

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

Tu Nombre

3 de febrero de 2026

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación	6
1.1.1. Objetivo General	6
1.1.2. Objetivos Específicos	6
2. Marco Teórico	8
2.1. Fundamentos físicos de los sistemas extratropicales	8
2.1.1. Definición termodinámica y Espacio de Fase	8
2.1.2. Modelos de estructura y asimetría del viento	8
2.2. Mecanismos forzantes de la ciclogénesis regional	9
2.2.1. Ciclogénesis de Sotavento (Forzante Orográfico)	9
2.2.2. Ciclogénesis Diabática (Forzante Térmico)	9
2.3. Fundamentos del análisis de eventos compuestos y espacial	9
2.3.1. Teoría de Eventos Compuestos	9
2.3.2. Estimación de Densidad y Variabilidad Espacial	10
3. Metodología	11
3.1. Diseño general del estudio	11
3.2. Datos del Reanálisis ERA5	11
3.2.1. Variables meteorológicas	12
3.3. Base de datos de ciclones	12
3.3.1. Trayectorias y detección	12
3.3.2. Fases del ciclo de vida	13
3.3.3. Selección de ciclos de vida canónicos	13
3.4. Procesamiento	13
3.5. Estratificación por regiones de ciclogénesis	14
3.6. Técnicas estadísticas de caracterización	15
3.6.1. Extracción de máximos y análisis de histogramas	15
3.6.2. Estimación de densidad de kernel (KDE) de máximos	15
3.6.3. Análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) univariado .	15
3.6.4. EOF combinado (multivariado) precipitación–viento	16
3.7. Análisis de sensibilidad: subconjunto de ciclones intensos	16

Capítulo 1

Introducción

Desde una perspectiva dinámica global, autores fundamentales como Hoskins and Hodges (2002) y Sinclair (1994) establecen que los ciclones extratropicales constituyen el mecanismo dominante para el transporte meridional de energía y momento en las latitudes medias, actuando como los “ motores” que equilibran el gradiente térmico planetario. En el contexto específico del Atlántico Sur, Reboita et al. (2010b) identifican a esta cuenca como una de las regiones de ciclogénesis más activas y complejas, donde la interacción del flujo del oeste con la orografía de los Andes y la disponibilidad de humedad configuran un escenario único para el desarrollo de sistemas intensos. No obstante, la naturaleza de estas perturbaciones en la región es heterogénea; investigaciones de Evans and Braun (2012) y Gozzo and da Rocha (2013) han demostrado que el Atlántico Sur favorece frecuentemente el desarrollo de ciclones con estructuras híbridas o transiciones de tipo Shapiro-Keyser, desafiando las conceptualizaciones clásicas de la ciclogénesis noruega. Esta diversidad estructural tiene implicancias directas en cómo medimos su severidad: como argumentan recientemente Cornér et al. (2025) para el Atlántico Norte, la intensidad de un ciclón no puede capturarse con una única métrica, ya que la relación entre la profundidad de la presión y los vientos destructivos no es lineal. De hecho, Eisenstein et al. (2023) destacan que los mayores impactos en superficie suelen estar asociados a estructuras de mesoescala específicas —como los *sting jets* o los cinturones de transporte frío— cuya localización espacial varía drásticamente durante el ciclo de vida del sistema. Así, más allá de su rol climático, estos sistemas representan, según Gramcianinov et al. (2023), la mayor amenaza geofísica para la zona costera regional, imponiendo un riesgo que depende críticamente de la coherencia interna entre sus campos de viento y precipitación.

A pesar de la relevancia crítica de estos fenómenos, la literatura sobre el Atlántico Sur ha priorizado históricamente el análisis de la climatología de trayectorias y la frecuencia de ciclogénesis. Si bien referentes consolidados como Gramcianinov et al. (2020) e investigaciones recientes de Padilha Reinke et al. (2026) han caracterizado con robustez la distribución espacio-temporal de estos sistemas, persiste un vacío en la comprensión de su estructura interna. Esta perspectiva estructural se vuelve imperativa, dado que estudios de Gozzo and da Rocha (2013) y Reboita et al. (2022a)

1. Introducción

han revelado que los ciclones en la región frecuentemente exhiben evoluciones atípicas —como estructuras de tipo Shapiro-Keyser o transiciones subtropicales— que no pueden ser capturadas por métricas simples de intensidad central. Esta heterogeneidad dinámica se traduce en una distribución de impactos altamente asimétrica; investigaciones de Bitencourt et al. (2010) y Cardoso et al. (2022) evidencian que los máximos de viento en superficie no se distribuyen uniformemente alrededor del vórtice, sino que dependen críticamente de la latitud de génesis y la madurez del sistema. Más aún, Eisenstein et al. (2023) advierten que los vientos más destructivos suelen estar asociados a estructuras de mesoescala muy localizadas (como *jets* frontales), cuya posición varía durante el ciclo de vida. Esta complejidad exacerba la no-linealidad identificada por Sinclair and Catto (2023), quienes demuestran que un ciclón profundo (alta vorticidad) no garantiza necesariamente precipitaciones extremas. Así, el mayor riesgo proviene de la coherencia espacial entre estos extremos dinámicos e hidrológicos —los *eventos compuestos* descritos por Chen and Di Luca (2025)—. Sin embargo, la evolución conjunta de estas variables a través de las fases de vida del ciclón permanece escasamente documentada. Esta carencia es crítica, ya que como enfatizan recientemente Han and Ullrich (2025), se requieren marcos de clasificación que vinculen explícitamente la evolución física del sistema con sus “contribuciones de impacto en viento y precipitación”, un desafío que metodologías objetivas como la de Couto de Souza et al. (2024) permiten ahora abordar sistemáticamente en Sudamérica.

Dentro de este dominio, 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, un mecanismo físico descrito por Gan and Rao (1994) que favorece la formación sistemática de centros de baja presión al este de la cordillera, proceso conocido como ciclogénesis de sotavento. Este forzante topográfico, modulado por la fuerte baroclinicidad costera y los marcados gradientes de temperatura superficial del mar, consolida tres focos principales de actividad ciclogenética (RG1,2,3) en la costa este de Sudamérica (Reboita et al., 2026). Adoptando la regionalización propuesta por Gramcianinov et al. (2019), este estudio se centra en tres regiones clave: la región Sur-Sudeste de Brasil (*South Brazil*, SBR), la cuenca de descarga del Río de la Plata (*La Plata Basin*, LPB, por sus siglas en inglés), y la costa sureste de Argentina (*Argentina*, ARG). Estas regiones poseen una correspondencia espacial directa con los sectores de ciclogénesis clásicamente definidos por Reboita et al. (2010a) y revisados por Reboita et al. (2026): (1) la región SBR (análoga a RG1), favorecida por el efecto de sotavento de los Andes y el chorro de bajos niveles (SALLJ), donde Reboita et al. (2022b) documentan frecuentes sistemas híbridos y transiciones tropicales; (2) la región LPB (correspondiente a RG2), caracterizada por ciclogénesis explosivas e influenciada

1. Introducción

por el transporte de humedad del SALLJ; y (3) la región ARG (equivalente a RG3), dominada por la baroclinia del frente polar. Esta estratificación geográfica es crítica para el diseño experimental, ya que estos focos responden a regímenes dinámicos distintos. Evidencia de ello son las proyecciones de Jesus et al. (2021), quienes demuestran que estas regiones presentan sensibilidades opuestas ante el forzamiento climático: mientras que la región austral (ARG) experimentará un aumento en la frecuencia de ciclones debido al desplazamiento de los oestes hacia el polo, se proyecta una disminución en los focos subtropicales (SBR y LPB), confirmando que son sistemas gobernados por mecanismos independientes.

La variabilidad de la actividad ciclónica en estos focos es modulada por la estructura de la corriente en chorro y su acoplamiento con las capas bajas. Vera et al. (2002) demostraron que las perturbaciones de escala sinóptica se propagan a través de guías de onda polar y subtropical, pero 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 necesaria para el desarrollo explosivo. 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. Como señalan Reboita et al. (2022b), la advección de aire cálido y húmedo en el flanco oriental del ciclón no solo inestabiliza la atmósfera, sino que actúa como una fuente diabática que, al liberar calor latente, refuerza la intensidad del sistema. Sin embargo, este acoplamiento termodinámico introduce una complejidad crítica: Sinclair and Catto (2023) advierten que la relación entre la profundidad dinámica del sistema (vorticidad) y su respuesta hidrológica (precipitación) no es lineal, ya que un ciclón puede ser dinámicamente intenso pero generar poca lluvia si carece de este suministro de humedad. Este hecho físico subraya que los máximos de impacto no necesariamente coinciden con el mínimo de presión, reforzando la necesidad de caracterizar la huella espacial de viento y precipitación.

Un desafío central en la caracterización dinámica de estos sistemas es la asimetría espacial de su intensidad en superficie. La literatura tradicional ha tendido a utilizar la presión mínima central como el principal *proxy* para clasificar la fuerza de los ciclones; sin embargo, investigaciones recientes demuestran un desacoplamiento sistemático entre la profundidad del vórtice y la magnitud de sus extremos asociados. Estudios de Bitencourt et al. (2010) y Cardoso et al. (2022) evidencian que los máximos de viento no se distribuyen uniformemente alrededor del centro, sino que se concentran en sectores específicos (como el cuadrante noreste en la región subtropical) dependiendo de la latitud y la madurez del sistema. Esta desconexión sugiere que la métrica de presión

1. Introducción

es insuficiente para capturar la verdadera severidad del evento, especialmente cuando se consideran los *eventos compuestos*. Como indican Chen and Di Luca (2025), la magnitud del impacto físico resulta de la coherencia espacial y temporal entre los extremos de viento y precipitación, una superposición que no es capturada por índices univariados. Adicionalmente, factores cinemáticos como la velocidad de propagación modulan la duración y acumulación de estos extremos, tal como discuten Gramcianinov et al. (2023) al analizar la interacción del viento con la superficie oceánica. En consecuencia, basar la evaluación únicamente en la trayectoria del centro geométrico limita la comprensión de la estructura del fenómeno. Se hace imperativo transitar hacia una caracterización de la huella espacial completa, permitiendo así cuantificar con precisión la distribución de los máximos tanto en el régimen climatológico medio como en el 10 % de los sistemas más extremos.

Esta complejidad estructural no es estática; evoluciona drásticamente a lo largo del ciclo de vida del sistema. Históricamente, la clasificación de estos eventos se basó en el diagrama de espacio de fase de Hart (2003), el cual discrimina sistemas según su asimetría térmica y su núcleo (frío/caliente). Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones operativas en el Atlántico Sur, donde Reboita et al. (2022b) han documentado frecuentes transiciones rápidas y sistemas híbridos que desafían las categorías binarias clásicas. Para superar estas barreras, esta investigación integra la reciente climatología evolutiva desarrollada por Couto de Souza et al. (2024), quienes mediante el algoritmo *CycloPhaser* han logrado segmentar objetivamente la historia de los ciclones regionales en cuatro fases dinámicas discretas: incipiente, intensificación, madurez y decaimiento. El uso de esta base de datos clasificada permite, por primera vez, investigar cómo se transforma la distribución espacial de las variables durante su ciclo de vida del sistema, una estrategia alineada con otras nuevas propuestas globales como *SyCLOPS* de Han and Ullrich (2025) en el Atlántico Norte, que enfatizan la urgencia de vincular la evolución física del sistema con sus contribuciones específicas de impacto.

Para caracterizar esta complejidad multidimensional, se requieren técnicas estadísticas que trasciendan el análisis univariado clásico. En este sentido, Eisenstein et al. (2023) han demostrado que la variabilidad de los impactos extremos en ciclones puede reducirse a un número limitado de modos recurrentes utilizando técnicas de descomposición ortogonal. Siguiendo este principio, esta tesis implementa la metodología de Funciones Ortogonales Empíricas Multivariadas (MEOF), fundamentada matemáticamente por Liang et al. (2018). A diferencia de los EOF tradicionales, esta técnica permite extraer modos de variabilidad acoplados entre campos físicamente distintos, revelando la coherencia espacial oculta donde la circulación del viento y los núcleos de precipitación covarian sistemáticamente. La aplicación de este marco estadístico sobre las fases dinámicas previamente clasificadas permitirá construir "prototipos de

"impacto", sintetizando la estructura típica del ciclón para cada región de génesis y estadio evolutivo, superando así la visión estática de los promedios climatológicos.

La viabilidad de esta caracterización estructural reside en la reciente disponibilidad del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), cuya alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria) permite resolver los gradientes de presión y los flujos de humedad que generaciones anteriores de datos suavizaban. Validaciones específicas para el Atlántico Sur realizadas por Gramcianinov et al. (2020) confirman que ERA5 ofrece una representación superior de la intensidad de los vientos superficiales y la estructura de los ciclones en comparación con productos previos como CFSR.

Para capitalizar esta precisión, este estudio utiliza la base de datos de trayectorias de Couto de Souza et al. (2024), la cual se fundamenta en el criterio de la vorticidad relativa en 850 hPa. Esta elección metodológica posee un consenso transversal en la literatura: establecida clásicamente por Sinclair (1994) y consolidada por Padilha Reinke et al. (2024) como el estándar más robusto para el Hemisferio Sur, este criterio es incluso utilizado en estudios recientes del Hemisferio Norte (Chen and Di Luca, 2025). A diferencia de los algoritmos basados exclusivamente en la presión mínima, el tracking por vorticidad permite el análisis del ciclo de vida de los eventos, capturando incluso aquellos sistemas rápidos que los algoritmos isobáricos tienden a omitir. Esta combinación de datos de alta fidelidad con una detección dinámica sensible constituye la base técnica necesaria para alimentar el análisis multivariado (MEOF) propuesto, permitiendo cuantificar finalmente la evolución de la huella espacial de los eventos compuestos en la región.

1.1. Objetivos del Proyecto de Investigación

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar la estructura interna y la covariabilidad espacial de los campos de viento y precipitación en los ciclones extratropicales del Atlántico Sur a lo largo de su ciclo de vida, integrando la clasificación por fases evolutivas con análisis multivariado para establecer prototipos climáticos de impacto diferenciados por región de génesis.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Consolidar una base de datos lagrangiana que asocie los campos de superficie de alta resolución (ERA5) con las trayectorias y fases dinámicas (incipiente, intensificación, madurez, decaimiento) identificadas para las tres regiones de ciclogénesis (SBR, LPB, ARG).

1. Introducción

2. **Determinar la asimetría espacial de los extremos** mediante la estimación de densidad por núcleos (KDE), cuantificando la probabilidad de ocurrencia de máximos de viento y precipitación respecto al centro del ciclón para identificar el desacoplamiento físico entre la presión mínima y la severidad en superficie.
3. **Identificar los modos de variabilidad acoplada** aplicando Funciones Orto-gonales Empíricas Multivariadas (MEOF) a los campos conjuntos de viento y precipitación, para revelar las estructuras coherentes de mesoscala que gobiernan los eventos compuestos en cada fase evolutiva.
4. **Construir modelos conceptuales (prototipos)** para cada región de génesis, sintetizando los patrones dominantes obtenidos (MEOF) y las distribuciones de probabilidad de extremos (KDE) en una representación compuesta que describa la evolución típica del impacto desde la génesis hasta la lisis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Fundamentos físicos de los sistemas extratropicales

2.1.1. Definición termodinámica y Espacio de Fase

La clasificación rigurosa de los sistemas de baja presión se fundamenta en su estructura térmica vertical y simetría. El marco teórico del **Espacio de Fase (Cyclone Phase Space)**, propuesto por Hart (2003), establece que un ciclón extratropical es un vórtice fundamentalmente asimétrico de núcleo frío (*Cold – Core*). Físicamente, esto implica que la intensidad del viento aumenta con la altura (por la relación del viento térmico) y que su fuente de energía primaria es la conversión baroclínica de energía potencial disponible en cinética (Hoskins and Hodges, 2002). Esta definición teórica permite diferenciar los procesos dinámicos de latitudes medias de aquellos puramente convectivos (tropicales) o híbridos (subtropicales) que coexisten en el Atlántico Sur (Evans and Braun, 2012).

2.1.2. Modelos de estructura y asimetría del viento

La distribución espacial de las variables en superficie (viento y presión) responde al modelo conceptual de evolución del sistema. La teoría clásica de ? describe una evolución simétrica hacia la oclusión. Sin embargo, para ciclones oceánicos intensos, el modelo de **Fractura Frontal** de ? provee la base física más aceptada. Según este modelo (ver Figura 2.4 en Couto de Souza, 2024), la ruptura del frente frío y el aislamiento del núcleo cálido (*warm seclusion*) generan una asimetría estructural inherente. Teóricamente, esto explica por qué los máximos de cantidad de movimiento no se alinean con el mínimo de presión, sino que se concentran en regiones específicas como el *sting jet* o el chorro de barrera, desacoplados del centro geométrico (?).

2.2. Mecanismos forzantes de la ciclogénesis regional

La teoría de la ciclogénesis en el Hemisferio Sur establece que la formación de vórtices no es aleatoria, sino que responde a forzantes físicos estacionarios que actúan sobre el flujo de los oestes.

2.2.1. Ciclogénesis de Sotavento (Forzante Orográfico)

El mecanismo físico dominante en latitudes medias de Sudamérica es la **ciclogénesis de sotavento** (*Lee Cyclogenesis*). Según la teoría de conservación de la vorticidad potencial descrita por Gan and Rao (1994), cuando una columna de aire atraviesa una barrera orográfica (los Andes), debe comprimirse verticalmente al subir y estirarse al bajar. Este estiramiento vertical en el flanco oriental (sotavento) genera, por conservación del momento angular, un aumento de la vorticidad ciclónica relativa. Este proceso dinámico es la causa teórica de la alta frecuencia de formación de sistemas explosivos en la región de La Plata y Uruguay (Gramcianinov et al., 2019).

2.2.2. Ciclogénesis Diabática (Forzante Térmico)

En contraste con la dinámica orográfica, la ciclogénesis en latitudes subtropicales (costa sur de Brasil) se sustenta teóricamente en forzantes diabáticos. Como explican Reboita et al. (2022b), la inestabilidad de la capa límite marina, generada por los fuertes flujos de calor latente y sensible sobre la Corriente de Brasil, actúa reduciendo la estabilidad estática efectiva de la atmósfera. Esto permite que perturbaciones débiles en altura se acoplen con la superficie y se intensifiquen rápidamente, un mecanismo energético distinto al forzamiento puramente baroclínico de las altas latitudes (Couto de Souza, 2024).

2.3. Fundamentos del análisis de eventos compuestos y espacial

2.3.1. Teoría de Eventos Compuestos

El concepto de **Evento Compuesto** (*Compound Event*) define una clase de fenómenos extremos donde el impacto resulta de la interacción estadística y física de múltiples variables, y no de sus valores individuales extremos (?). En la física de ciclones, Chen and Di Luca (2025) establecen que existe una dependencia no lineal

entre la termodinámica (precipitación/calor latente) y la dinámica (viento/vorticidad). Por tanto, el marco teórico adecuado para su estudio no es univariado, sino que requiere evaluar la probabilidad conjunta de ocurrencia, dado que la retroalimentación entre ambas variables define la severidad del sistema.

2.3.2. Estimación de Densidad y Variabilidad Espacial

Dado que los ciclones extratropicales son sistemas móviles y asimétricos, los promedios eulerianos (en puntos fijos) tienden a suavizar las estructuras extremas. Teóricamente, la distribución de impactos se describe mejor mediante funciones de densidad de probabilidad (PDF) en un marco de referencia lagrangiano (móvil). La **Estimación de Densidad por Kernel (KDE)** es la herramienta matemática no paramétrica que permite reconstruir la forma de esta distribución subyacente sin asumir normalidad (Priestley and Catto, 2022). Asimismo, para descomponer la complejidad de estos campos espaciales, la teoría de **Funciones Ortogonales Empíricas (EOF)** postula que la variabilidad de un campo atmosférico turbulento puede descomponerse en modos ortogonales de varianza máxima. Esto permite separar teóricamente las estructuras físicas coherentes (señal) del ruido de fondo, identificando patrones de acoplamiento físico entre variables distintas (MEOF) (?).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño general del estudio

El objetivo metodológico central de esta tesis consiste en caracterizar la distribución espacial y la magnitud de los máximos de precipitación y viento asociados a los ciclones extratropicales del Atlántico Sur, adoptando un marco de referencia lagrangiano centrado en el sistema. El análisis se condiciona sistemáticamente por dos factores determinantes: la fase del ciclo de vida del ciclón y su región de ciclogénesis en Sudamérica.

La estrategia experimental se estructura en una secuencia lógica: se parte de una base de datos preexistente de trayectorias y una clasificación objetiva de fases evolutivas; sobre esta base, se extraen campos horarios del reanálisis alrededor del centro de cada sistema para construir compositos representativos y, finalmente, se aplican técnicas estadísticas para cuantificar los extremos de las variables de impacto.

3.2. Datos del Reanálisis ERA5

Para la caracterización de los campos atmosféricos se utilizó el reanálisis de quinta generación del ECMWF, ERA5, descrito por Hersbach et al. (2020). Se analizó el período comprendido entre 1979 y 2020, accediendo específicamente a las variables de precipitación y viento a través del conjunto de datos “*ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*” (Hersbach et al., 2023).

La elección de ERA5 responde a su alta resolución espacial (~ 31 km) y temporal (horaria). Esta capacidad para resolver escalas finas es crítica en este estudio, ya que, tal como han demostrado Priestley and Catto (2022) y Dalanhese et al. (2023), la mayor resolución reduce la subestimación de la intensidad de los sistemas observada en generaciones previas de reanálisis, permitiendo una representación más realista de los gradientes de viento y los núcleos de precipitación asociados a los ciclones.

3.2.1. Variables meteorológicas

La caracterización de los patrones espaciales se realizó a partir de campos horarios extraídos de ERA5, seleccionando las variables que describen la intensidad hidrometeorológica y dinámica del sistema:

- Precipitación total acumulada.
- Magnitud del viento en superficie (10 y 100 m).

La decisión de analizar conjuntamente los campos de viento y precipitación responde a la necesidad de capturar la estructura de los eventos compuestos (*compound events*). Investigaciones recientes en latitudes medias, como la de Chen and Di Luca (2025), destacan que la co-ocurrencia espacial y temporal de máximos de viento y precipitación es una propiedad intrínseca de la dinámica de los ciclones extratropicales. Esta interacción define el evento más allá de sus componentes individuales, lo que ayuda a justificar la aplicación de técnicas multivariadas para desacoplar sus modos de variabilidad y entender su coherencia espacial.

3.3. Base de datos de ciclones

El insumo principal de esta investigación es una base de datos climatológica integrada que combina la detección lagrangiana de los sistemas con una caracterización objetiva de su evolución dinámica. Específicamente, se utilizó la base de datos de ciclones del Atlántico Sur generada y procesada por Couto de Souza et al. (2024), la cual se construye sobre el catálogo de trayectorias originalmente desarrollado por Gramcianinov et al. (2019).

3.3.1. Trayectorias y detección

El componente de seguimiento (*tracking*) se basa en la climatología de Gramcianinov et al. (2019), desarrollada a partir del reanálisis ERA5 utilizando el algoritmo TRACK para la identificación de los sistemas usando el campo de vorticidad relativa en 850 hPa (ζ_{850}); los detalles técnicos sobre la configuración específica del algoritmo y el filtrado espectral utilizado para aislar la escala sinóptica se encuentran descritos en profundidad en Gramcianinov et al. (2019) y Hoskins and Hodges (2005).

La elección de trabajar con trayectorias derivadas de la vorticidad, en lugar de la presión al nivel del mar (MSLP), se fundamenta en la recomendación metodológica de Sinclair (1994). Este autor estableció que la vorticidad evita el sesgo sistemático hacia ciclones lentos y profundos, permitiendo capturar adecuadamente los sistemas móviles

3. Metodología

típicos de las latitudes medias. Además, la base de datos utilizada incorpora las ventajas del reanálisis ERA5 en regiones de orografía compleja: según Gramcianinov et al. (2020), su alta resolución permite una detección más temprana y precisa de centros ciclónicos al sotavento de los Andes. Cabe destacar que el catálogo original de Gramcianinov et al. (2019) ya incluye filtros de relevancia sinóptica, conservando únicamente aquellos sistemas con una duración mínima de 24 horas y un desplazamiento superior a los 1000 km.

3.3.2. Fases del ciclo de vida

Para los fines de esta tesis, no se utilizaron las trayectorias crudas, sino la versión enriquecida por Couto de Souza et al. (2024). Estos autores procesaron el catálogo original aplicando el algoritmo *CycloPhaser* (de Souza et al., 2025) para segmentar objetivamente la historia de cada ciclón. Como resultado, la base de datos final utilizada en este estudio proporciona, para cada paso de tiempo, la posición del sistema y su fase evolutiva correspondiente, definida según la tasa de cambio de la vorticidad central:

1. **Incipiente (Ic):** Etapa inicial de organización del vórtice.
2. **Intensificación (It):** Período de rápido aumento (negativo) de la vorticidad ciclónica.
3. **Madurez (M):** Etapa de máxima intensidad y estabilización relativa.
4. **Decaimiento (D):** Fase de debilitamiento progresivo (ciclólisis).

3.3.3. Selección de ciclos de vida canónicos

A partir de esta base de datos procesada, se aplicó un criterio de selección específico para el análisis estadístico de los impactos. Si bien la transición entre fases puede presentar re-intensificaciones complejas, esta investigación se restringe a un subconjunto de ciclones con una evolución lineal.

Esto implica que se seleccionaron únicamente los sistemas que atraviesan estrictamente y en orden las cuatro fases: Incipiente → Intensificación → Madurez → Decaimiento. Este arquetipo representa aproximadamente el 60 % de los sistemas del Atlántico Sur según las estadísticas de Couto de Souza et al. (2024). Esta restricción metodológica es necesaria para garantizar la homogeneidad de la muestra, asegurando que los compositos de cada fase (Ic, It, M, D) sean físicamente comparables y no estén contaminados por la redistribución de energía asociada a ciclos de vida no monotónicos.

3.4. Procesamiento

Para analizar la estructura de los ciclones independientemente de su ubicación geográfica absoluta, se adopta un marco de referencia relativo o lagrangiano. Para cada instante t de la vida de un ciclón, se define un dominio móvil de $20^\circ \times 20^\circ$ centrado en las coordenadas de su núcleo, proporcionadas por la base de datos de trayectorias. Dentro de este dominio, se extraen los campos de las variables de impacto.

Este enfoque de composición centrada en el ciclón es fundamental para aislar la señal de mesoescala de los sistemas extratropicales y ha sido ampliamente utilizado para caracterizar sus entornos en el Atlántico Sur (Crespo et al., 2021; Priestley and Catto, 2022). El análisis se realiza de forma separada para cada combinación de región de ciclogénesis y fase del ciclo de vida, permitiendo estratificar los resultados de manera simultánea por estos dos factores.

Para evitar la variabilidad de alta frecuencia inherente a los datos horarios y obtener un campo representativo de la estructura media del ciclón en cada fase, se aplica un promediado temporal. Específicamente, para cada ciclón y para cada fase por la que atraviesa, se seleccionan los dos o tres tiempos centrales de dicha fase (dependiendo de si su duración en horas es par o impar) y se promedian sus campos espaciales. Este procedimiento genera un campo promedio por ciclón-fase, sobre el cual se realizarán los análisis subsiguientes.

3.5. Estratificación por regiones de ciclogénesis

La base de datos incluye la localización de la génesis de cada sistema, permitiendo estratificar el análisis geográficamente. Para la definición de los dominios, este estudio adopta estrictamente la taxonomía espacial propuesta por Gramcianinov et al. (2019), la cual identifica tres regiones en Sudamérica basadas en la densidad de ciclogénesis:

- SBR (Sur-Sudeste de Brasil): $52^\circ - 38^\circ\text{W}$, $30^\circ - 20^\circ\text{S}$
- LPB (La Plata/Uruguay): $69^\circ - 52^\circ\text{W}$, $38^\circ - 23^\circ\text{S}$
- ARG (Patagonia/Argentina): $70^\circ - 50^\circ\text{W}$, $55^\circ - 39^\circ\text{S}$

Esta segmentación operativa es consistente con los regímenes dinámicos descritos en la síntesis climática reciente de Reboita et al. (2026). Según esta revisión, cada sector presenta mecanismos de forzamiento únicos: La región SBR se distingue por un régimen frecuentemente influenciado por procesos diabáticos y transiciones híbridas. Como detallan Marrafon et al. (2022) y Reboita et al. (2022b), es aquí donde la interacción con los gradientes de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y el transporte de humedad

favorece el desarrollo de sistemas con núcleos cálidos. Por su parte, la región LPB actúa como una zona de transición crítica. Estudios de Crespo et al. (2021) demuestran que la ciclogénesis en este sector está fuertemente forzada por anomalías de vorticidad potencial en niveles altos, lo que, sumado a la baroclinicidad costera, favorece una alta densidad de eventos explosivos (Andrade et al., 2024). Finalmente, ARG representa el entorno clásico dominado por la inestabilidad del frente polar y el forzante orográfico de los Andes (Vera et al., 2002; Inatsu and Hoskins, 2004).

3.6. Técnicas estadísticas de caracterización

3.6.1. Extracción de máximos y análisis de histogramas

A partir del campo promedio por ciclón–fase, se identifica la magnitud y la ubicación (en coordenadas relativas al centro) del valor máximo de la variable dentro del dominio de $20^\circ \times 20^\circ$. Este procedimiento genera, para cada combinación región–fase–variable, un conjunto de m valores máximos (uno por ciclón).

Con estos valores se construyen histogramas de frecuencias para describir la distribución de las magnitudes máximas. Este análisis permite comparar cuantitativamente cómo cambian los rangos de valores más probables o extremos entre las diferentes fases del ciclo de vida y entre las distintas regiones de ciclogénesis.

3.6.2. Estimación de densidad de kernel (KDE) de máximos

Para caracterizar la distribución espacial preferencial de la ocurrencia de máximos, se transforma cada campo promedio por ciclón–fase en un mapa binario. En este mapa, todos los píxeles tienen valor 0, excepto el píxel correspondiente a la ubicación del máximo, que tiene valor 1. A partir del conjunto de m mapas binarios para una combinación región–fase–variable dada, se aplica una estimación de densidad de kernel (KDE).

El resultado es un campo continuo de densidad de probabilidad relativa que indica, para cada posición dentro del dominio centrado, la probabilidad de encontrar el máximo de la variable. Esta técnica es particularmente útil para visualizar asimetrías sistemáticas en la distribución espacial de los impactos, permitiendo evaluar, por ejemplo, si los vientos máximos tienden a ubicarse en un cuadrante específico respecto al centro, y cómo esto varía con la fase del ciclo de vida (Gramcianinov et al., 2023).

3.6.3. Análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) univariado

Para identificar los patrones espaciales dominantes de variabilidad en la estructura de los ciclones dentro del marco centrado, se aplica un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Este análisis se realiza de manera separada para cada variable (V10, V100, precipitación), región de ciclogénesis y fase del ciclo de vida, utilizando el conjunto de m campos promedio (compositos) por ciclón-fase.

Previo al análisis, a cada campo composito se le resta la media espacial del conjunto y se aplica una ponderación por la raíz cuadrada del coseno de la latitud para tener en cuenta la convergencia de los meridianos. La EOF descompone la varianza total del conjunto en modos espaciales ortogonales (las EOFs) y sus correspondientes series temporales (componentes principales). Este método, adaptado al dominio lagrangiano, permite aislar y comparar las estructuras espaciales más recurrentes o típicas asociadas a los ciclones en cada contexto (región/fase), siguiendo la lógica de análisis de patrones aplicada en estudios sinópticos (Vera et al., 2002).

3.6.4. EOF combinado (multivariado) precipitación–viento

Para evaluar la covariabilidad espacial entre los campos de precipitación y viento, se realiza un análisis EOF combinado (MEOF). Dado que estas variables poseen unidades físicas y rangos de varianza dispares (mm/h vs. m/s), es un requisito metodológico fundamental estandarizar las series antes de su integración para evitar que la variable con mayor magnitud numérica domine los modos resultantes (Wilks, 2019).

El procedimiento consiste en: (i) calcular las anomalías de cada campo respecto a su media; (ii) normalizar dichas anomalías dividiéndolas por la desviación estándar espacialmente promediada de cada variable, asegurando un peso equiparable en la matriz de covarianza combinada; y (iii) concatenar espacialmente los campos normalizados para formar un vector de estado ampliado, siguiendo el esquema de análisis de patrones acoplados descrito por Bretherton et al. (1992).

El análisis EOF aplicado a esta matriz combinada permite obtener modos acoplados que expliquen la varianza conjunta, siguiendo la base matemática de descomposición multivariada validada por Liang et al. (2018). La aplicación de esta técnica es instrumental para responder a interrogantes físicas recientes planteadas por Sinclair and Catto (2023), permitiendo revelar si los núcleos de precipitación intensa se co-ubican sistemáticamente con los gradientes de viento más fuertes y cómo esta coherencia estructural evoluciona a lo largo del ciclo de vida.

3.7. Análisis de sensibilidad: subconjunto de ciclones intensos

Con el fin de evaluar si los patrones identificados cambian para sistemas más vigorosos y potencialmente más dañinos, se define un subconjunto de ciclones intensos basado en un criterio dinámico interno. Para cada ciclón en la base de datos, se extrae el valor mínimo de vorticidad relativa a 850 hPa (ζ_{850}^{min}) a lo largo de todo su ciclo de vida. En el Hemisferio Sur, valores más negativos indican un vórtice más intenso. El subconjunto intenso se define como el 10 % superior de ciclones con los valores de ζ_{850}^{min} más negativos (cuartil superior). Este criterio de selección de extremos es consistente con estudios previos sobre ciclones intensos en la región (Reboita et al., 2010b).

Sobre este subconjunto se repite íntegramente el flujo metodológico descrito en las secciones anteriores: construcción de campos promedio por fase, extracción de máximos, análisis de histogramas, KDE de localización y análisis EOF (tanto univariado como multivariado). La comparación sistemática entre los resultados del conjunto total y los del subconjunto intenso permite evaluar de manera robusta si una mayor intensidad dinámica del vórtice se asocia con cambios significativos en: (i) la magnitud de los máximos de viento y precipitación, (ii) la distribución espacial relativa de estos máximos, y (iii) los patrones estructurales dominantes, tanto para cada fase como para cada región de ciclogénesis. Estudios compositivos recientes sugieren que los ciclones más intensos, especialmente los explosivos, pueden presentar estructuras frontales y patrones de impacto distintivos (Andrade et al., 2024).

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.
- Bretherton, C. S., Smith, C., and Wallace, J. M. (1992). An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *Journal of Climate*, 5(6):541–560.
- Cardoso, A. A., da Rocha, R. P., and Crespo, N. M. (2022). Synoptic climatology of subtropical cyclone impacts on near-surface winds over the south atlantic basin. *Earth and Space Science*, 9(12):e2022EA002482.
- Chen, T.-C. and Di Luca, A. (2025). Characteristics of precipitation and wind extremes induced by extratropical cyclones in northeastern North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130:e2024JD042079.
- 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. (2024). *Cyclones in the Southwestern Atlantic: Life Cycle and Energetics*. Tesis doctoral, Universidade de São Paulo.
- 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.
- de Souza, D. C., da Silva Dias, P. L., Gramcianinov, C. B., and de Camargo, R. (2025). Cyclophaser: A python package for detecting extratropical cyclone life cycles. *Journal of Open Source Software*, 10(108):7363.
- 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. (1994). The influence of the andes cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 122(6):1141–1157.
- Gozzo, L. F. and da Rocha, R. P. (2013). Air-sea interaction processes influencing the development of a shapiro-keyser type cyclone over the subtropical south atlantic ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 170:917–934.
- 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., 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., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., and Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Consultado de la Climate Data Store (CDS) de Copernicus.
- 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.
- Hoskins, B. and Hodges, K. (2002). New perspectives on the northern hemisphere winter storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(6):1041–1061.
- 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.
- Marrafon, V. H., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., and de Jesus, E. M. (2022). Classificação dos tipos de ciclones sobre o oceano atlântico sul em projeções com o regcm4 e mcgs. *Revista Brasileira de Climatologia*, 30:439–463.
- 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.

Bibliografía

- 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. (2022a). 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.
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. d. S., Lucyrio, V., de Jesus, E. M., and da Rocha, R. P. (2022b). 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.
- Sinclair, M. R. (1994). An objective cyclone climatology for the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10):2239–2256.
- 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.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier, Amsterdam, 4 edition.