., 2020). Asimismo, el uso de la vorticidad relativa en 850 hPa se ha consolidado como el método más robusto para el seguimiento en el Hemisferio Sur, ya que permite capturar las fases incipientes e intensas que los algoritmos basados exclusivamente en presión tienden a omitir o detectar tardíamente (Padilha Reinke et al., 2024). Este enfoque ha sido aplicado exitosamente en proyecciones climáticas multi-modelo para el Atlántico Sur, demostrando su capacidad para identificar tanto sistemas débiles como ciclones intensos embebidos en el flujo de los oestes (de Jesus et al., 2021). La potencia de esta combinación metodológica (ERA5 + tracking por vorticidad) ha sido demostrada recientemente en estudios que logran asociar de manera robusta ciclones individuales con sus impactos en el océano, como la generación de olas extremas (Gramcianinov et al., 2023).

Aprovechando estas capacidades, este estudio busca llenar el vacío existente realizando una caracterización integral, determinando cómo evoluciona la huella espacial de los impactos a través de las fases de vida del ciclón.

1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar cuantitativamente la estructura espacio-temporal de los campos de viento y precipitación en ciclones extratropicales del Atlántico Sur mediante análisis multivariado avanzado (EOF y PCA), integrando perspectivas dinámicas y estadísticas para establecer un prototipo climático que represente el comportamiento típico de estos sistemas en función de su región de génesis y fase de desarrollo.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Aplicar la descomposición en Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) para identificar los patrones espaciales dominantes en los campos de viento (10 m, 100 m) y precipitación, y cuantificar la contribución de cada modo en las diferentes fases ciclónicas (incipiente, intensificación, madurez, decaimiento) y regiones de génesis (RG1, RG2, RG3).
2. Implementar el análisis de funciones de densidad de probabilidad (PDF) mediante estimación por núcleos (KDE) para caracterizar la distribución estadística de valores máximos en su estructura espacial y temporal.
3. Realizar un PCA multivariado integrando viento y precipitación y Temperatura Superficial del Mar (TSM).
4. Desarrollar un prototipo estadístico (composite) del ciclón extratropical que integre los patrones EOF dominantes y las distribuciones PDF de extremos para cada región de ciclogénesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ciclones extratropicales en el Hemisferio Sur

2.1.1. Definición, estructura y terminología básica

Los ciclones extratropicales son sistemas de baja presión asociados a inestabilidad baroclínica, resultado de la interacción entre gradientes horizontales de temperatura, advecciones y la circulación en altura. Su estructura típica incluye frentes, un patrón asimétrico de ascensos y descensos, y una marcada dependencia del entorno sinóptico, lo que condiciona la distribución espacial de viento y precipitación en latitudes medias (Sinclair, 1997; Simmonds and Keay, 2000a). En el Atlántico Sur, además de los ciclones extratropicales, pueden presentarse ciclones subtropicales con características híbridas (p. ej., combinación de forzamiento baroclínico y rasgos de núcleo cálido), lo que obliga a precisar la terminología y el criterio de clasificación cuando se construyen climatologías regionales (Evans and Braun, 2012).

2.1.2. Storm tracks del Hemisferio Sur y su variabilidad

Los ciclones se organizan en corredores preferenciales de tránsito (*storm tracks*) modulados por la circulación media del oeste, la distribución océano–continente y la configuración de los jets. En el Hemisferio Sur, la mayor oceanidad favorece la persistencia del flujo zonal y condiciona la ubicación y forma del *storm track*, con variabilidad interanual y decadal en su intensidad y posición (Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004; Simmonds and Keay, 2000b). Esta organización es relevante para interpretar patrones espaciales recurrentes de impactos, ya que conecta la dinámica de gran escala con la frecuencia y rutas de los ciclones que afectan Sudamérica y el Atlántico Sur.

2.2. Ciclogénesis en Sudamérica y Atlántico Sur

2.2.1. Rol de los Andes y la ciclogénesis a sotavento

La Cordillera de los Andes actúa como una barrera orográfica que reorganiza el flujo incidente y favorece la ciclogénesis a sotavento mediante mecanismos de ajuste dinámico y generación de vorticidad. Este forzamiento, junto con la baroclinicidad regional, promueve zonas recurrentes de formación y posterior intensificación en el sector sudamericano (Gan and Rao, 1991; Crespo et al., 2021). En consecuencia, la orografía no solo modula dónde se generan los ciclones, sino también cómo se organizan los gradientes y los flujos que controlan viento y precipitación asociados.

2.2.2. Hotspots y regionalización (RG1–RG3)

La actividad ciclónica en el Atlántico Sur y áreas adyacentes presenta máximos regionales asociados a condiciones sinópticas y termodinámicas distintas. En un marco aplicado, la separación en regiones de ciclogénesis (p. ej., RG1, RG2 y RG3) permite tratar la climatología de impactos como poblaciones diferenciadas, reduciendo la mezcla de configuraciones atmosféricas heterogéneas (Reboita et al., 2010b; Mendes et al., 2010; Dalanhese et al., 2023). Esta regionalización es particularmente importante en el Atlántico Sur, donde pueden coexistir sistemas extratropicales y subtropicales; por ello, la delimitación regional y la definición del tipo de ciclón contribuyen a construir muestras más comparables (Evans and Braun, 2012).

2.2.3. Ambientes de génesis y trayectorias típicas

Las propiedades del ambiente de génesis (baroclinicidad, jets, humedad disponible) condicionan la evolución del ciclón y la distribución de impactos. Estudios regionales han caracterizado entornos típicos de formación y rutas preferenciales en el Atlántico Sur, proporcionando base física para contrastes entre regiones de génesis (Gramcianinov et al., 2019; Vera et al., 2002). Estas diferencias ambientales motivan que el análisis de viento y precipitación se condicione por región, evitando interpretar como “variabilidad interna” lo que en realidad responde a forzamientos sinópticos distintos.

2.3. Identificación y tracking objetivo de ciclones

2.3.1. Criterios de detección: presión vs vorticidad (850 hPa)

Los métodos objetivos de detección difieren según el campo usado para definir el centro del ciclón. Los enfoques basados en presión mínima (SLP) capturan la señal sinóptica clásica, mientras que los basados en vorticidad relativa en niveles bajos (p. ej., 850 hPa) tienden a mejorar la identificación de fases incipientes y estructuras compactas, particularmente relevantes en el Hemisferio Sur (Sinclair, 1997; Hodges et al., 2011). En términos aplicados, el campo de detección condiciona la muestra final (conteos, duración, intensidad aparente) y, por tanto, influye en cualquier estadística de extremos asociada.

2.3.2. Métricas del ciclón: intensidad, tamaño, velocidad y duración

La caracterización del ciclón requiere métricas que describan su intensidad (p. ej., circulación o profundidad), su tamaño (radio efectivo/escala), su velocidad de traslación y su duración. La evolución de estas métricas a lo largo del ciclo de vida permite separar cambios estructurales de cambios meramente geométricos del centro del sistema (Simmonds, 2000; Sinclair, 1997). Estas métricas también permiten conectar el ciclo de vida con la evolución espacial de los máximos de viento y precipitación, que no siempre se ubican en el centro dinámico.

2.3.3. Sensibilidad a reanálisis y consistencia entre bases

La estadística de ciclones depende del reanálisis y del algoritmo de tracking, por diferencias en resolución, asimilación y representación de gradientes. Comparaciones entre reanálisis muestran variaciones en conteos, intensidad y trayectorias, por lo que es necesario explicitar el producto usado y su compatibilidad con el objetivo del estudio (Hodges et al., 2011; Dalanhese et al., 2023). En consecuencia, la interpretación de climatologías condicionadas por fase y región debe considerar que parte de la dispersión estadística puede provenir del propio sistema de datos y del método de detección.

2.4. Ciclo de vida y fases del ciclón

2.4.1. Ciclo de vida y evolución temporal de propiedades

El ciclón evoluciona mediante etapas en las que cambian su intensidad, su tamaño y la organización espacial de sus campos asociados. Resultados previos muestran que el tamaño y otras propiedades no son constantes durante la vida del sistema, lo que respalda enfoques que condicionan el análisis por fase (Simmonds, 2000). Por ello, la “misma” intensidad central puede corresponder a estructuras y huellas de impacto distintas según el estado de vida del ciclón.

2.4.2. Definición operativa de fases: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento

Una división operativa del ciclo de vida en cuatro fases facilita relacionar la dinámica del ciclón con la evolución de impactos en superficie. En enfoques automatizados, las fases pueden definirse a partir de tasas de cambio y umbrales de variables dinámicas (p. ej., vorticidad), permitiendo segmentación consistente en grandes climatologías (Couto de Souza et al., 2024). Este tipo de segmentación es especialmente útil cuando el objetivo es comparar patrones espaciales de máximos de variables de superficie bajo estados dinámicos equivalentes.

2.4.3. No linealidad y transiciones de fase

La progresión entre fases no necesariamente es estrictamente lineal; algunos ciclones pueden transitar entre etapas o reintensificarse, por lo que conviene considerar la fase como un estado dinámico identificado objetivamente, más que como una secuencia fija. Esta perspectiva es clave para interpretar distribuciones de extremos condicionadas por fase (Couto de Souza et al., 2024). En términos de impactos, esta no linealidad implica que los máximos de viento y precipitación pueden reorganizarse espacialmente de forma no monótona a lo largo del tiempo de vida.

2.5. Viento y precipitación asociados a ciclones y sus extremos

2.5.1. Organización espacial de viento y precipitación en ciclones

Los campos de viento y precipitación alrededor de un ciclón son asimétricos y dependen de la estructura frontal, el acoplamiento con el jet y el transporte de humedad. En el Atlántico Sur, la configuración sinóptica y la disponibilidad de humedad modulan la extensión y el posicionamiento de las bandas de precipitación, así como los máximos de viento en superficie (Gramcianinov et al., 2019; Reboita et al., 2018). Esta asimetría justifica el análisis espacial (y no solo “central”) de variables de superficie cuando se busca describir climatología e impactos extremos.

2.5.2. Extremos en superficie y desplazamiento respecto al centro

Los máximos de viento y precipitación no necesariamente coinciden con el centro del ciclón, y su localización puede variar con la fase y el ambiente. Esta separación entre el centro dinámico y los máximos de impacto justifica analizar la huella espacial completa de las variables, en lugar de evaluar la intensidad únicamente con una métrica central (Sinclair and Catto, 2023; Padilha Reinke et al., 2026). Bajo esta lógica, los estadísticos de máximos y su distancia al centro del ciclón permiten describir patrones robustos de impacto que no se capturan con indicadores centralizados.

2.5.3. Justificación del análisis por región y fase

Dado que las regiones de ciclogénesis presentan configuraciones atmosféricas distintas, la comparación de extremos requiere condicionar el análisis por región para evitar mezclar poblaciones con dinámicas diferentes. Del mismo modo, el condicionamiento por fase permite capturar cambios sistemáticos en la estructura espacial de viento y precipitación a lo largo de la vida del ciclón, coherente con el objetivo de caracterizar climatología e impactos extremos (Dalanheze et al., 2023; Couto de Souza et al., 2024). En el Atlántico Sur, además, la existencia de ciclones subtropicales refuerza la necesidad de una definición clara del tipo de ciclón y de criterios consistentes de muestreo cuando se interpretan impactos en superficie (Evans and Braun, 2012).

2.6. Enfoques multivariados para patrones espacio-temporales

2.6.1. EOF/PCA: concepto y utilidad en meteorología

El análisis EOF/PCA permite representar un campo espacio-temporal mediante un conjunto reducido de patrones ortogonales y sus series temporales asociadas (componentes principales), maximizando la varianza explicada y reduciendo dimensionalidad. En meteorología, esta familia de métodos se usa para (i) identificar modos dominantes de variabilidad sinóptica y (ii) construir espacios reducidos para clasificación objetiva o comparación entre conjuntos de datos. (Cornér et al., 2025) (Liang et al., 2018)

2.6.2. EOF por fase y por región: interpretación física

Aplicar EOF/PCA por fase y por región permite extraer patrones dominantes condicionados a estados dinámicos comparables y a ambientes de génesis más homogéneos, evitando que la mezcla de fases o regiones diluya señales estructurales. En particular, extensiones multivariadas (p. ej., MEOF) permiten incorporar más de una variable para describir covariabilidad acoplada y resumir estructuras consistentes con mecanismos físicos dominantes (Liang et al., 2018).

2.6.3. Distribuciones de extremos (KDE/histogramas) como complemento

Además de resumir patrones mediante EOF/PCA, es útil caracterizar la distribución de máximos (y su localización relativa al centro) con histogramas o KDE, lo que entrega una descripción probabilística de magnitudes extremas y su dispersión. En estudios de ciclones, el KDE se ha aplicado tanto para densidades (p. ej., densidad de trayectorias/fases) como para distribuciones conjuntas entre intensidad y distancia al centro, o para delimitar regímenes en espacios de parámetros. (Couto de Souza et al., 2024) (Priestley and Catto, 2022) (Han and Ullrich, 2025)

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño general del estudio

Esta investigación se desarrolla bajo un enfoque *lagrangiano*, centrado en la detección y el seguimiento de ciclones extratropicales y en la caracterización de su ciclo de vida mediante fases objetivas. La motivación de este enfoque es que la variabilidad sinóptica y los impactos asociados (viento intenso, precipitación extrema y cambios abruptos del tiempo) dependen no solo de la ocurrencia de un ciclón, sino también de su etapa evolutiva, su región de génesis y la estructura espacial relativa al centro del sistema. En el Atlántico Sudoccidental, la ciclogénesis se concentra en regiones preferenciales asociadas a baroclinicidad, forzamiento orográfico a sotavento de los Andes, interacción océano-atmósfera y la configuración de los jets, lo que justifica condicionar el análisis por región y por fase del ciclo de vida (Gan and Rao, 1991; Reboita et al., 2010a; Gramcianinov et al., 2019; Crespo et al., 2021; Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004).

El flujo metodológico se organiza en cinco componentes: (i) selección de datos y dominio, (ii) detección y *tracking* de ciclones, (iii) clasificación objetiva de fases del ciclo de vida, (iv) caracterización de variables meteorológicas por fase, región, cuadrante y distancia al centro, y (v) síntesis estadística mediante compuestos y distribuciones condicionales. Este encadenamiento permite garantizar reproducibilidad, coherencia física y comparabilidad con climatologías previas de ciclones en el Hemisferio Sur y el Atlántico Sur (Sinclair, 1994, 1995, 1997; Simmonds and Keay, 2000a; Hodges et al., 2011; Dalanhese et al., 2023; Couto de Souza et al., 2024).

3.2. Datos y preprocesamiento

3.2.1. Reanálisis atmosférico y periodo de estudio

Se emplea el reanálisis ERA5 como fuente primaria de información atmosférica, debido a su alta resolución espacial y temporal y a su uso extendido en estudios de ciclones extratropicales para el diagnóstico de trayectorias, intensidad y campos

3. Metodología

asociados. ERA5 provee un marco consistente y homogéneo para estudios climatológicos y para el análisis de eventos extremos (Hersbach et al., 2020). Asimismo, la elección de ERA5 se alinea con trabajos que comparan reanálisis y muestran una mejora en la representación de ciclones, especialmente en el Hemisferio Sur, donde la incertidumbre histórica ha sido mayor (Hodges et al., 2011; Dalanhese et al., 2023).

El periodo de análisis se define de acuerdo con los objetivos del trabajo (climatología, variabilidad interanual o enfoque en décadas recientes). En términos metodológicos, la selección del periodo debe asegurar un tamaño muestral suficiente para la robustez estadística y, a la vez, consistencia en el sistema de observación y asimilación. Estudios de intercomparación muestran que la incertidumbre en propiedades ciclónicas disminuye en reanálisis modernos y durante el periodo satelital, lo cual sustenta la preferencia por ventanas temporales recientes cuando el objetivo es maximizar consistencia (Hodges et al., 2011).

Adicionalmente, se reconoce que la incertidumbre asociada a la representación de ciclones en reanálisis no es uniforme entre variables: los diagnósticos instantáneos basados en viento y vorticidad tienden a presentar una dispersión mayor que los basados en presión, particularmente en el Hemisferio Sur. En consecuencia, el estudio prioriza criterios consistentes y comparables en el tiempo (p. ej., umbrales fijos y control de escala) y, cuando corresponde, complementa la intensidad dinámica con métricas más cercanas a impacto (viento/precipitación) para reducir ambigüedades interpretativas (Hodges et al., 2011; Dalanhese et al., 2023).

3.2.2. Dominio espacial y variables meteorológicas

El dominio espacial considera el Atlántico Sur y el este de Sudamérica, incluyendo las regiones costeras de mayor ciclogénesis y las trayectorias típicas que conectan zonas de génesis, intensificación y decaimiento. La configuración del dominio se apoya en evidencia de regiones preferenciales (*hot-spots*) y corredores de trayectorias en el Atlántico Sudoccidental (Reboita et al., 2010a; Gramcianinov et al., 2019, 2020; de Jesus et al., 2021; Couto de Souza et al., 2024).

Se analizan variables orientadas a impactos y a la caracterización del entorno sinóptico. En superficie y baja troposfera se consideran, al menos: viento a 10 m, ráfagas (cuando estén disponibles), precipitación, presión a nivel medio del mar y variables termodinámicas vinculadas a convección/humedad (p. ej., CAPE y agua precipitable). La pertinencia de estas variables está sustentada por estudios que relacionan ciclones con vientos costeros intensos y riesgos asociados (Bitencourt et al., 2010), así como por trabajos que muestran que la representación de la ciclogénesis y de los vientos asociados depende del modelo, de la región y del ciclo anual (de Jesus et al., 2021; Gramcianinov et al., 2019).

3. Metodología

Dado que la intensificación y la estructura frontal de ciclones sobre el Atlántico Sudoccidental pueden estar moduladas por procesos diabáticos y por el acoplamiento con el océano, se incluyen variables que aproximan estos mecanismos y su vínculo con impactos (p. ej., precipitación y ráfagas). En particular, la combinación de precipitación y viento/ráfagas permite interpretar la contribución relativa de forzamiento sinóptico y procesos diabáticos durante la intensificación y la madurez, especialmente en regiones donde los gradientes térmicos oceánicos y la configuración de los jets favorecen el desarrollo ciclónico (Gramcianinov et al., 2019; Crespo et al., 2021; Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004).

3.2.3. Homogeneización de escala y control de sesgos

Antes de la detección, se aplica un preprocesamiento que controla la escala efectiva de los sistemas identificados. Esto responde a un problema bien documentado: los esquemas de detección son sensibles a la resolución del dataset y pueden introducir sesgos regionales o latitudinales si no se fija una escala de perturbación comparable. La literatura enfatiza que la detección robusta requiere suavizado o filtrado espacial previo para evitar que el conteo y la intensidad dependan de la malla o del ruido de pequeña escala (Sinclair, 1997). Este paso es esencial para garantizar que las estadísticas finales (densidad de trayectorias, frecuencia de génesis, intensidad y compuestos) sean interpretables como climatología sinóptica y no como artefactos del muestreo.

3.3. Detección y seguimiento de ciclones

3.3.1. Variable de detección: vorticidad relativa en 850 hPa

La detección de ciclones se realiza a partir de máximos de vorticidad ciclónica en niveles bajos (típicamente 850 hPa). Esta elección se justifica por tres razones. Primero, la presión mínima puede subrepresentar ciclones móviles en latitudes medias cuando un gradiente de presión de fondo elimina el mínimo local, mientras que la vorticidad captura el centro de circulación de forma más estable. Segundo, la vorticidad representa directamente la intensidad rotacional del sistema, lo que facilita el seguimiento coherente y la comparación entre etapas del ciclo de vida. Tercero, este enfoque está alineado con metodologías clásicas y contemporáneas aplicadas al Hemisferio Sur y al Atlántico Sur (Sinclair, 1994, 1995, 1997; Couto de Souza et al., 2024; Gramcianinov et al., 2020).

3.3.2. Identificación de centros y construcción de trayectorias

En cada tiempo se identifican centros candidatos como máximos locales de vorticidad ciclónica, aplicando umbrales de consistencia física (p. ej., magnitud mínima) y criterios geométricos para evitar duplicidades. Luego, los centros se enlazan temporalmente mediante un criterio de continuidad que minimiza la distancia entre posiciones sucesivas y mantiene coherencia dinámica. Adicionalmente, se imponen criterios de vida mínima y persistencia para excluir señales transitorias no sinópticas.

Esta estrategia responde a la necesidad de reconstruir el ciclo de vida completo y de reducir trayectorias espurias, lo cual es particularmente importante en el Hemisferio Sur, donde la comparación entre reanálisis mostró históricamente mayor dispersión en propiedades ciclónicas (Hodges et al., 2011). En el contexto del Atlántico Sur, la reconstrucción de trayectorias es clave para analizar corredores de tormentas (*storm tracks*) y su relación con baroclinicidad, SST y topografía, tal como se discute en estudios de perspectiva del *storm track* del Hemisferio Sur (Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004).

3.3.3. Métricas de intensidad y consistencia

La intensidad ciclónica se cuantifica principalmente mediante la magnitud de vorticidad en el centro del ciclón a lo largo del tiempo, complementada por variables asociadas (p. ej., presión a nivel medio del mar o viento máximo cercano a superficie) cuando el análisis lo requiera. El énfasis en vorticidad como métrica primaria sigue la advertencia de que cambios en presión central pueden estar contaminados por el movimiento del ciclón sobre un campo de presión de fondo, mientras que medidas circulatorias son más representativas de cambios reales en la circulación (Sinclair, 1997). Esta decisión también es coherente con estudios que comparan propiedades ciclónicas en reanálisis y señalan que variables de pequeña escala (viento, vorticidad) presentan mayor dispersión, por lo que conviene establecer criterios consistentes y, cuando sea posible, diagnósticos complementarios (Hodges et al., 2011).

En esta tesis se asume que la “intensidad” de un ciclón extratropical no queda descrita de forma completa por una única variable. En particular, una métrica dinámica (p. ej., vorticidad) describe la circulación asociada al centro, mientras que las métricas más próximas a impacto (p. ej., precipitación y viento/ráfagas) responden además al entorno termodinámico, a la estructura frontal y a la fase del ciclo de vida. Por esta razón, además de la vorticidad en 850 hPa como métrica primaria de *tracking*, se emplean diagnósticos orientados a impacto (viento/ráfagas y precipitación) para caracterizar la severidad de manera consistente y comparable entre fases y regiones (Sinclair, 1997; Hodges et al., 2011; Sinclair and Catto, 2023; Gramcianinov et al., 2023).

3.4. Clasificación del ciclo de vida por fases

3.4.1. Razonamiento para una clasificación por fases

El objetivo central no es solo contar ciclones, sino caracterizar cómo varían los campos meteorológicos de impacto a lo largo de su evolución. En el marco conceptual clásico, los ciclones extratropicales presentan etapas distinguibles (formación, intensificación, madurez y decaimiento) asociadas a cambios estructurales y dinámicos. Sin embargo, en climatología se requiere una definición objetiva y automatizable de esas etapas para miles de trayectorias, evitando criterios manuales o dependientes de casos individuales (Couto de Souza et al., 2024). Por ello, se adopta un esquema de fases que permita condicionar estadísticamente los campos y detectar diferencias sistemáticas entre etapas, regiones y estaciones.

3.4.2. Método de clasificación: CycloPhaser

La clasificación de fases se realiza mediante el método propuesto por Couto de Souza et al. (2024), que identifica etapas del ciclo de vida usando la serie temporal de vorticidad mínima en el centro y su derivada temporal. En términos operativos, la metodología detecta cambios de régimen en la tendencia de intensificación (crecimiento) y debilitamiento, separando fases típicas del ciclo de vida. La ventaja principal es que la fase incipiente y la fase madura pueden delimitarse de manera consistente incluso cuando la circulación aún no exhibe una estructura cerrada en presión, lo cual es crítico en etapas tempranas y en dominios donde la baroclinicidad y la topografía modulan fuertemente la estructura (Couto de Souza et al., 2024; Gramcianinov et al., 2024).

Se prioriza el subconjunto de ciclones cuya evolución presenta el patrón de cuatro fases (incipiente, intensificación, madurez y decaimiento), por ser el modo predominante en el Atlántico Sur según la climatología basada en este enfoque, y porque facilita comparaciones entre ciclones físicamente equivalentes evitando mezclar evoluciones atípicas (Couto de Souza et al., 2024).

3.5. Regionalización de la ciclogénesis y clasificación espacial

3.5.1. Regiones preferenciales de génesis

Cada ciclón se asigna a una región de génesis según la localización del primer punto de su trayectoria. Esta regionalización se fundamenta en la evidencia de máximos

3. Metodología

de ciclogénesis a lo largo del este de Sudamérica y el Atlántico Sudoccidental, asociados a mecanismos diferenciados: baroclinicidad y cavados en niveles medios–altos en latitudes medias, efectos de sotavento de los Andes, y contribución de gradientes térmicos oceánicos y flujos aire–mar (Gan and Rao, 1991; Reboita et al., 2010a; Gramcianinov et al., 2019; Crespo et al., 2021; Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004).

En particular, se consideran regiones comparables a las empleadas en estudios de *hot-spots* y clima presente/futuro, donde se distingue la génesis en (i) Sudeste de Brasil, (ii) Uruguay/La Plata y (iii) sur de Argentina. Esta elección facilita el diálogo con literatura que analiza frecuencia, ciclo anual y vientos asociados por región (de Jesus et al., 2021; Gramcianinov et al., 2019; Couto de Souza et al., 2024).

3.5.2. Estructura relativa al centro: cuadrantes y distancia radial

Para representar la asimetría de impactos de forma homogénea entre ciclones de distinto tamaño, cada campo se transforma a un marco centrado en el ciclón y se resume dentro de un radio fijo alrededor del centro. Esta parametrización, junto con el particionado por cuadrantes, permite capturar desplazamientos sistemáticos de los máximos (y no solo cambios de magnitud) a lo largo del ciclo de vida y comparar ciclones de distinto tamaño bajo un criterio común de referencia centrada (Simmonds, 2000; Couto de Souza et al., 2024).

- Se calcula la distancia geodésica desde cada punto al centro del ciclón.
- Se define un radio de búsqueda para máximos (y/o estadísticos) alrededor del centro.
- Se partitiona el entorno en cuadrantes (NE, NW, SE, SW) y en anillos radiales para resumir la asimetría.

La justificación es física: los ciclones extratropicales presentan asimetrías sistemáticas asociadas a frentes, advección cálida/fría y estructura del chorro, por lo que los máximos de viento y precipitación no ocurren de forma isotrópica. En el Atlántico Sur, esta asimetría se combina con influencias regionales (corriente de Brasil, Confluencia Brasil–Malvinas y topografía) que alteran la distribución de impactos (Gramcianinov et al., 2019; Reboita et al., 2010a; Bitencourt et al., 2010). Además, condicionar por cuadrante y distancia permite comparar de manera homogénea ciclones de diferente tamaño y seguir la evolución espacial del impacto a lo largo del ciclo de vida (Couto de Souza et al., 2024; Simmonds, 2000).

3.6. Análisis estadístico y síntesis

3.6.1. Compuestos por fase, región y estación

Se construyen compuestos (*composites*) de las variables meteorológicas condicionando por: (i) fase del ciclón, (ii) región de génesis y (iii) estación del año o ciclo anual. Esta estrategia permite aislar señales robustas de la variabilidad sinóptica y comparar entornos y respuestas meteorológicas entre conjuntos homogéneos. La utilidad del compuesto para diagnosticar estructuras típicas y contrastar grupos de sistemas es ampliamente empleada en climatología sinóptica y en estudios de ciclones, especialmente cuando se busca extraer señales medias de poblaciones grandes (Andrade et al., 2024; Couto de Souza et al., 2024).

Finalmente, los compuestos por fase permiten interpretar cambios estructurales coherentes con la evolución del ciclón. En el Atlántico Sur, análisis compuestos de ciclones intensificantes muestran transiciones estructurales durante la fase de mayor desarrollo y resaltan el papel de procesos diabáticos en la intensificación, lo que refuerza la pertinencia de condicionar los campos por etapa del ciclo de vida y no solo por la ocurrencia del sistema (Andrade et al., 2024; Couto de Souza et al., 2024).

3.6.2. Distribuciones y extremos condicionados

Además de promedios compuestos, se estiman distribuciones (p. ej., PDFs) de variables clave condicionadas por fase y cuadrante, con el fin de caracterizar no solo el comportamiento típico sino también la cola asociada a extremos. Esta aproximación es necesaria porque los impactos socioambientales suelen depender de cuantiles altos (viento extremo, precipitación intensa) más que de valores medios. Asimismo, la literatura reciente enfatiza que la relación entre intensidad ciclónica y extremos (precipitación, viento, oleaje) puede ser no lineal y modulada por la velocidad del sistema y por el entorno (Sinclair and Catto, 2023; Gramcianinov et al., 2023).

Los umbrales de extremo se definen de manera coherente con el objetivo del estudio (p. ej., percentiles altos por región/estación), evitando mezclar climas distintos en una misma distribución. Cuando el foco está en viento costero, se consideran métricas consistentes con estudios de impactos y con la evidencia de que la relación ciclón–viento depende de la posición relativa del sistema y su etapa evolutiva (Bitencourt et al., 2010; Sinclair and Catto, 2023).

Para extremos de viento, además del valor máximo puntual, se incorpora una métrica espacial de afectación (huella) definida a partir del excedente sobre un umbral climatológico local (p. ej., percentil alto), lo que permite distinguir ciclones con máximos comparables pero con impactos areales distintos. Operativamente, la huella se computa

en torno al centro del ciclón y se resume por fase, región, cuadrante y distancia radial, de modo consistente con el enfoque centrado en el sistema y con el objetivo de caracterizar extremos condicionados (Sinclair and Catto, 2023; Gramcianinov et al., 2023; Couto de Souza et al., 2024).

3.6.3. Consistencia, sensibilidad y comparación con literatura

Como control de robustez, se realizan pruebas de sensibilidad sobre parámetros del *tracking* y de la clasificación de fases (p. ej., vida mínima, umbral de vorticidad, distancia máxima entre pasos). La necesidad de estos controles se justifica porque diferencias metodológicas pueden explicar discrepancias entre climatologías, incluso más que la variabilidad real del clima, especialmente cuando se comparan conteos, densidades y tendencias (Sinclair, 1997; Dalanhese et al., 2023; Hodges et al., 2011).

Finalmente, los patrones obtenidos (regiones de génesis, densidad de trayectorias y modulación estacional) se contrastan cualitativamente con la literatura del Hemisferio Sur y del Atlántico Sur para asegurar plausibilidad física. En particular, se espera consistencia con la estructura del *storm track* del Hemisferio Sur y su asimetría zonal, modulada por SST, topografía y jets (Hoskins and Hodges, 2005; Inatsu and Hoskins, 2004), así como con la ciclogénesis costera y a sotavento de los Andes sobre Sudamérica (Gan and Rao, 1991; Reboita et al., 2010a; Crespo et al., 2021).

3.7. Resumen operativo del procedimiento

En síntesis, el procedimiento implementado en esta tesis sigue los pasos: (1) adquisición y preprocesamiento de ERA5 (Hersbach et al., 2020), (2) detección de centros ciclónicos vía vorticidad en 850 hPa con control de escala (Sinclair, 1997), (3) construcción de trayectorias y filtrado por vida mínima (Hodges et al., 2011), (4) clasificación objetiva del ciclo de vida en fases mediante CycloPhaser (Couto de Souza et al., 2024), (5) asignación a regiones de génesis (de Jesus et al., 2021; Gramcianinov et al., 2019), (6) análisis espacial relativo al centro por cuadrantes y distancia (Simmonds, 2000), y (7) síntesis mediante compuestos y distribuciones condicionadas para cuantificar patrones medios y extremos de variables meteorológicas de impacto (Andrade et al., 2024; Sinclair and Catto, 2023; Gramcianinov et al., 2023).

Bibliografía

- Andrade, H. N., Nunes, A. B., Teixeira, M. S., de Quadro, M. F. L., de Avila, V. D., de Oliveira, F. S. C., and Alves, R. d. C. M. (2024). Composite analysis of explosive cyclones in the southern atlantic ocean. *International Journal of Climatology*, pages 1–17.
- Bitencourt, D. P., Manoel, G., Acevedo, O. C., Fuentes, M. V., Muza, M. N., Rodrigues, M. L., and Quadro, M. F. L. (2010). Relating winds along the Southern Brazilian coast to extratropical cyclones. *Meteorological Applications*, 18(2):223–229.
- Cornér, J., Bouvier, C., Doiteau, B., Pantillon, F., and Sinclair, V. A. (2025). Classification of north atlantic and european extratropical cyclones using multiple measures of intensity. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25:207–229.
- Couto de Souza, D., da Silva Dias, P. L., Gramcianinov, C. B., da Silva, M. B. L., and de Camargo, R. (2024). New perspectives on south atlantic storm track through an automatic method for detecting extratropical cyclones' lifecycle. *International Journal of Climatology*, 44(10):3436–3456.
- Crespo, N. M., da Rocha, R. P., Sprenger, M., and Wernli, H. (2021). A potential vorticity perspective on cyclogenesis over centre-eastern south america. *International Journal of Climatology*, 41(1):663–678.
- Dalanhese, L., Stuivenvolt-Allen, J., LaPlante, M., Wang, S.-Y., Costa, T. L., da Silva, H. D. F., and Belem, A. L. (2023). A new climatology of south american extratropical cyclogenesis with an intercomparison among era5, jra55 and the brazilian navy. *International Journal of Climatology*, 43(15):7050–7066.
- de Jesus, E. M., da Rocha, R. P., Crespo, N. M., Reboita, M. S., and Gozzo, L. F. (2021). Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of south america. *Climate Dynamics*, 56:537–557.
- Eisenstein, L., Sinclair, V. A., and Gregow, H. (2023). Objective identification of sting jets in era5 and their climatology in the north atlantic. *Weather and Climate Dynamics*, 4(4):1011–1032.
- Evans, J. L. and Braun, A. (2012). A climatology of subtropical cyclones in the south atlantic. *Journal of Climate*, 25(20):7328–7340.

- Gan, M. A. and Rao, V. B. (1991). Surface cyclogenesis over south america. *Monthly Weather Review*, 119(5):1293–1302.
- Graf, M. A., Wernli, H., and Sprenger, M. (2017). Objective classification of extratropical cyclogenesis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143:1047–1061.
- Gramcianinov, C. B., Campos, R., de Camargo, R., and da Rocha, R. (2019). The properties and genesis environments of south atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, 53:4115–4136.
- Gramcianinov, C. B., Campos, R., de Camargo, R., Hodges, K., Guedes Soares, C., and da Silva Dias, P. (2020). Analysis of atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of era5 and cfsr/cfsv2 databases. *Ocean Engineering*, 216:108111.
- Gramcianinov, C. B., da Rocha, R. P., and Dodd, J. A. (2024). Early-stage extratropical cyclones mechanisms over south america: Rcm added value and future changes in a warmer planet. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(4):e2023JD039863.
- Gramcianinov, C. B., Gowan, E. J., Campos, R., and da Rocha, R. P. (2023). Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the atlantic ocean. *Climate Dynamics*, 60:1–19.
- Han, Y. and Ullrich, P. A. (2025). The system for classification of low-pressure systems (syclops): An all-in-one objective framework for large-scale data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130:e2024JD041287.
- Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131(4):585–616.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., and et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Hodges, K. I., Lee, R. W., and Bengtsson, L. (2011). A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses era-interim, nasa merra, ncep cfsr, and jra-25. *Journal of Climate*, 24(18):4888–4906.
- Hoskins, B. J. and Hodges, K. I. (2005). A new perspective on southern hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18(20):4108–4129.
- Inatsu, M. and Hoskins, B. J. (2004). The zonal asymmetry of the southern hemisphere winter storm track. *Journal of Climate*, 17(24):4882–4895.
- Liang, Y.-C., Mazloff, M. R., Rosso, I., Fang, S.-W., and Yu, J.-Y. (2018). A multivariate empirical orthogonal function method to construct nitrate maps in the southern ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(7):1505–1519.

- Machado, J. P., Justino, F., and Souza, C. D. (2020). Influence of el niño-southern oscillation on baroclinic instability and storm tracks in the southern hemisphere. *International Journal of Climatology*, 40(14):6098–6114.
- Masson-Delmotte, V. and Zhai, P. (2022). Tendencias regionales de los fenómenos extremos en el informe del ipcc de 2021. *Boletín de la OMM*, 71(1):52–60. Artículo de divulgación institucional basado en el IPCC AR6.
- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., and Mendes, M. C. (2010). Climatology of extratropical cyclones over the south american–southern oceans sector. *Theoretical and Applied Climatology*, 100:239–250.
- Padilha Reinke, C. K., Machado, J. P., Brum, A. L., de Azevedo, J. L. L., Mata, M. M., and Saraiva, J. M. B. (2026). Characterization and variability of extratropical cyclones in the southwest atlantic ocean. *Advances in Meteorology*, 2026:9965323.
- Padilha Reinke, C. K., Machado, J. P., Mata, M. M., de Azevedo, J. L. L., Saraiva, J. M. B., and Rodrigues, R. (2024). Objective algorithm for detection and tracking of extratropical cyclones in the southern hemisphere. *Atmosphere*, 15(2):230.
- Priestley, M. D. and Catto, J. L. (2022). Improved representation of extratropical cyclone structure in highresmip models. *Geophysical Research Letters*, 49(5):e2021GL096708.
- Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., and Ambrizzi, T. (2010a). Cyclones and frontolysis over south america... *Climate Dynamics*, 35:33–47.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., and Sugahara, S. (2010b). South atlantic ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (regcm3). *Climate Dynamics*, 35(7-8):1331–1347.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., de Souza, M. R., and Llopis, M. (2018). Extratropical cyclones over the southwestern south atlantic ocean: Hadgem2-es and regcm4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6):2866–2879.
- Reboita, M. S., Drumond, A., Ferreira, G., Zilli, M. T., Crespo, N. M., Rodrigues, R. R., da Rocha, R. P., and Ambrizzi, T. (2026). Meteorology and climate of South America and Surrounding Oceans. In *Meteorology and Climate of South America and Surrounding Oceans*, pages 284–340. Cambridge University Press.
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. d. S., Lucyrio, V., de Jesus, E. M., and da Rocha, R. P. (2022). From a shapiro-keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone raoni: An unusual winter synoptic situation over the south atlantic ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748):3170–3193.

Bibliografía

- Simmonds, I. (2000). Size changes over the life of sea level cyclones in the ncep reanalysis. *Monthly Weather Review*, 128(12):4118–4125.
- Simmonds, I. and Keay, K. (2000a). Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year ncep–ncar reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5):873–885.
- Simmonds, I. and Keay, K. (2000b). Variability of southern hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958–97. *Journal of Climate*, 13(3):550–561.
- Simmonds, I. and Murray, R. J. (1999). Southern extratropical cyclone behavior in ecmwf analyses during the frost special observing periods. *Weather and Forecasting*, 14(6):878–891.
- Sinclair, M. R. (1994). An objective cyclone climatology for the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10):2239–2256.
- Sinclair, M. R. (1995). A climatology of cyclogenesis for the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 123(6):1601–1619.
- Sinclair, M. R. (1997). Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting*, 12(3):595–612.
- Sinclair, V. A. and Catto, J. L. (2023). The relationship between extra-tropical cyclone intensity and precipitation in idealised current and future climates. *Weather and Climate Dynamics*, 4(3):567–589.
- Vera, C. S., Vigliarolo, P. K., and Berbery, E. H. (2002). Cold season synoptic-scale waves over subtropical south america. *Monthly Weather Review*, 130(3):684–699.