



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**Análisis de las variaciones climáticas del viento y sus
aplicaciones en la Ingeniería Civil, utilizando
simulaciones de alta resolución (WRF-SAAG) en Chile
continental**

Memoria de Título presentada por

Claudio Matías Huerta Cancino

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Miguel Lagos Zúñiga
Profesor Co-Guía:
Claudio Sepúlveda Contreras
Karina Soto Rivas

Septiembre de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado
Análisis de las variaciones climáticas del viento y sus aplicaciones en la Ingeniería Civil, utilizando
Título del trabajo: simulaciones de alta resolución (WRF-SAAG) en Chile continental

Nombre del candidato(a): Claudio Matías Huerta Cancino

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Miguel Ángel Lagos Zúñiga, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)
del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24-09-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24-09-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA MEMORIA:

Análisis de las variaciones climáticas del viento y sus aplicaciones en la Ingeniería Civil, utilizando simulaciones de alta resolución (WRF-SAAG) en Chile continental

AUTOR:

Claudio Matías Huerta Cancino

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Miguel Lagos Zúñiga	
Profesor Co-Guía	Claudio Sepúlveda Contreras	
Profesor Co-Guía	Karina Soto Rivas	

Santiago, Chile, septiembre de 2026

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES CLIMÁTICAS DEL VIENTO Y SUS APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL, UTILIZANDO SIMULACIONES DE ALTA RESOLUCIÓN (WRF-SAAG) EN CHILE CONTINENTAL.

Claudio Huerta Cancino

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

El viento constituye una variable climática de relevancia para distintas áreas de la Ingeniería Civil, debido a su influencia sobre el aprovechamiento energético, las solicitaciones estructurales y la generación de oleaje. En este contexto, la presente investigación analiza las variaciones proyectadas del viento sobre Chile continental y el océano Pacífico adyacente bajo condiciones de cambio climático, utilizando simulaciones climáticas regionales WRF-SAAG de alta resolución, y evalúa sus posibles implicancias en aplicaciones de Ingeniería.

Se analizaron diferentes componentes del viento a 10 metros de la superficie para un período histórico (2000–2021) y un período futuro (2060–2081) generado mediante el enfoque *Pseudo Global Warming* bajo el escenario SSP3-7.0. Se caracterizaron las variaciones anuales y estacionales de la rapidez media y máxima, incorporando análisis estadísticos y una evaluación regional de la distribución de los máximos. Posteriormente, los cambios obtenidos se aplicaron al análisis de densidad de potencia eólica, viento extremo para una aplicación estructural basada en la NCh432:2025 y estimación de altura significativa de oleaje mediante una metodología combinada WRF-SPM.

Los resultados muestran una respuesta espacialmente heterogénea del viento futuro, con aumentos predominantes en el Norte Grande y Norte Chico, particularmente en sectores cordilleranos, disminuciones hacia las zonas Sur y Austral y variaciones menores en la zona Central. En potencial eólico, este patrón se amplifica debido a la dependencia cúbica con la rapidez, generando aumentos cercanos al 25 % en sectores del norte y disminuciones de hasta un 30 % hacia el sur. En la aplicación estructural, un aumento cercano al 21 % en la velocidad extrema del caso de estudio se tradujo en un incremento aproximado del 46 % de la presión de referencia. En oleaje, las estimaciones mostraron aumentos de la altura significativa principalmente en la zona Norte y disminuciones hacia el sector austral, con variaciones medias entre aproximadamente +0,11 y -0,41 metros entre los nodos analizados.

En conjunto, los resultados evidencian que las variaciones futuras del viento pueden generar impactos diferenciados según la región y la aplicación considerada. Las simulaciones WRF-SAAG permiten avanzar desde la caracterización climática de alta resolución hacia la evaluación de variables de interés para la Ingeniería Civil, aportando antecedentes de alta resolución sin precedentes en la región para identificar posibles oportunidades y riesgos asociados al cambio climático, hasta ahora analizados con modelos de menor resolución.

Palabras clave: viento, cambio climático, WRF-SAAG, *Pseudo Global Warming*, potencial eólico, cargas de viento, oleaje.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por todo su apoyo, que ha sido fundamental para mi formación y crecimiento, por priorizar siempre nuestro bienestar y educación, tanto para mí como para mi hermana por sobre todas las cosas, por su amor incondicional, por su ayuda en los momentos difíciles y por enseñarme que lo más importante es mantenernos unidos como familia. Me siento muy feliz de ser la persona en la que me he convertido y eso es gracias a ustedes.

A mi hermana, por todo el apoyo, los buenos momentos, los consejos y las risas a lo largo de toda mi vida, no podría haber tenido una mejor hermana mayor.

También a mis gatitos, por todo el amor, risas y por ser los más fieles compañeros que podría tener.

Finalmente, gracias al profesor Miguel por su vocación y por su ayuda a lo largo de la realización de este proyecto.

Powered@NLHPC: Esta memoria fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (CCSS210001).

Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	6
1.1	Contexto y problema.....	6
1.2	Objetivos.....	7
2	Marco teórico.....	8
2.1	Viento y cambio climático	8
2.1.1	Características y patrones de viento en Chile.....	8
2.1.2	Cambio climático.....	10
2.2	Modelos climáticos	11
2.2.1	Simulaciones WRF-SAAG	12
2.3	Aplicaciones del viento en la Ingeniería Civil.....	13
2.3.1	Potencial eólico.....	13
2.3.2	Acción del viento sobre estructuras	13
2.3.3	Altura significativa del oleaje	14
3	Metodología.....	16
3.1	Datos utilizados y dominio de estudio.....	16
3.2	Procesamiento de datos y variaciones del viento.....	17
3.3	Evaluación estadística de los cambios.....	18
3.4	Aplicaciones del viento en la Ingeniería Civil.....	18
3.4.1	Potencial eólico.....	18
3.4.2	Acción del viento sobre estructuras	19
3.4.3	Análisis de la altura significativa del oleaje	21
4	Resultados	24
4.1	Caracterización general del viento histórico y futuro	24
4.2	Variaciones estacionales de la rapidez media y máxima	26
4.3	Análisis de frecuencia del viento máximo.....	29
4.4	Potencial eólico	31
4.5	Acción del viento sobre estructuras.....	34
4.6	Altura significativa del oleaje.....	37
5	Discusión de resultados	41
5.1	Variaciones climáticas del viento.....	41
5.2	Potencial eólico	42
5.3	Impactos en diseño estructural	44
5.4	Impactos en el oleaje.....	45
6	Conclusiones.....	46
	Referencias.....	47

1 Introducción

1.1 Contexto y problema

El viento es un componente esencial del sistema climático y desempeña un papel determinante en el transporte de energía, masa y humedad dentro de la atmósfera. Su influencia se extiende a diversos ámbitos de la Ingeniería Civil: interviene en la ventilación natural y dispersión de contaminantes, regula procesos hidrológicos como la evapotranspiración y el balance hídrico, y genera cargas dinámicas que afectan la estabilidad de estructuras y edificaciones. En estructuras esbeltas, las solicitaciones producidas por el viento pueden constituir una condición dominante de diseño frente a otras acciones, como las sísmicas (Ramírez, 2022). Además, el viento constituye un recurso fundamental para la generación de energía renovable, cuyo aprovechamiento mediante energía eólica ha demostrado ser una alternativa adecuada para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Watts y Jara, 2011).

La relevancia de las acciones producidas por el viento se evidencia especialmente durante eventos meteorológicos intensos, los cuales pueden generar daños sobre edificaciones, infraestructura eléctrica, vial y portuaria. Un ejemplo reciente ocurrió durante el sistema frontal de agosto de 2024, cuando se registraron vientos de hasta 120 km/h en la Región Metropolitana y 180 km/h en la Región del Biobío, junto con caída de árboles y techumbres, interrupciones masivas del suministro eléctrico y 62 eventos de daño en obras públicas, incluyendo caminos y puentes (SENAPRED, 2024). Estos antecedentes evidencian la importancia de caracterizar los vientos intensos y evaluar su posible evolución bajo condiciones climáticas futuras.

La identificación de tendencias de largo plazo en la rapidez del viento presenta una alta complejidad debido a su marcada variabilidad espacial y temporal. En el sur de Sudamérica, Merino y Gassmann (2022) analizaron registros meteorológicos y datos de reanálisis para 1990–2020, identificando tendencias decrecientes del viento superficial en gran parte de las estaciones estudiadas, aunque con diferencias según la ubicación y época del año. Estos resultados muestran que la evolución histórica del viento no presenta un comportamiento espacialmente uniforme.

Por otro lado, el cambio climático está modificando el equilibrio energético del planeta, provocando variaciones evidentes en la temperatura, las precipitaciones y la circulación general de la atmósfera (Holton y Hakim, 2013). Durante las últimas décadas se ha observado un calentamiento en todas las regiones del planeta (IPCC, 2021), generando cambios en los sistemas de presión, lo cual influye directamente en los patrones de viento, modificando su intensidad, dirección y frecuencia.

A nivel sudamericano, distintos estudios han evaluado el comportamiento futuro del viento. Garreaud y Falvey (2009) analizaron inicialmente las proyecciones de 15 modelos climáticos globales de CMIP3 y posteriormente utilizaron el modelo climático regional PRECIS (Jones et al., 2004), con una resolución de 25 km, para comparar el período 1961–1990 con 2071–2100 bajo los escenarios de emisiones A2 y B2, correspondientes a trayectorias de emisiones elevadas e intermedias, respectivamente. Sus resultados proyectaron un fortalecimiento de los vientos costeros del sur, entre 37° y 41° S durante primavera y verano. Por otro lado, Martínez e Iglesias (2024) utilizaron un ensamble de modelos climáticos globales pertenecientes a CMIP6 bajo los escenarios SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, correspondientes a escenarios de bajas, intermedias y altas emisiones, respectivamente. Sus resultados muestran una respuesta espacialmente heterogénea del recurso eólico en Sudamérica, incluyendo disminuciones importantes en sectores del sur de Chile.

Los modelos climáticos globales han permitido avanzar en la identificación de posibles cambios futuros del viento; sin embargo, su resolución espacial (cientos de kilómetros) limita la representación de procesos regionales asociados a la topografía y la línea de costa. Por esta razón, los modelos climáticos regionales permiten obtener información con mayor detalle espacial. En este contexto, las simulaciones WRF-SAAG, desarrolladas mediante el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al., 2019), poseen una resolución horizontal aproximada de 4 km sobre Sudamérica, permitiendo representar con mayor detalle la influencia de la topografía sobre el viento (Dominguez et al., 2024).

La consideración de posibles cambios futuros del viento también ha comenzado a incorporarse en la normativa estructural. En Australia, la norma AS 1170.2-2021 incorporó un factor de cambio climático que ajusta las velocidades de diseño en las distintas regiones del país (Standards Australia, 2021). Por otro lado, la Unión Europea ha instruido la inclusión de los efectos del cambio climático en los Eurocódigos, correspondientes a las normas estructurales vigentes en los países miembros de esta entidad (European Commission, Joint Research Centre, 2022).

En el contexto nacional, el país ha impulsado el desarrollo en materia energética con la Ley 20.698 promulgada el año 2013, la cual estableció que para el año 2025 un 20 % del total de la energía comercializada en el país debía provenir de energías renovables no convencionales, meta alcanzada en el año 2024 (Ministerio de Energía, 2024). En el ámbito estructural, el Colegio de Ingenieros de Chile junto con el Instituto Nacional de Normalización actualizaron la norma estructural de vientos NCh 432:2025 (Colegio de Ingenieros de Chile, 2025), específicamente las velocidades de diseño y factores de corrección para cada una de las zonas del país, mejorando la representatividad de los datos meteorológicos. Complementariamente, el Comité Chileno del CIGRE en el año 2017 elaboró la “Guía de consulta sobre los efectos del viento en líneas aéreas de redes eléctricas”, haciendo especial énfasis en la necesidad de realizar una norma específica para este tipo de estructuras (Comité Nacional Chileno del CIGRE, 2017).

En el ámbito costero, el oleaje constituye una variable relevante para el diseño y operación de obras marítimas, la actividad portuaria y la seguridad de las zonas costeras. En Chile, los eventos de marejadas han provocado cierres portuarios y daños sobre infraestructura, por lo que evaluar posibles modificaciones del régimen de oleaje asociadas a cambios en el viento resulta relevante para la planificación y adaptación costera (Morales et al., 2019; Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

A pesar de estos avances, los estudios que integran de forma conjunta proyecciones climáticas regionales de alta resolución del viento y su impacto sobre distintas aplicaciones de la Ingeniería Civil en Chile siguen siendo limitados. Comprender los impactos del cambio climático en la rapidez y distribución del viento es esencial para la planificación energética, la seguridad del diseño estructural y para evaluar posibles cambios en el régimen de oleaje. Bajo este contexto, este estudio propone analizar simulaciones climáticas regionales de alta resolución WRF-SAAG, con el fin de evaluar las implicancias de las variaciones proyectadas del viento en tres áreas de la Ingeniería Civil: energía eólica, diseño estructural y la dinámica del oleaje.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

El objetivo general de la investigación es analizar las variaciones de viento en Chile continental y la costa del Pacífico en el contexto del cambio climático, utilizando simulaciones del modelo WRF-SAAG (Dominguez et al., 2024) para los períodos histórico y futuro, evaluando potenciales impactos en las áreas de la Ingeniería Civil.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las variaciones espaciales y temporales del viento a partir de las simulaciones del modelo WRF-SAAG para escenarios histórico y futuro.
- Identificar zonas de interés en el territorio nacional, correspondientes a áreas con incrementos o disminuciones del recurso del viento que puedan representar oportunidades o riesgos para actividades de Ingeniería.
- Evaluar el impacto de las variaciones del viento en áreas de la Ingeniería Civil, tales como potencial eólico, acción del viento sobre estructuras y generación de oleaje.

2 Marco teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos conceptuales necesarios para analizar las variaciones espaciales y temporales del viento bajo condiciones climáticas históricas y futuras, así como sus implicancias en distintas áreas de la Ingeniería Civil. En primer lugar, se describen los principales factores que controlan el comportamiento del viento y su respuesta frente al cambio climático. Posteriormente, se presentan los fundamentos de la modelación climática regional, el modelo WRF-SAAG y el enfoque *Pseudo Global Warming* utilizado para generar las simulaciones futuras. Finalmente, se abordan los conceptos asociados a la densidad de potencia eólica, el análisis de vientos extremos para aplicaciones estructurales y la generación de oleaje por viento.

2.1 Viento y cambio climático

2.1.1 Características y patrones de viento en Chile

El viento se define como el movimiento del aire en la superficie terrestre causado principalmente por diferencias espaciales de presión atmosférica, las cuales son generadas por el calentamiento desigual de la superficie terrestre (Royal Meteorological Society, 2023). Además, la rotación de la tierra influye sobre el movimiento del aire mediante el efecto de Coriolis, el cual provoca una desviación del flujo de aire hacia la izquierda en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte, configurando a la vez los patrones de circulación atmosférica que determinan la dirección de los vientos (Holton y Hakim, 2013).

Además de la circulación a gran escala el viento también se ve influenciado por procesos locales cerca de la superficie, como la fricción, la rugosidad del terreno, la topografía y obstáculos, por lo que su magnitud y dirección pueden variar considerablemente en distancias relativamente pequeñas (Stull, 2017). En zonas costeras actúan las brisas marinas generadas por el contraste térmico diario entre el océano y el continente (Stull, 2017). En sectores cordilleranos, las diferencias de temperatura entre las laderas y los valles producen flujos ascendentes y descendentes por el enfriamiento nocturno y vientos catabáticos (Whiteman, 2000).

El viento corresponde a un campo vectorial y, por lo tanto, puede describirse mediante tres componentes de velocidad: una componente zonal, orientada en dirección este-oeste; una componente meridional, orientada en dirección norte-sur; y una componente vertical, asociada al movimiento ascendente o descendente del aire. En movimientos atmosféricos de escala sinóptica, la velocidad vertical suele ser considerablemente menor que las componentes horizontales, por lo que la caracterización del viento se realiza principalmente a partir de las componentes zonal y meridional (Holton y Hakim, 2013). La combinación de estas dos componentes permite determinar la rapidez horizontal del viento y la dirección hacia la cual se desplaza el flujo. En meteorología, sin embargo, la dirección del viento se expresa convencionalmente indicando el sector desde el cual proviene.

La configuración geográfica de Chile favorece una elevada variabilidad espacial del viento. La extensa costa del océano Pacífico, la presencia de la cordillera de los Andes y la gran extensión latitudinal del territorio generan condiciones atmosféricas contrastantes entre las distintas regiones del país. En sectores costeros de Chile y Perú también se desarrollan jets costeros, caracterizados por vientos intensos y persistentes paralelos a la costa, cuya formación se relaciona con el gradiente de presión, la estabilidad atmosférica y la presencia de la cordillera costera (Aguirre et al., 2017).

De forma más localizada, la interacción entre la circulación atmosférica y la compleja topografía de la cordillera de los Andes favorece el desarrollo de distintos vientos regionales en Chile. Entre ellos se encuentra el viento Raco, observado en el Cajón del Maipo, correspondiente a un flujo superficial intenso, cálido y seco proveniente del este, que se desarrolla principalmente durante noches y mañanas de invierno (Carrera, 2022). Mediante simulaciones con el modelo atmosférico WRF, Carrera (2022) mostró que este fenómeno presenta una fuerte interacción con la topografía del valle y que sus principales características pueden ser representadas mediante modelación atmosférica de alta resolución. En sectores más al sur también se presenta el viento Puelche, un flujo cálido y seco asociado al descenso de aire desde la cordillera hacia los valles y sectores costeros (Montecinos et al., 2017). Estos fenómenos

contribuyen a la elevada variabilidad espacial y temporal del viento en sectores cordilleranos y precordilleranos de Chile.

A una escala sinóptica, las latitudes medias y australes de Chile se encuentran bajo la influencia del cinturón de vientos del oeste y de la trayectoria preferente de sistemas de bajas presiones del hemisferio sur, conocida como *storm track*. Esta región de elevada actividad ciclónica favorece el paso frecuente de sistemas frontales y está asociada a vientos intensos y una alta variabilidad meteorológica en el sur del país (Trenberth, 1991). De esta forma, el comportamiento del viento en Chile responde a la interacción de procesos que abarcan desde fenómenos locales condicionados por la topografía hasta sistemas atmosféricos de escala sinóptica.

Como se observa en la Figura 1, a lo largo de la costa norte y central de Chile predominan vientos del sur y suroeste, asociados a la circulación del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, mientras que hacia las latitudes australes adquieren mayor importancia los vientos del oeste. La climatología presentada fue obtenida a partir del reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011), y los patrones muestran además variaciones estacionales en intensidad y distribución espacial (Reboita et al., 2018).

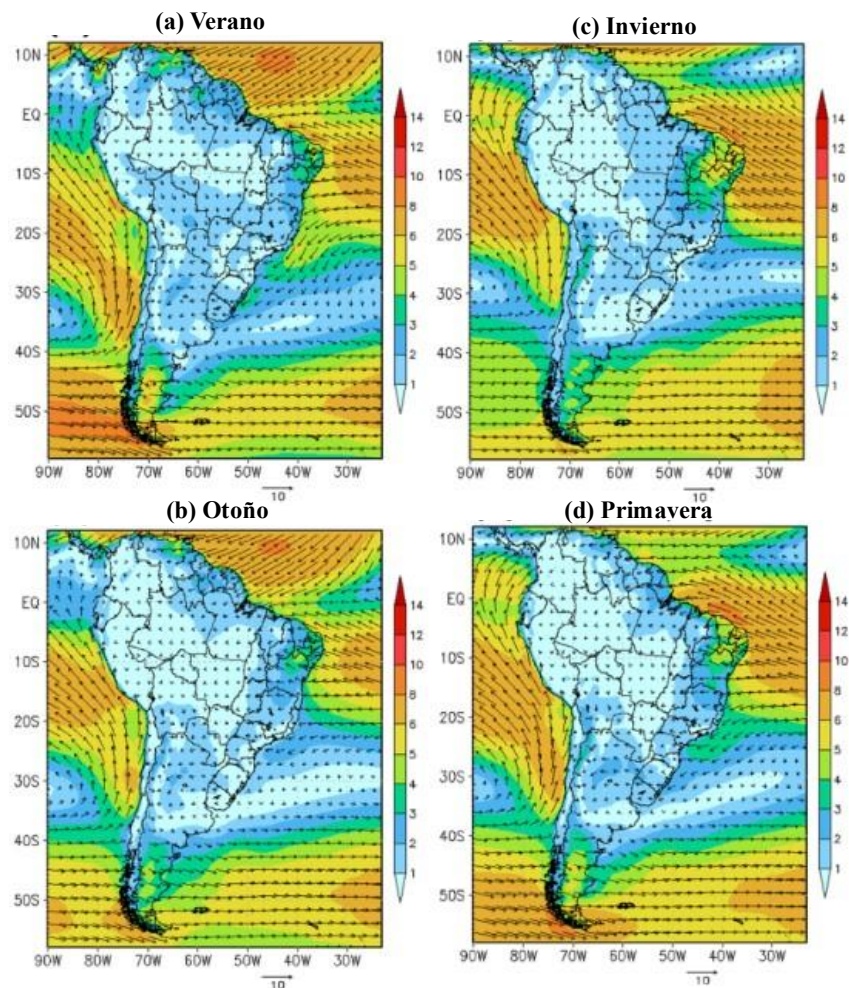


Figura 1: Climatología estacional del viento a 10 m sobre la superficie en Sudamérica para el período 1979-2005, obtenida a partir de ERA-Interim: (a) Verano, (b) Otoño, (c) Invierno, (d) Primavera. Los vectores indican la dirección del viento y los colores su rapidez (m/s). Adaptado de Reboita et al. (2018).

2.1.2 Cambio climático

El cambio climático está modificando de manera progresiva el equilibrio energético del planeta, provocando cambios evidentes en la temperatura, precipitaciones y la circulación general de la atmósfera. El calentamiento observado durante las últimas décadas puede modificar los patrones de viento en términos de su magnitud, dirección y frecuencia (IPCC, 2021). Estas modificaciones no presentan una respuesta espacial uniforme, ya que dependen de factores como la región analizada, la época del año, la altura sobre la superficie, el escenario de emisiones y el modelo climático considerado.

En el Pacífico suroriental, Garreaud y Falvey (2009) analizaron posibles cambios futuros en los vientos costeros del oeste subtropical de Sudamérica hacia fines del siglo XXI. En primera instancia utilizaron 15 modelos climáticos globales de CMIP3 y luego realizaron una regionalización mediante el modelo climático regional PRECIS, con una resolución horizontal de 25 km y forzado por el modelo global HadAM3. Los autores compararon el período histórico 1961–1990 con el período futuro 2071–2100, considerando los escenarios de emisiones A2 y B2, asociados a niveles elevados e intermedios de emisiones, respectivamente. En el escenario A2, los resultados mostraron un aumento de aproximadamente 1 m/s, equivalente a un 15 %, en la rapidez media del viento superficial cercano a la costa respecto del período histórico. Para el escenario B2 se obtuvo un patrón espacial similar, aunque con aumentos de aproximadamente 0,75 m/s, lo cual equivale a un 11 %. Los mayores incrementos se localizaron entre 37° y 41° S durante primavera y verano, asociados principalmente al fortalecimiento de los vientos del sur producto de un aumento del gradiente meridional de presión.

Posteriormente, Reboita et al. (2018) analizaron las proyecciones de viento sobre Sudamérica mediante un ensamble del modelo climático regional RegCM4, con una resolución horizontal de 50 km, forzado por tres modelos globales de CMIP5: MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M y HadGEM2-ES. En Sudamérica, Reboita et al. (2018) mostraron que el modelo regional RegCM4 fue capaz de reproducir los principales patrones espaciales del viento observados en ERA-Interim, aunque persistieron diferencias en su intensidad. El estudio consideró el escenario RCP8.5 y comparó el clima histórico 1979–2005 con dos horizontes futuros, 2020–2050 y 2070–2098. Las simulaciones proyectaron una respuesta espacialmente heterogénea del viento, con aumentos de intensidad en sectores del norte de Sudamérica y en latitudes superiores a 50° S, mientras que en la Patagonia se proyectaron disminuciones, particularmente durante verano. Para fines de siglo, estas variaciones fueron de mayor magnitud que en el futuro cercano, mostrando que la respuesta del viento depende tanto de la región como de la estación del año.

De manera complementaria, las proyecciones de CMIP6 presentadas en la Figura 2 muestran una marcada heterogeneidad espacial en los cambios futuros del viento superficial sobre Sudamérica para mediados del siglo XXI, con sectores donde se proyectan aumentos y otros donde se observan disminuciones en su magnitud (IPCC, 2021).

En conjunto, estos antecedentes muestran que el cambio climático no implica un aumento o disminución generalizada de la rapidez del viento en Sudamérica, sino una redistribución espacial y estacional de los patrones de circulación. Además, la presencia de zonas con bajo acuerdo entre los modelos y las diferencias entre las proyecciones evidencian la influencia del modelo climático, la resolución espacial, el escenario de emisiones y el horizonte temporal considerado.

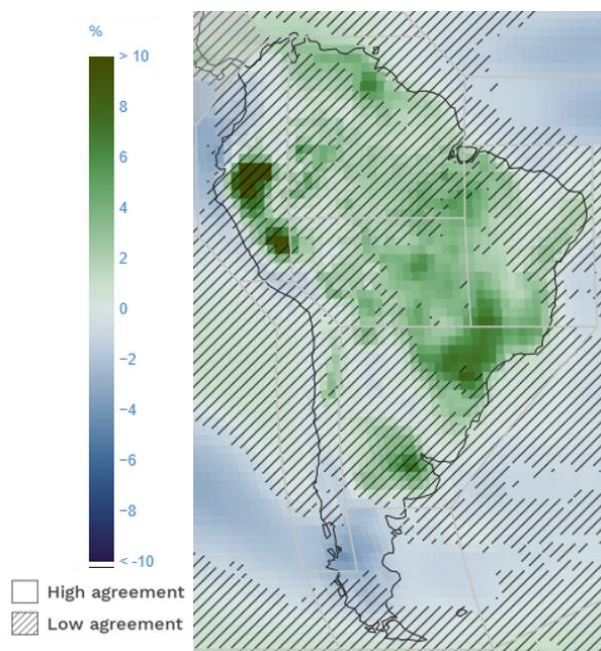


Figura 2: Cambio porcentual proyectado de la rapidez del viento superficial sobre Sudamérica para el período 2041-2060, bajo el escenario SSP3-7.0, respecto del período de referencia 1995-2014. Se presenta el promedio anual de 28 modelos CMIP6. El achurado indica zonas con bajo acuerdo entre los modelos. Fuente: Adaptado de IPCC WGI Interactive Atlas (Gutiérrez et al., 2021).

2.2 Modelos climáticos

Los modelos climáticos son herramientas numéricas utilizadas para representar los principales procesos e interacciones que ocurren entre la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre, permitiendo estudiar el comportamiento del sistema climático y generar proyecciones bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (e.g., Li et al., 2019).

Los modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés) simulan estos procesos a escala planetaria; sin embargo, debido a la extensión espacial y temporal que deben abarcar y a los elevados recursos computacionales requeridos, suelen utilizar resoluciones espaciales relativamente gruesas. Esto limita su capacidad para representar adecuadamente procesos regionales y locales asociados a la topografía, la línea de costa y la rugosidad superficial. Para disminuir esta limitación se emplean técnicas de *downscaling*, las cuales pueden ser de tipo estadístico o dinámico. El *downscaling* estadístico establece relaciones entre variables climáticas de gran escala y condiciones observadas a escala local, presentando un menor costo computacional, aunque depende de que dichas relaciones se mantengan bajo condiciones climáticas futuras. Por otro lado, el *downscaling* dinámico utiliza modelos climáticos regionales (RCM), forzados mediante condiciones iniciales y de borde provenientes de modelos globales o reanálisis atmosféricos, permitiendo representar procesos atmosféricos a escalas espaciales más detalladas (Li et al., 2019).

El aumento de la capacidad computacional ha permitido desarrollar RCM con resoluciones del orden de kilómetros, dando origen a las denominadas simulaciones *Convection-Permitting*. Estas simulaciones reducen la dependencia de parametrizaciones de la convección profunda y permiten representar con mayor detalle la orografía, las superficies heterogéneas y procesos atmosféricos de menor escala. Su valor agregado resulta especialmente relevante en regiones de topografía compleja, aunque requieren recursos computacionales considerablemente mayores que los modelos de resolución más gruesa (Prein et al., 2015).

2.2.1 Simulaciones WRF-SAAG

Entre los modelos utilizados para desarrollar este tipo de simulaciones se encuentra el *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al., 2019), un modelo atmosférico diseñado para aplicaciones meteorológicas y climáticas, cuya configuración permite utilizar diferentes dominios, resoluciones espaciales, niveles verticales y parametrizaciones físicas. A partir de este modelo, el *South America Affinity Group* (SAAG), apoyado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), desarrolló las simulaciones WRF-SAAG, correspondientes a un conjunto de simulaciones climáticas regionales *Convection-Permitting* para Sudamérica con una resolución horizontal aproximada de 4 km y 61 niveles verticales (Dominguez et al., 2024).

La alta resolución de WRF-SAAG representa una oportunidad relevante para Sudamérica, especialmente en regiones de topografía compleja y con limitada disponibilidad de observaciones, como la cordillera de los Andes. Las evaluaciones iniciales realizadas por Dominguez et al. (2024) mostraron que, al comparar la simulación histórica WRF-SAAG con distintos productos observacionales y de reanálisis, la correlación espacial de la temperatura media anual supera 0,95, mientras que para la precipitación media anual varía entre 0,65 y 0,80. Además, la simulación de 4 kilómetros mostró mejoras en la representación del ciclo diurno de la precipitación y de eventos horarios de alta intensidad. En Chile continental, se evaluó WRF-SAAG y se mostró que, pese a presentar limitaciones para reproducir eventos diarios en algunas regiones, sus resultados pueden alcanzar desempeños comparables a productos basados en observaciones en aplicaciones hidrológicas, destacando además la disponibilidad de variables atmosféricas (Segovia, 2025).

Para representar las condiciones históricas, las simulaciones WRF-SAAG son forzadas por el reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020), mientras que la simulación futura utiliza el enfoque *Pseudo Global Warming* (PGW). Este método consiste en modificar las condiciones iniciales y de borde de una simulación histórica mediante una señal de cambio climático obtenida a partir de proyecciones de modelos climáticos globales, permitiendo representar un estado climático futuro manteniendo una configuración atmosférica comparable con la del periodo de referencia (Brogli et al., 2023).

El enfoque *Pseudo Global Warming* (PGW) ha sido utilizado en distintos estudios de modelación climática regional de alta resolución para evaluar cómo condiciones o eventos históricos podrían modificarse bajo un clima futuro. Por ejemplo, Li et al. (2026) aplicaron el método WRF-PGW para estudiar cambios en la precipitación asociada al tifón Lekima bajo distintos escenarios climáticos de CMIP6. Entre sus principales ventajas se encuentran un menor costo computacional respecto de simulaciones climáticas transitorias y la posibilidad de utilizar reanálisis como condición de referencia, reduciendo la influencia de sesgos de los modelos globales. Sin embargo, al conservar en gran medida la evolución sinóptica histórica, el método no representa necesariamente cambios futuros en la frecuencia, trayectoria o variabilidad de los sistemas meteorológicos, y requiere mantener la consistencia física de las perturbaciones aplicadas a las variables atmosféricas (Brogli et al., 2023; Li et al., 2026).

En las simulaciones WRF-SAAG, el escenario futuro se construye mediante el enfoque PGW a partir de las condiciones históricas representadas por ERA5 y una señal de cambio climático obtenida del ensamble CESM2 Large Ensemble (CESM2-LENS2). Este ensamble está compuesto por 100 miembros y, para WRF-SAAG, se utiliza el escenario SSP3-7.0 para representar las condiciones futuras (Rodgers et al., 2021).

Matemáticamente, la construcción del escenario futuro mediante el enfoque *Pseudo Global Warming* (PGW) se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{WRF}_{\text{input}} = \text{ERA5}_{(1999-2021)} + \Delta \text{LENS2}_{\text{SSP3-7.0}} \quad (1)$$

Donde ERA5 representa las condiciones atmosféricas del período histórico y $\Delta\text{LENS}_{\text{SSP3-7.0}}$ corresponde a la anomalía climática proyectada a partir del ensamble CESM2-LENS2 bajo el escenario de altas emisiones SSP3-7.0 (Rodgers et al., 2021).

Dicha anomalía se obtiene a partir de la diferencia de la simulación histórica y futura del modelo climático global LENS2:

$$\Delta\text{LENS}_{\text{SSP3-7.0}} = \text{LENS}_{2060-80} - \text{LENS}_{2000-20} \quad (2)$$

Estas anomalías se incorporan en las condiciones iniciales y de borde de variables atmosféricas como temperatura, humedad, presión geopotencial y componentes del viento. Como resultado, la simulación PGW mantiene una secuencia comparable con el período histórico, pero bajo un estado climático modificado.

2.3 Aplicaciones del viento en la Ingeniería Civil

2.3.1 Potencial eólico

La energía eólica corresponde a la energía cinética contenida en una masa de aire en movimiento. Para caracterizar el recurso disponible en una zona se utiliza comúnmente la densidad de potencia eólica (*Wind Power Density*, WPD), que representa la potencia transportada por el viento por unidad de área perpendicular al flujo (e.g., de Souza Ferreira et al., 2024). La WPD depende principalmente del cubo de la rapidez del viento y de la densidad del aire, por lo que pequeñas variaciones en la rapidez pueden producir cambios considerables en la potencia disponible. La densidad del aire no es estrictamente constante, ya que varía principalmente con la temperatura, presión y altitud. En estudios de potencial eólico se emplean distintos enfoques: algunos adoptan un valor constante de densidad del aire como simplificación (e.g., Martínez e Iglesias, 2024), mientras que otros consideran su variación espacial y temporal a partir de variables atmosféricas (e.g., de Souza Ferreira et al., 2024).

En Chile, un antecedente relevante para la evaluación del recurso corresponde al Explorador Eólico, desarrollado por el Ministerio de Energía y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Esta herramienta utiliza simulaciones realizadas con el modelo WRF para representar espacialmente variables asociadas al recurso eólico, incluyendo rapidez del viento a distintas alturas y densidad del aire (Falvey et al., 2018).

En relación con el cambio climático, distintos estudios proyectan una marcada variabilidad espacial del recurso eólico en Sudamérica. Reboita et al. (2018) identificaron aumentos de WPD cercanos al 40 % en sectores del centro-este de Brasil, junto con disminuciones en la Patagonia y Chile de aproximadamente 20 % durante el verano en un futuro cercano. Más recientemente, de Souza Ferreira et al. (2024), mediante un ensamble de ocho modelos CMIP6 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, asociados a niveles de emisiones intermedios y altos respectivamente, proyectaron aumentos de WPD de aproximadamente 25-50 % en sectores del nordeste y sur de Brasil. En contraste, se proyectaron disminuciones de WPD cercanas a un 30 % en sectores de Chile, particularmente en la zona Centro-Sur.

2.3.2 Acción del viento sobre estructuras

En el ámbito estructural, el viento debe ser tomado en cuenta ya que genera cargas dinámicas que provocan oscilaciones y vibraciones en edificaciones y otras obras civiles. En Chile la Norma NCh 432:2025 establece los procedimientos para determinar cargas de viento en edificios y otras estructuras (Instituto Nacional de Normalización, 2025). La norma define una velocidad básica mediante una zonificación del territorio nacional que considera diferentes latitudes y altitudes, dicha velocidad corresponde a una ráfaga de tres segundos asociada a un período de retorno de 50 años. De acuerdo con la Asociación de Ingenieros Civiles Estructurales (AICE, 2025) esta versión de la norma publicada en junio del 2025 representa una mejora respecto a su versión del 2010 ya que los datos son mucho más

representativos al contar con el triple de estaciones meteorológicas para determinar la velocidad del viento.

La acción del viento sobre una estructura se encuentra asociada a la presión ejercida por el flujo, la cual depende principalmente del cuadrado de la velocidad del viento y de factores relacionados con la exposición, topografía, elevación e importancia de la estructura. La NCh432:2025 establece el procedimiento para determinar estas acciones a partir de una velocidad básica y los correspondientes factores de modificación.

Como antecedente nacional, Ossandón (2008) determinó velocidades básicas en distintas localidades de Chile mediante análisis de valores extremos. Al comparar sus resultados con la antigua NCh432.Of71, concluyó que el uso de una única velocidad para todo el territorio no representaba adecuadamente la diversidad climática del país y podía subestimar las cargas en la zona Sur.

La eventual modificación de los vientos extremos bajo cambio climático también ha comenzado a incorporarse en normas internacionales. La norma australiana AS 1170.2-2021 introdujo un multiplicador de cambio climático, M_c , aplicado a la velocidad de viento del sitio para considerar posibles cambios en los extremos durante la vida útil de las estructuras. Actualmente, este factor adopta valores de 1,00 en la mayoría de las regiones y de 1,05 en determinadas regiones definidas por la norma (Standards Australia, 2021). Este antecedente evidencia la importancia de evaluar si los cambios futuros en las velocidades extremas podrían modificar las condiciones de diseño de las normas vigentes.

2.3.3 Altura significativa del oleaje

El oleaje superficial se origina por la transferencia de energía desde la atmósfera hacia la superficie del mar. Las fluctuaciones de presión y el esfuerzo cortante ejercido por el viento generan perturbaciones sobre el océano, las cuales aumentan de tamaño mientras el viento continúa aportando energía. La generación del oleaje se encuentra vinculada a la circulación atmosférica y a la presencia de sistemas meteorológicos como ciclones extratropicales y centros de baja presión, capaces de generar campos de viento intensos sobre extensas zonas oceánicas (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). De esta forma, las olas transportan parte de la energía eólica absorbida por el océano y pueden propagarse a grandes distancias hasta alcanzar la costa (Morales et al., 2019).

El oleaje presente en un punto puede dividirse conceptualmente en mar de viento y mar de fondo. El mar de viento corresponde a las olas generadas por el campo de viento local, mientras que el mar de fondo está formado por olas producidas en regiones lejanas que se propagan fuera de su área de generación. El desarrollo del mar de viento depende principalmente de la rapidez y duración del viento, de la longitud de la zona de generación del viento (Fetch) y de la profundidad. Durante su propagación hacia la costa, el oleaje puede además verse modificado por la batimetría, las corrientes y las condiciones del nivel del mar. En este último aspecto, la marea astronómica y las variaciones meteorológicas del nivel del mar pueden modificar la zona donde el oleaje rompe y la magnitud de sus efectos sobre la costa (Beyá et al., 2016).

Uno de los parámetros más utilizados para caracterizar el estado del mar corresponde a la altura significativa H_s , que se define como el promedio de las alturas del tercio más alto de las olas de un registro (e.g., Beyá et al., 2016). Métodos empíricos como los presentados en el *Shore Protection Manual* relacionan la altura y el período del oleaje con la rapidez del viento, el Fetch, la gravedad y la profundidad del agua (*U.S. Army Corps of Engineers*, 1984). Estas formulaciones permiten obtener aproximaciones del oleaje generado por viento cuando no se dispone de una modelación espectral completa.

En Chile, los registros instrumentales son escasos y presentan una cobertura espacial y temporal limitada. Para abordar esta limitación, el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016) generó una base de datos mediante un modelo espectral forzado con campos de viento del reanálisis ERA-Interim y calibrado utilizando mediciones de boyas y altimetría satelital. La base del Atlas cuenta con 35 años de información y permite caracterizar el clima operacional y extremo mediante parámetros como la altura

significativa, el período y la dirección del oleaje en nodos de aguas profundas distribuidos a lo largo de la costa continental e insular.

Las modificaciones futuras de los patrones atmosféricos pueden alterar la altura, el período y la dirección del oleaje. Cofré y Beyá (2016) identificaron una elevada dispersión entre las proyecciones disponibles para las costas chilenas, destacando la incertidumbre asociada a los modelos climáticos y de oleaje. Estudios posteriores estimaron que el clima medio podría experimentar cambios moderados, con ligeros aumentos de altura y período y un giro de la dirección hacia el sur, mientras que las marejadas podrían volverse más frecuentes e intensas, especialmente en la zona central del país (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

Estos cambios son relevantes para la operación portuaria, el diseño y mantenimiento de obras marítimas, y la seguridad de las actividades desarrolladas en el borde costero. En Chile, las marejadas han provocado cierres portuarios y daños sobre infraestructura, por lo que la evaluación de posibles variaciones futuras del oleaje representa un antecedente necesario para la planificación y adaptación costera (Morales et al., 2019; Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

3 Metodología

La metodología de esta investigación se estructura en tres etapas principales. En primer lugar, se procesan las simulaciones climáticas regionales WRF-SAAG para caracterizar el comportamiento histórico y futuro del viento a 10 metros de altura sobre Chile continental y el océano Pacífico adyacente, y cuantificar las variaciones entre ambos períodos. El procesamiento de los datos se realizó utilizando los recursos computacionales del Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC). En segundo lugar, se incorporan análisis estadísticos para evaluar la distribución y significancia de los cambios proyectados. Finalmente, se evalúan sus posibles efectos en tres aplicaciones de la Ingeniería Civil: potencial eólico, acción del viento sobre estructuras y generación de oleaje.

3.1 Datos utilizados y dominio de estudio

Para el análisis se utilizaron las simulaciones del modelo climático regional WRF-SAAG (Dominguez et al., 2024), desarrolladas mediante WRF v4.1.5 (Skamarock et al., 2019). Estas poseen una resolución horizontal aproximada de 4 km y una resolución temporal horaria, y sus resultados se encuentran almacenados en formato NetCDF. Se analizaron dos períodos de 22 años. El período histórico, denominado HIST, comprendió los años 2000–2021, mientras que el período futuro, denominado PGW, abarcó los años 2060–2081.

El dominio original de las simulaciones fue recortado para abarcar Chile continental y una porción del océano Pacífico adyacente, aproximadamente entre los 17° y 57° S y entre los 80° y 66° O. La inclusión del dominio marítimo permitió analizar las variaciones del viento sobre el océano y desarrollar posteriormente la aplicación asociada a la generación local de oleaje.

Las variables extraídas fueron las componentes horizontal zonal y meridional del viento a 10 m de altura, denominadas U_{10} y V_{10} , respectivamente. La componente U_{10} adopta valores positivos hacia el este y negativos hacia el oeste, mientras que V_{10} presenta valores positivos hacia el norte y negativos hacia el sur. Adicionalmente, se utilizaron las variables de latitud y longitud de la grilla para la representación espacial y la extracción de las series en puntos específicos.

Para complementar el análisis espacial, el dominio continental se dividió en cinco macrozonas latitudinales basadas en Gateño et al. (2024), como se muestra en la Figura 3:

- Norte Grande: 17°S - 26°S.
- Norte Chico: 26°S - 32°S.
- Centro: 32°S - 37°S.
- Sur: 37°S - 44°S.
- Austral: 44°S - 56°S.

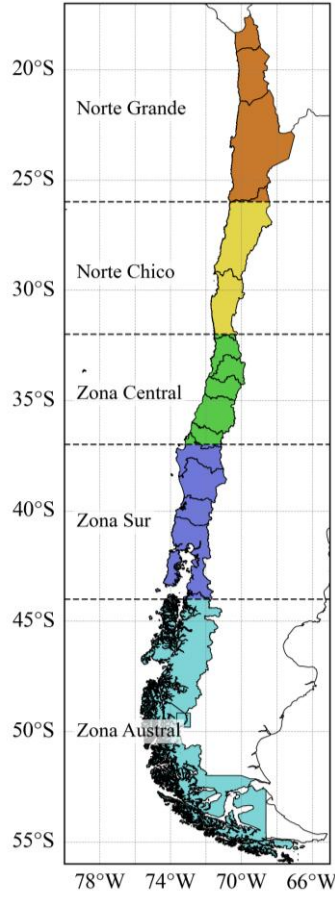


Figura 3: Dominio de estudio y macrozonas utilizadas para el análisis.

3.2 Procesamiento de datos y variaciones del viento

A partir de las componentes U_{10} y V_{10} se calculó la rapidez horaria del viento en cada celda del dominio mediante la ecuación 3:

$$W = \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2} \quad (3)$$

Donde W corresponde a la rapidez del viento a 10 metros de altura, expresada en m/s. A partir de las series horarias se obtuvieron, para cada mes y celda, la rapidez media mensual y la rapidez máxima mensual. Para la rapidez media se calcularon también las componentes medias U_{10} y V_{10} para representar la dirección predominante del viento, mientras que para la rapidez máxima se conservaron las componentes correspondientes al instante en que ocurrió dicho máximo.

A partir de estas series se calcularon climatologías anuales y estacionales para HIST y PGW, considerando verano, otoño, invierno y primavera. Para la rapidez media, las climatologías corresponden al promedio de las medias mensuales del período analizado. Para la rapidez máxima, se seleccionó primero el máximo anual o estacional de cada año y celda, según correspondiera, y posteriormente se promediaron los 22 valores obtenidos.

Para cuantificar las variaciones de viento se calculó la diferencia entre las climatologías futura e histórica con la ecuación 4:

$$\Delta W = W_{PGW} - W_{HIST} \quad (4)$$

Donde ΔW corresponde al cambio absoluto de rapidez de viento [m/s], W_{PGW} corresponde a la climatología futura [m/s] y W_{HIST} corresponde a la climatología histórica. Los valores positivos indican un aumento bajo el escenario PGW y los valores negativos representan una disminución.

3.3 Evaluación estadística de los cambios

Para determinar si las diferencias entre los períodos HIST y PGW corresponden a cambios estadísticamente significativos, se aplicó el test de rangos con signo de Wilcoxon, una prueba no paramétrica que considera el signo y la magnitud de las diferencias y que no exige asumir normalidad (Hollander et al., 2014). El test se aplicó de manera independiente en cada píxel a las series anuales y estacionales de rapidez media y rapidez máxima del viento, emparejando los 22 años de ambos períodos, es decir, 2000 con 2060, 2001 con 2061 y así sucesivamente.

La hipótesis nula establece que las diferencias entre las muestras se encuentran centradas en cero. Se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo que para valores $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula y se considera el cambio como estadísticamente significativo (Wilcoxon, 1945). Los resultados se representaron mediante zonas achuradas sobre los mapas de variación, de esta forma se puede observar simultáneamente la magnitud del cambio junto con la significancia estadística del mismo.

De manera complementaria, se analizó la distribución de la rapidez máxima mensual en las cinco macrozonas definidas previamente. Para cada mes y macrozona se consideraron los valores de rapidez máxima mensual de todos los píxeles y se calcularon dos indicadores representativos: la media y el percentil 95 (P95). De esta forma, para cada indicador se obtuvieron 264 valores por período, correspondientes a los 12 meses de los 22 años analizados.

La media espacial permite caracterizar el comportamiento promedio de los máximos mensuales dentro de cada macrozona, mientras que el P95 representa el valor bajo el cual se encuentra el 95 % de los píxeles. Se utilizó este percentil en lugar del máximo espacial absoluto debido a que este último puede estar condicionado por uno o pocos píxeles y, por tanto, resultar poco representativo del comportamiento de la macrozona.

Los valores obtenidos para HIST y PGW se representaron mediante histogramas de frecuencia porcentual utilizando intervalos comunes para ambos períodos. Como complemento, se incorporó una curva de estimación de densidad por Kernel Gaussiano (KDE), para suavizar la distribución y facilitar la comprensión entre períodos (Węglarczyk, 2018). Asimismo, se compararon la media y la desviación estándar de ambas distribuciones para identificar posibles desplazamientos y cambios en su dispersión.

3.4 Aplicaciones del viento en la Ingeniería Civil

3.4.1 Potencial eólico

El recurso eólico se evaluó mediante la densidad de potencia eólica (WPD), calculada a partir de la rapidez horaria del viento a 10 metros de altura mediante:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho W^3 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

Donde WPD corresponde a la densidad de potencia eólica, W a la rapidez del viento a 10 metros de altura [m/s] y ρ a la densidad del aire [kg/m^3]. En esta investigación se adoptó una densidad constante de $\rho = 1,225 [kg/m^3]$, como simplificación para la comparación entre los períodos HIST y PGW (e.g., Martínez e Iglesias, 2024).

Debido a la dependencia cúbica de la WPD respecto de la rapidez del viento, el cálculo se realizó directamente a partir de los valores horarios de rapidez. Posteriormente, se calcularon climatologías anuales y estacionales de WPD para los períodos HIST y PGW y se determinaron sus diferencias absolutas y porcentuales.

3.4.2 Acción del viento sobre estructuras

En primer lugar, se seleccionó como caso de estudio un punto ubicado en la Región de Atacama, aproximadamente a 60 km al noreste de Copiapó. La selección se realizó a partir de las zonas donde la variación de rapidez máxima anual mostró aumentos relevantes bajo el escenario PGW, priorizando un emplazamiento con infraestructura de interés para la aplicación estructural. En el punto seleccionado se extrajo la serie de máximos anuales para HIST y PGW, seleccionando para cada año el mayor valor entre los máximos mensuales disponibles. De esta forma, se obtuvieron 22 valores para cada período.

Para estimar velocidades asociadas a períodos de retorno, las series de máximos anuales se ajustaron a una distribución de Gumbel (Gumbel, 1958). Previamente, se evaluó la compatibilidad de las series con esta distribución mediante las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado, aplicadas de forma independiente a HIST y PGW con un nivel de significancia de 5 %.

Una vez verificada la compatibilidad de las series con la distribución de Gumbel, esta se ajustó mediante el método de los momentos (USACE, 1993), siguiendo el criterio adoptado por Ossandón (2008). Los parámetros de ubicación y escala se estimaron a partir de la media y desviación estándar de cada serie. Con estos parámetros, la velocidad asociada a un período de retorno T se calculó mediante:

$$V_T = \mu - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

En particular, se calculó la velocidad asociada a un período de retorno de 50 años para los períodos HIST y PGW, por corresponder al período de referencia considerado para la velocidad básica en la NCh432:2025.

Debido a que las series utilizadas contienen 22 máximos anuales y la estimación de V_{50} corresponde a una extrapolación más allá del rango empírico de los datos, se incorporó un análisis de incertidumbre. Para ello se calcularon intervalos de confianza para la velocidad de retorno utilizando el error estándar de estimación de la distribución de Gumbel (USACE, 1993).

$$SE(V_T) = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + 1,14K_T + 1,10K_T^2} \quad (7)$$

Donde s corresponde a la desviación estándar de la muestra, n al número de datos y K_T al factor de frecuencia de Gumbel, obtenido a partir de la velocidad de retorno, la media y la desviación estándar de la serie.

A partir del error estándar, se construyeron intervalos de confianza del 95 %. Así, los límites inferior y superior para la velocidad de retorno se obtuvieron mediante:

$$V_T^{\text{inf}} = V_T - 1,96SE(V_T) \quad (8)$$

$$V_T^{\text{sup}} = V_T + 1,96SE(V_T) \quad (9)$$

El procedimiento se aplicó tanto para HIST como para PGW, obteniéndose una estimación central y sus respectivos límites inferior y superior. Para caracterizar la sensibilidad del cambio proyectado se compararon los límites equivalentes de ambos períodos, es decir, el límite inferior de PGW con el límite inferior de HIST y el límite superior de PGW con el límite superior de HIST.

Una vez estimadas las velocidades de retorno y su incertidumbre, se definió el factor relativo R_{50} , utilizado para transferir a los valores normativos el cambio proporcional proyectado por WRF-SAAG. Dicho procedimiento se aplicó también a los límites equivalentes de los intervalos de confianza.

$$R_{50} = \frac{V_{50}^{PGW}}{V_{50}^{HIST}} \quad (10)$$

Finalmente, para el emplazamiento analizado se identificó la zona correspondiente de la NCh432:2025 y se obtuvo de la Tabla 1 la velocidad básica. El efecto del cambio proyectado se incorporó multiplicando esta velocidad por el factor R_{50} .

Tabla 1: Zonificación y valores para velocidad básica de viento en cada zona. (NCh432:2025, Instituto Nacional de Normalización, 2025).

Zona	Latitud Sur	Altitud msnm	V m/s	p_0 N/m ²	Designación
I-A	17°29'S-27°22'S	< 2 000	27	447	Límite Norte hasta Copiapó
I-B	17°29'S-27°22'S	≥ 2 000	30	552	
II-A	27°22'S-29°54'S	< 1 500	27	447	Zona Centro
II-B	27°22'S-29°54'S	≥ 1 500	35	751	
III-A	29°54'S-37°28'S	< 1 000	34	709	Zona Sur
III-B	29°54'S-37°28'S	≥ 1 000	35	751	
IV-A	37°28'S-41°28'S	< 600	37	839	Zona Sur hasta Chiloé
IV-B	37°28'S-41°28'S	≥ 600	40	981	
V	41°28'S-50°S	-	40	981	Zona Austral
VI	50°S-56°32'S	-	44	1 187	
NC1	-	-	32	628	Isla de Pascua
NC2	-	-	50	1 533	Juan Fernández
NC3	-	-	60	2 207	Antártica CL

NOTA 1) p_0 , corresponde a un valor de presión referencial que considera la evaluación de q_z de acuerdo con 5.8 adoptando K_z , K_{zt} y K_e iguales a 1.0.

De esta forma, no se utiliza directamente la magnitud de las velocidades obtenidas mediante WRF-SAAG como velocidad de diseño, sino únicamente su cambio relativo entre HIST y PGW. Esto resulta relevante debido a que las velocidades máximas de WRF-SAAG corresponden a valores horarios a 10 m de altura, mientras que la velocidad básica de la NCh432:2025 corresponde a una ráfaga de tres segundos.

A partir de las velocidades básicas se calculó además la presión de referencia utilizada en diseño estructural, usando la expresión de presión de velocidad establecida en la NCh432:2025:

$$q_z = 0.613 I K_z K_{zt} K_e V^2 \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (11)$$

- q_z : presión de velocidad en la altura z [N/m²].
- I : factor de importancia según categoría de ocupación.
- K_z : coeficiente de exposición.
- K_{zt} : factor topográfico.
- K_e : factor de elevación de terreno.
- V : velocidad del viento [m/s].

De acuerdo con el criterio indicado en la Nota 1 al pie de la Tabla 1, las presiones de referencia asociadas a las velocidades básicas se obtienen considerando unitarios los factores K_z , K_{zt} y K_e . Por su parte, el factor de importancia I se adopta igual a 1 de acuerdo con la categoría de la estructura considerada según la norma, reduciéndose la expresión de presión a:

$$p_0 = 0.613 V^2 \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (12)$$

De esta forma, para cada caso de sensibilidad se obtuvo una velocidad básica ajustada y su correspondiente presión de referencia. Por lo tanto, el análisis busca evaluar la sensibilidad de los parámetros de referencia de la NCh432:2025 frente a posibles cambios futuros de los extremos de viento y no determinar directamente nuevas velocidades normativas de diseño.

3.4.3 Análisis de la altura significativa del oleaje

Para evaluar el efecto de las variaciones proyectadas del viento sobre el oleaje, se estimó la altura significativa de oleaje H_s mediante las formulaciones empíricas para aguas profundas del *Shore Protection Manual* (USACE, 1984). La aplicación se realizó en 19 nodos de aguas profundas del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016), cuyas profundidades son superiores a 1600 metros. La ubicación de los nodos considerados en el análisis se presenta en la Figura 4.

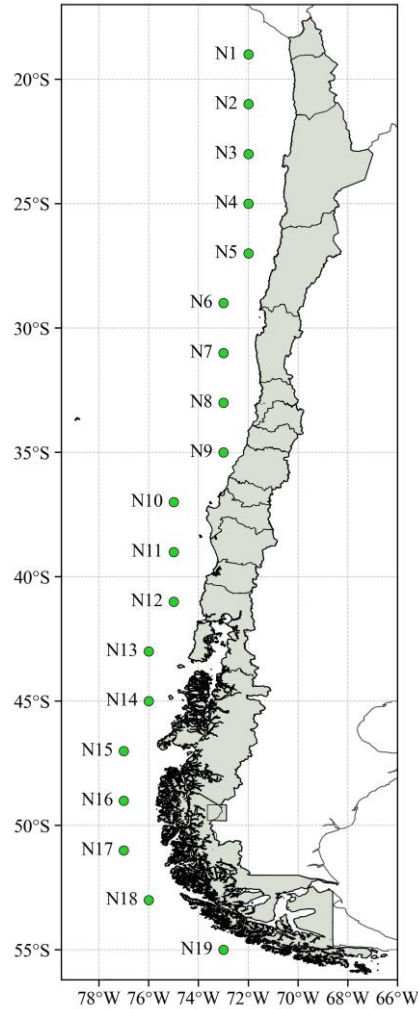


Figura 4: Ubicación de los 19 nodos de aguas profundas del Atlas de Oleaje de Chile.

A partir de la rapidez horaria del viento obtenida de WRF-SAAG, se calculó el factor de esfuerzo del viento U_A mediante:

$$U_A = 0,71U^{1,23} \quad (13)$$

- U : rapidez del viento a 10 metros de altura [m/s].
- U_A : factor de viento ajustado [m/s].

Para la condición de crecimiento limitado por Fetch, la altura significativa se calculó mediante:

$$H_{S,F} = 5,112 \cdot 10^{-4} U_A L_F^{1/2} \quad (14)$$

- $H_{S,F}$: altura significativa del oleaje limitada por Fetch [m].
- U_A : factor de viento ajustado [m/s].
- L_F : Fetch efectivo [m].

Asimismo, se calculó la altura correspondiente a la condición de oleaje totalmente desarrollado:

$$H_{S,FD} = 2,482 \cdot 10^{-2} U_A^2 \quad (15)$$

El SPM establece que el crecimiento limitado por Fetch no debe superar la condición de oleaje totalmente desarrollado. Por ello, para cada registro horario se adoptó como altura significativa el menor valor entre ambas estimaciones:

$$H_S = \min(H_{S,F}, H_{S,FD}) \quad (16)$$

De esta forma, el cálculo considera el crecimiento del oleaje asociado al Fetch disponible y lo restringe por la condición de máximo desarrollo correspondiente a la velocidad del viento.

El Fetch efectivo fue estimado de forma geométrica, de acuerdo con el método propuesto por el *Shore Protection Manual* para cada sector direccional (USACE, 1984). Para esto, se trazaron nueve rectas radiales separadas a intervalos de 3° en torno a la dirección media de actuación del viento generador. La longitud del Fetch efectivo corresponde a la media aritmética de la longitud de estas rectas.

Las coordenadas geográficas y profundidades de los 19 nodos analizados se presentan en la Tabla 2, estas últimas permiten verificar la condición de aguas profundas.

Tabla 2: Características de los nodos de aguas profundas.

Nodo	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [m]	Localidad cercana
N1	-19	-72	5181	Arica
N2	-21	-72	4191	Iquique
N3	-23	-72	4455	Mejillones
N4	-25	-72	4685	Taltal
N5	-27	-72	5178	Bahía Inglesa
N6	-29	-73	4395	Huasco
N7	-31	-73	4750	Tongoy
N8	-33	-73	4515	Valparaíso
N9	-35	-73	1792	Constitución
N10	-37	-75	4404	Talcahuano
N11	-39	-75	3825	Puerto Saavedra
N12	-41	-75	2464	Bahía Mansa
N13	-43	-76	3612	Chiloé

Nodo	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [m]	Localidad cercana
N14	-45	-76	2633	Archipiélago de Los Chonos
N15	-47	-77	3346	Golfo de Penas
N16	-49	-77	3293	Isla Esmeralda
N17	-51	-77	3798	Isla Diego de Almagro
N18	-53	-76	2903	Isla Contreras
N19	-55	-73	1625	Isla London

Para cada nodo se identificó el píxel más cercano de la grilla del modelo WRF, a partir de sus coordenadas geográficas. Desde dicho píxel se extrajeron las series temporales de las componentes horizontales del viento a 10 metros de altura, U_{10} y V_{10} , para los períodos HIST y PGW. Posteriormente, se calculó la rapidez del viento de acuerdo con la ecuación 3.

Además, se determinó la dirección meteorológica del viento, definida como la dirección desde donde proviene el flujo, siguiendo la convención 0° norte, 90° este, 180° sur y 270° oeste. Cada registro temporal fue clasificado en uno de ocho sectores direccionales: N, NE, E, SE, S, SO, O y NO.

Para cada nodo se calculó un Fetch asociado a cada uno de estos sectores. De esta forma, a cada registro temporal se le asignó el valor de Fetch correspondiente al sector de procedencia del viento. A partir de la rapidez del viento se calculó U_A y junto con el Fetch se obtuvieron $H_{S,F}$ y $H_{S,FD}$, adoptando como altura significativa el menor valor entre ambas estimaciones.

Este procedimiento permitió obtener series temporales de H_S para los 19 nodos, tanto para HIST como para PGW. A partir de estas series se calculó la altura significativa media para cada período y su diferencia.

Para evaluar el comportamiento de la estimación histórica, las series mensuales de H_S obtenidas se compararon con las correspondientes del Atlas de Oleaje de Chile utilizando los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson. El análisis se realizó para los 19 nodos, considerando únicamente el período temporal común entre ambas series. El coeficiente de Pearson evalúa el grado de asociación lineal entre las series, mientras que el coeficiente de Spearman evalúa su asociación monótona a partir del orden de los valores. Ambos coeficientes varían entre -1 y 1, donde valores positivos cercanos a 1 indican una asociación positiva elevada, valores cercanos a -1 una asociación inversa y valores próximos a cero una baja asociación (Pearson, 1895; Spearman, 1904).

Considerando los cambios proyectados de H_S y los coeficientes de correlación obtenidos respecto del Atlas, se seleccionaron dos nodos representativos para realizar un análisis más detallado. En los nodos seleccionados se analizaron las climatologías mensuales de la altura significativa para el Atlas, HIST y PGW, junto con los cambios mensuales entre ambos períodos. Adicionalmente, se evaluó la distribución direccional del viento, identificando los sectores predominantes y sus cambios de frecuencia entre ambos períodos.

Cabe señalar que la metodología utilizada corresponde a una estimación simplificada del oleaje generado por viento en aguas profundas, basada principalmente en la rapidez del viento y el Fetch efectivo. En adelante, esta metodología se denominará WRF-SPM. El procedimiento no incorpora explícitamente procesos asociados al mar de fondo ni a la propagación e interacción espectral del oleaje.

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento y análisis de las simulaciones WRF-SAAG para los períodos histórico y futuro. En primer lugar, se caracteriza el comportamiento espacial y estacional de la rapidez media y máxima del viento, junto con los cambios proyectados entre ambos períodos y su significancia estadística. Posteriormente, se analiza la distribución de la rapidez máxima mensual en las cinco macrozonas definidas, con el fin de complementar la identificación de sectores con aumentos o disminuciones relevantes. Finalmente, se presentan los resultados correspondientes a las tres aplicaciones de la Ingeniería Civil consideradas en esta investigación: potencial eólico, acción del viento sobre estructuras y generación de oleaje.

4.1 Caracterización general del viento histórico y futuro

En la Figura 5 se observa la climatología anual de la rapidez media. En términos generales, el patrón espacial del viento mantiene una estructura similar entre ambos períodos, con valores de rapidez media aproximadamente de 2 a 6 m/s sobre gran parte del territorio continental. Sin embargo, en sectores cordilleranos del Norte Grande y Norte Chico se observan valores localmente superiores, del orden de 10 a 12 m/s, mientras que en la zona Austral se alcanzan valores cercanos o superiores a 15 m/s. Sobre el océano Pacífico y sectores costeros, la rapidez media del viento presenta un aumento progresivo de norte a sur, con valores cercanos a 6 m/s en los mares adyacentes al norte del país y del orden de 10 a 12 m/s hacia el extremo austral.

La diferencia entre PGW e HIST (Figura 5c) evidencia que los cambios proyectados no son espacialmente uniformes. En el norte y en sectores cordilleranos predominan aumentos de aproximadamente 0,25 a 0,75 m/s, observándose los mayores aumentos cercanos a 1 m/s en zonas cordilleranas de la región de Atacama entre 25°S y 30°S. En contraste, hacia las zonas Sur y Austral predominan las disminuciones del orden de -0,25 a -0,75 m/s con sectores donde estas se aproximan a -1 m/s. En gran parte de la zona central los cambios presentan una magnitud menor cercana a $\pm 0,25$ m/s. Los vectores de diferencia muestran cambios en las componentes del viento, con una orientación predominante hacia el norte y noroeste en las zonas Norte y Centro, y hacia el oeste y noroeste en las zonas Sur y Austral. Estas variaciones se concentran principalmente en amplios sectores adyacentes a la costa y en gran parte del territorio continental, donde los cambios resultan estadísticamente significativos.

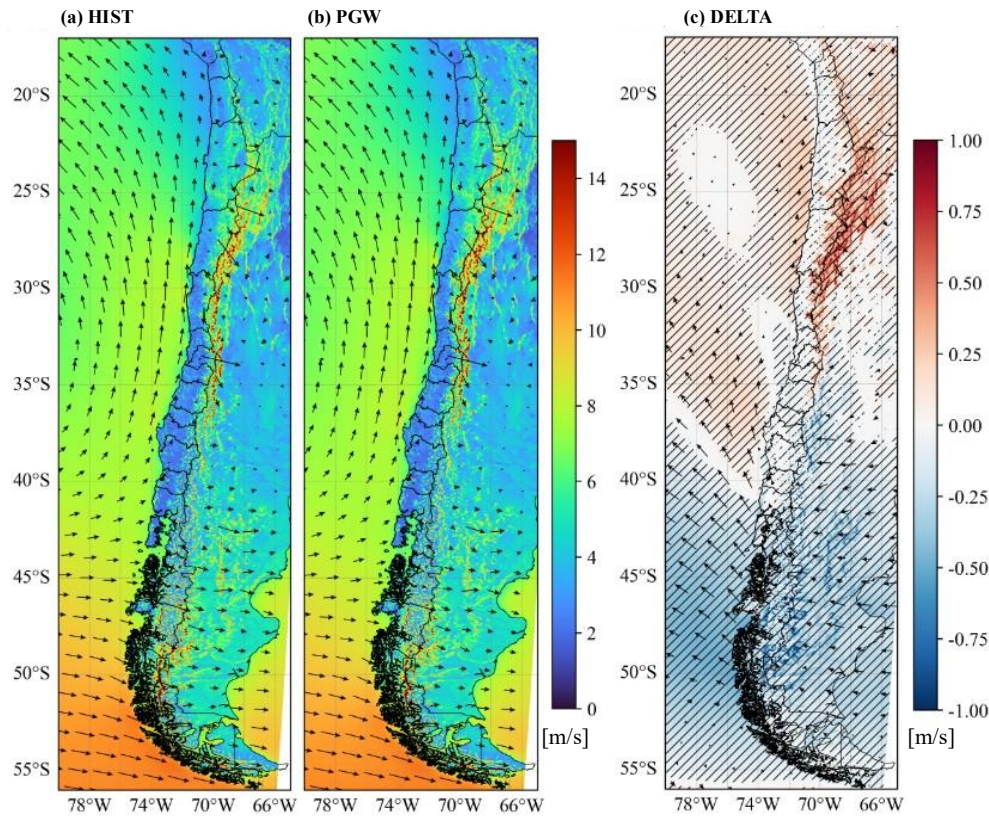


Figura 5: Climatología anual de rapidez media del viento a 10 m de altura para los períodos HIST (a), PGW (b) y diferencia PGW-HIST (c). Los vectores indican la dirección del viento y el achurado en (c) indica las zonas donde el cambio es estadísticamente significativo según Wilcoxon.

En la Figura 6 se presenta la climatología anual de la rapidez máxima del viento. Al igual que para la rapidez media, el patrón espacial se mantiene bastante similar entre ambos períodos. Sobre el territorio continental se observan velocidades máximas cercanas a los 10 m/s en sectores de la zona Sur y en el extremo norte del país, mientras que, en sectores cordilleranos del Norte Grande, Norte Chico y distintos sectores de la zona Austral se alcanzan valores del orden de 25 a 30 m/s. Sobre el océano Pacífico, la rapidez máxima aumenta progresivamente de norte a sur, con valores aproximados de 10 a 15 m/s frente a la zona norte, de 17 a 22 m/s frente a la zona central y de 25 a 30 m/s frente a la costa de la zona Austral.

Respecto a la diferencia entre PGW e HIST (Figura 6c), los mayores aumentos se concentran nuevamente en sectores cordilleranos entre aproximadamente 25°S y 30°S, donde predominan incrementos de 1,0 a 1,5 m/s, y localmente se alcanzan valores cercanos a 2 m/s. Hacia la zona central se observa una transición, con aumentos y disminuciones dentro del rango de $\pm 0,5$ m/s. En contraste, hacia la zona Sur predominan las disminuciones de -0,5 y -1,0 m/s sobre gran parte del territorio continental, alcanzando valores cercanos a los -2 m/s sobre sectores adyacentes del océano, particularmente hacia la zona Austral. A diferencia de la rapidez media, en este caso no se representan vectores de dirección, ya que los máximos anuales pueden ocurrir en distintos instantes y estar asociados a diferentes direcciones del viento, por lo que una dirección promedio no necesariamente resultaría representativa.

La significancia estadística de los cambios en la rapidez máxima anual es limitada y se concentra en sectores puntuales del dominio. Tanto en el territorio continental como en el océano, el achurado es escaso y discontinuo, por lo que gran parte de las variaciones proyectadas no presenta significancia estadística.

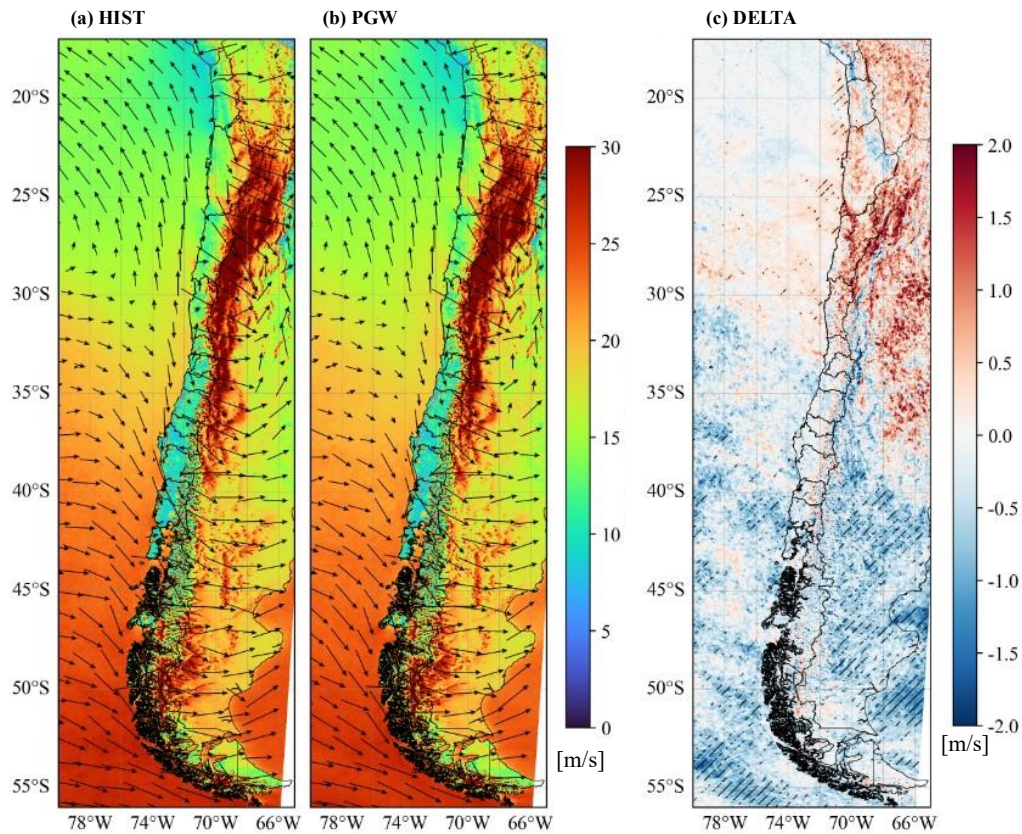


Figura 6: Climatología anual de rapidez máxima del viento a 10 m de altura para los períodos HIST (a), PGW (b) y diferencia PGW-HIST (c). El achurado en (c) indica las zonas donde el cambio es estadísticamente significativo según Wilcoxon.

4.2 Variaciones estacionales de la rapidez media y máxima

La Figura 7 presenta las diferencias estacionales de la rapidez media entre PGW e HIST. En términos generales, las cuatro estaciones mantienen el patrón observado a escala anual, con aumentos predominantes hacia el norte y sectores cordilleranos, y disminuciones hacia las zonas Sur y Austral, aunque la magnitud y extensión de las variaciones cambian a lo largo del año.

Durante el verano (Figura 7a) y otoño (Figura 7b) se observan comportamientos bastante similares, los principales aumentos se concentran en sectores cordilleranos del Norte Chico, aproximadamente entre 26°S y 32°S, con incrementos del orden de 0,25 a 0,50 m/s. En contraste, desde aproximadamente 40°S hacia el sur predominan disminuciones entre -0,25 y -0,75 m/s, particularmente sobre el océano Pacífico y la zona Austral. En ambas estaciones, la zona central presenta variaciones de menor magnitud, generalmente dentro de $\pm 0,25$ m/s, a excepción de aislados sectores cordilleranos donde se observan aumentos de 0,5 m/s.

En invierno (Figura 7c), los aumentos en la rapidez media presentan una mayor extensión espacial en la zona Norte. En sectores cordilleranos, aproximadamente entre 20°S y 32°S, se observan incrementos del orden de 0,5 a 1,0 m/s, mientras que sobre el océano Pacífico se aprecia un aumento continuo frente a gran parte de la zona Norte y parte de la zona Central. En contraste, hacia las zonas Sur y Austral predominan disminuciones tanto sobre el océano como sobre el territorio continental, con valores del orden de -0,25 a -0,75 m/s.

Durante la primavera (Figura 7d) se mantiene, en términos generales, el patrón observado en invierno, aunque las variaciones sobre el océano Pacífico presentan una magnitud levemente mayor, tanto para los aumentos como para las disminuciones, alcanzando valores cercanos a $\pm 0,75$ m/s. En sectores cordilleranos del Norte Chico se observa además una mayor extensión de áreas con aumentos cercanos

a 1,0 m/s, mientras que las reducciones más evidentes se concentran en la zona Austral, con valores del orden de $-0,25$ a $-0,75$ m/s.

El achurado muestra que una parte importante de las variaciones estacionales de la rapidez media presenta significancia estadística. Las zonas significativas se observan principalmente sobre amplios sectores del océano Pacífico y en áreas del territorio continental, coincidiendo tanto con los aumentos proyectados hacia el norte como con las disminuciones hacia el sur. En contraste, en la zona de transición entre ambos patrones el achurado tiende a ser menos continuo.

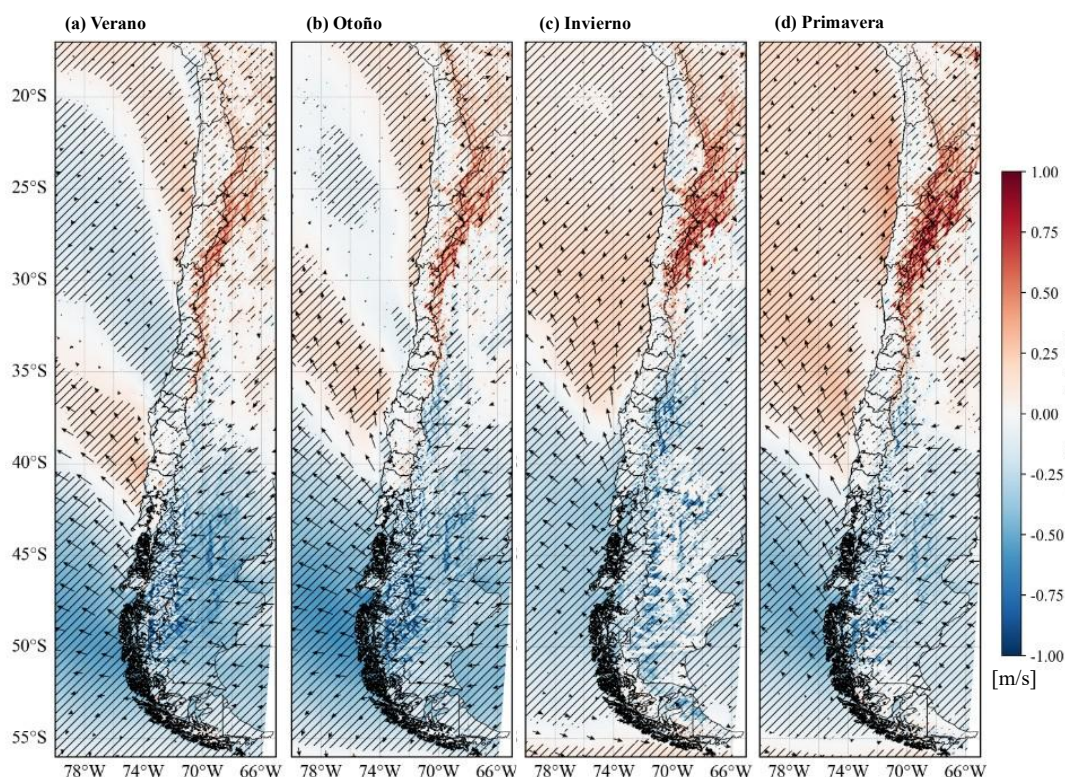


Figura 7: Variación estacional de la rapidez media del viento entre PGW e HIST. Verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

La Figura 8 presenta las diferencias estacionales de la rapidez máxima entre PGW e HIST. En términos generales, las cuatro estaciones mantienen un patrón similar al observado a escala anual, sin embargo, la magnitud y extensión espacial de estas variaciones cambian entre estaciones.

Durante el verano (Figura 8a), los mayores aumentos se concentran en sectores cordilleranos del Norte Chico, aproximadamente entre 25°S y 32°S , con incrementos del orden de 1,5 a 2,0 m/s. En sectores cordilleranos de la zona central también se observan aumentos cercanos a 1,5 m/s. En contraste, hacia las zonas Sur y Austral predominan las disminuciones, tanto sobre el territorio continental como sobre el océano Pacífico, con valores entre $-0,5$ y $-1,5$ m/s. En otoño (Figura 8b), los aumentos presentan una distribución más homogénea y se extienden desde el Norte Grande y Norte Chico hacia sectores cordilleranos de la zona central e incluso parte de la zona Sur, con valores generalmente entre 1,0 y 1,5 m/s. Hacia la zona Austral predominan las disminuciones, con valores cercanos a $-1,0$ m/s sobre el continente y entre $-1,5$ y $-2,0$ m/s sobre el océano adyacente.

En invierno (Figura 8c), los mayores aumentos vuelven a concentrarse en el Norte Chico, aproximadamente entre 25°S y 30°S , con valores entre 1,5 y 2,0 m/s. En la zona central se observa una transición caracterizada por aumentos y disminuciones de menor magnitud, dentro del rango de $\pm 0,5$ m/s. Hacia las zonas Sur y Austral predominan las disminuciones, aunque con una distribución más heterogénea que en otoño, alcanzando valores del orden de $-0,5$ a $-1,0$ m/s sobre parte del territorio

continental y del océano adyacente. Durante la primavera (Figura 8d), se mantiene el patrón general de aumentos en sectores cordilleranos del norte y disminuciones hacia las zonas Sur y Austral, tanto sobre el continente como sobre el océano Pacífico, aunque con una magnitud menor que en las estaciones anteriores, con variaciones que en general no superan $\pm 1,0$ m/s.

A diferencia de la rapidez media, en este caso no se representan vectores de dirección, ya que los máximos estacionales pueden ocurrir en distintos instantes y estar asociados a diferentes direcciones del viento, por lo que una dirección promedio no resultaría necesariamente representativa de estos eventos.

La significancia estadística de los cambios en la rapidez máxima estacional es, en general, más limitada que en el caso de la rapidez media. Las áreas significativas se concentran principalmente sobre el océano Pacífico y en sectores australes, donde coinciden con las disminuciones proyectadas de mayor magnitud, mientras que en el norte del país aparecen sectores puntuales con significancia asociados a los aumentos cordilleranos.

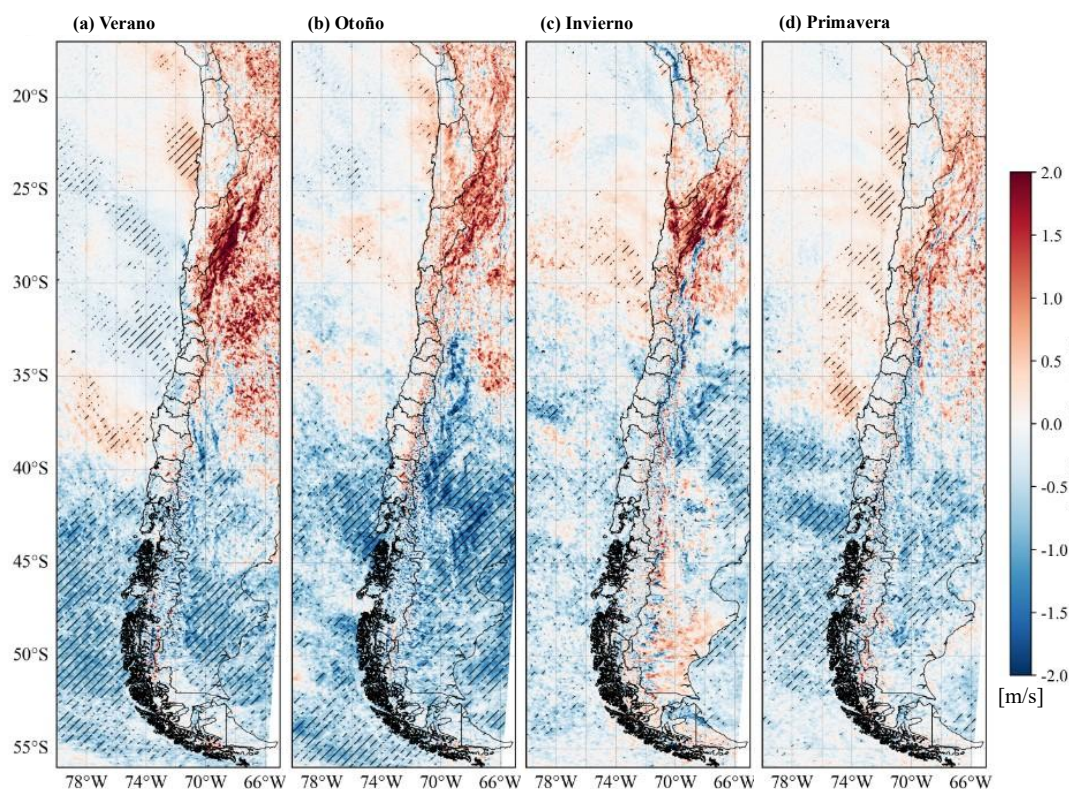


Figura 8: Variación estacional de la rapidez máxima del viento entre PGW e HIST. Verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

4.3 Análisis de frecuencia del viento máximo

Para complementar el análisis espacial de la rapidez máxima del viento, se compararon las distribuciones de la media espacial y del percentil 95 (P95) de la rapidez máxima mensual en las cinco macrozonas para los períodos HIST y PGW.

Para el Norte Grande (Figuras 9a, b) se observa un desplazamiento hacia valores mayores bajo PGW en ambas métricas, aunque este es más evidente para el P95. En la media espacial, las líneas verticales correspondientes a HIST y PGW presentan una separación reducida, consistente con un aumento leve de la media de 0,12 m/s. En cambio, para el P95 se aprecia una mayor separación entre ambas distribuciones, junto con un incremento de la media de 0,42 m/s. Además, la curva KDE de PGW muestra una mayor frecuencia relativa de valores elevados, particularmente en torno a velocidades cercanas a 25 m/s.

Los mayores aumentos entre las macrozonas analizadas se presentan en el Norte Chico (Figuras 9c, d). La media espacial aumenta 0,32 m/s, mientras que el P95 presenta un incremento aún mayor, de 0,81 m/s. En ambas métricas se observa además un desplazamiento de las distribuciones hacia valores mayores bajo el escenario PGW, lo que también se refleja en el comportamiento de las curvas KDE, las cuales muestran una mayor frecuencia relativa asociada a velocidades más altas.

En la zona Central (Figuras 9e, f), las diferencias entre ambos períodos son reducidas, ya que el cambio en la media de ambas métricas es pequeño. La media espacial presenta una disminución de 0,02 m/s, mientras que el P95 aumenta 0,06 m/s. No obstante, la distribución del P95 presenta la mayor variación en su dispersión entre las macrozonas, con una disminución de 0,23 m/s en la desviación estándar bajo PGW.

Hacia la zona Sur (Figuras 9g, h), el comportamiento cambia de signo respecto de las macrozonas del norte. La media espacial disminuye 0,20 m/s bajo PGW, mientras que el P95 muestra una reducción mayor, de 0,51 m/s. Los cambios en la dispersión son pequeños para ambas métricas. Sin embargo, en el histograma del P95, la curva KDE de PGW muestra una menor frecuencia relativa en el rango de velocidades altas.

Este patrón de disminución se mantiene en la zona Austral (Figuras 9i, j), donde la media espacial disminuye 0,29 m/s y el P95 disminuye 0,36 m/s bajo PGW. A pesar de estas reducciones, esta macrozona presenta los valores más altos de rapidez máxima mensual entre las macrozonas analizadas, con promedios cercanos a 16 m/s para la media espacial y próximos a 30 m/s para el P95.

En conjunto, los histogramas muestran aumentos de la rapidez máxima mensual en el Norte Grande y Norte Chico, siendo esta última la macrozona con los mayores incrementos. La zona Central presenta las menores variaciones, mientras que en las zonas Sur y Austral predominan disminuciones. En el Norte Grande, Norte Chico y Sur, las diferencias entre HIST y PGW son de mayor magnitud para el P95 que para la media espacial.

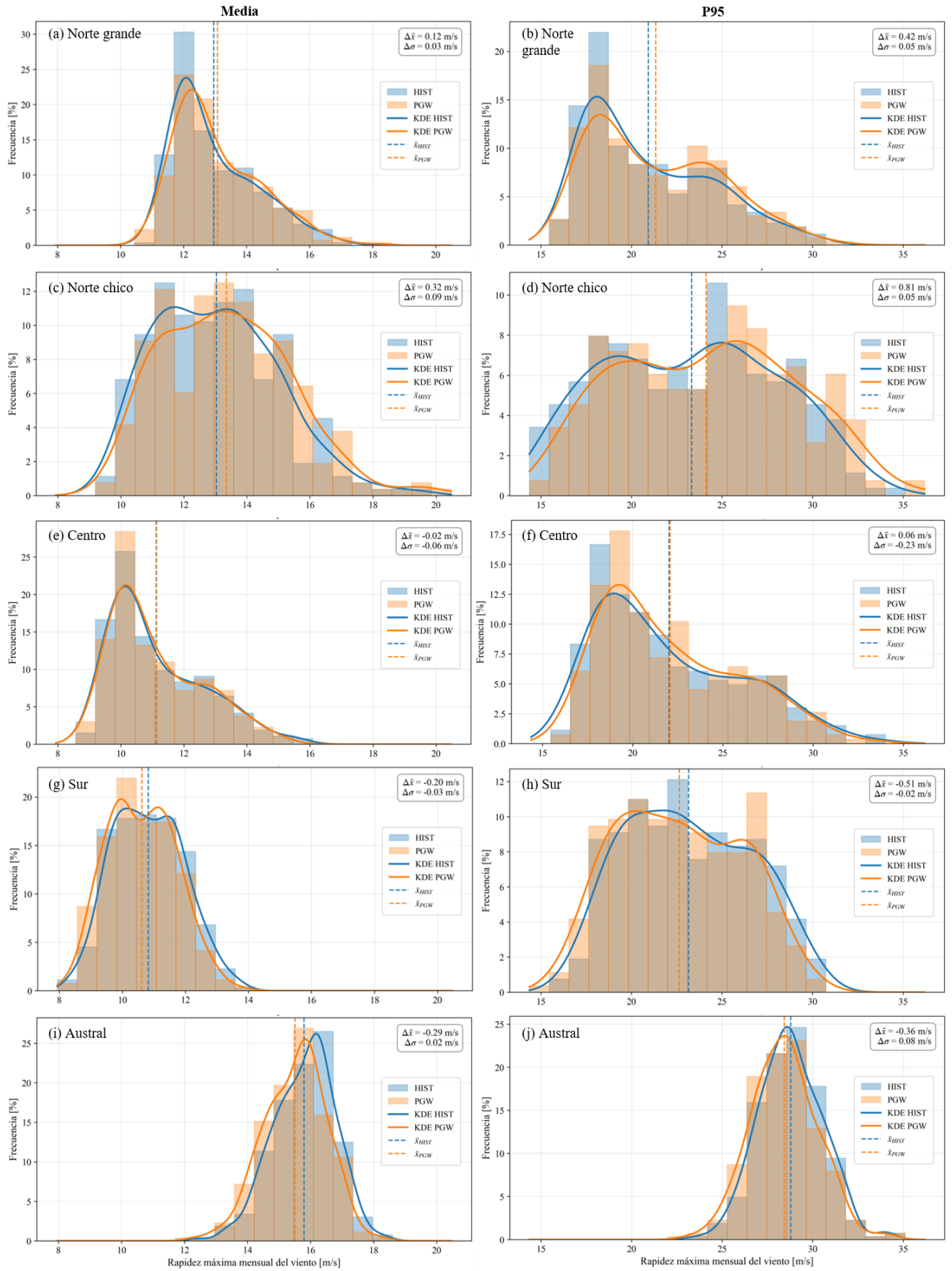


Figura 9: Distribución de la rapidez máxima mensual del viento para los períodos HIST y PGW en las cinco macrozonas. Los paneles de la izquierda muestran la media espacial y los de la derecha el percentil 95: Norte Grande (a, b), Norte Chico (c, d), Centro (e, f), Sur (g, h) y Austral (i, j). Las barras representan la frecuencia porcentual, las curvas KDE corresponden a una estimación suavizada de cada distribución y las líneas verticales discontinuas indican el valor medio para HIST y PGW. El recuadro superior derecho muestra la diferencia entre períodos de la media de la distribución y de su desviación estándar.

4.4 Potencial eólico

A partir de las simulaciones de rapidez del viento se evaluaron las variaciones proyectadas de la densidad de potencia eólica (WPD), con el objetivo de identificar cambios en la disponibilidad relativa del recurso eólico entre los períodos HIST y PGW.

La climatología anual de WPD y sus diferencias absoluta y porcentual se presentan en la Figura 10. En los períodos HIST (Figura 10a) y PGW (Figura 10b) se mantiene una distribución espacial similar, con valores relativamente bajos sobre gran parte del territorio continental y mayores magnitudes en sectores cordilleranos y hacia el extremo austral del dominio. En el Norte Grande y Norte Chico destacan sectores cordilleranos donde la WPD se mueve en el rango de los 400 a 600 W/m², alcanzándose localmente magnitudes superiores a los 1000 W/m² tanto en el norte cordillerano como en diversos lugares de la zona Austral. Sobre el océano Pacífico se observa un aumento progresivo del recurso hacia el sur, pasando de valores aproximados de 200 a 400 W/m² frente al norte del país, cercanos a los 600 W/m² en la zona Sur y alcanzando valores cercanos y superiores a los 1200 W/m² en el extremo austral.

El delta anual absoluto (Figura 10c) y porcentual (Figura 10d) de WPD entre PGW e HIST muestra que hacia sectores cordilleranos del Norte Grande y Norte Chico, aproximadamente entre 23°S y 31°S, se concentran los principales aumentos, con incrementos absolutos del orden de 100 a 200 W/m² y valores localmente cercanos a 300 W/m², equivalentes a aumentos porcentuales cercanos al 25 %. Sobre el océano Pacífico frente a estas mismas zonas también se observan incrementos del orden de 20 a 25 %. Hacia la zona Sur y Austral predominan las disminuciones de menor magnitud, sin embargo, se identifican aumentos localizados del orden de 20 a 25 % sobre el territorio continental entre aproximadamente 39°S y 41°S, así como leves incrementos sobre el océano entre 35°S y 38°S. Desde aproximadamente 40°S hacia el extremo austral predominan disminuciones continuas sobre el océano Pacífico, generalmente del orden de -100 W/m². También se observan disminuciones más marcadas, cercanas a -30 %, en algunos sectores continentales entre aproximadamente 48°S y 50°S.

El achurado asociado al test de Wilcoxon muestra que una parte importante de estas variaciones presenta significancia estadística. Estas zonas son especialmente extensas sobre el océano Pacífico, aunque sobre el territorio continental la distribución es más heterogénea. En la zona Centro, donde las diferencias presentan menor magnitud, el achurado tiende a ser menos continuo.

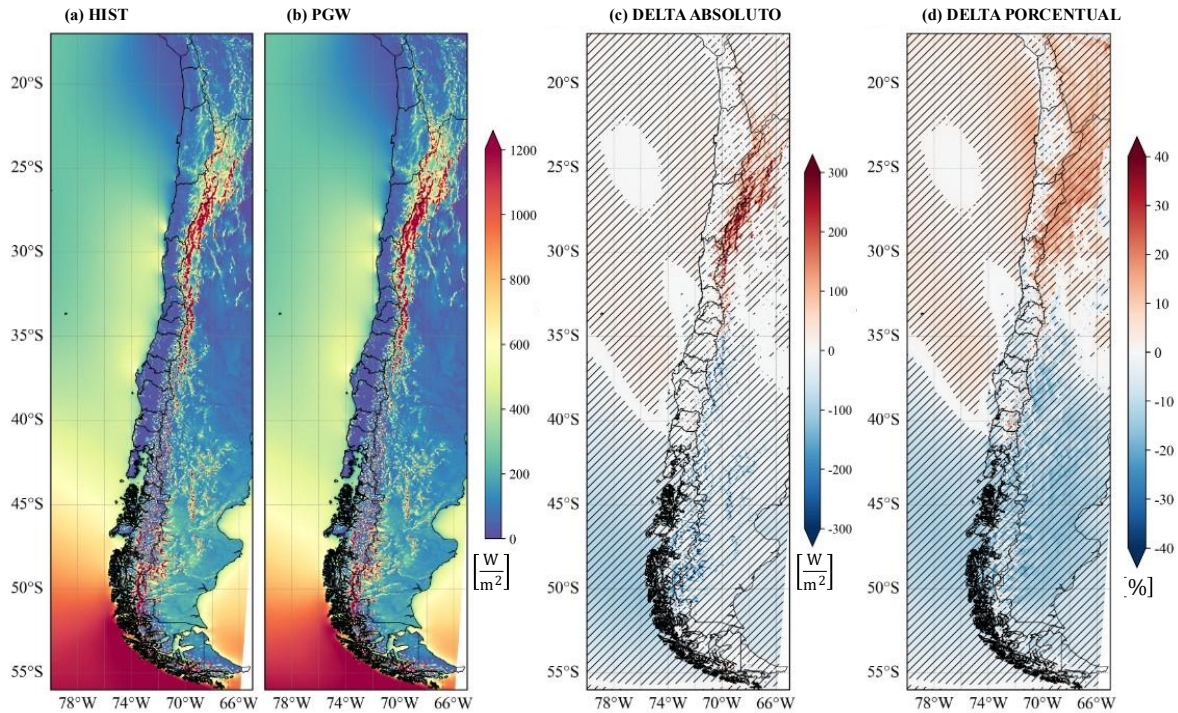


Figura 10: Densidad de potencia eólica anual para HIST (a), PGW (b), delta absoluto (c) y delta porcentual (d).

Durante el verano (Figura 11a), los mayores aumentos de WPD se concentran en sectores cordilleranos del Norte Chico y de la zona Central, alcanzando valores de hasta 40 %. Hacia la zona Sur se observa una transición caracterizada principalmente por variaciones de menor magnitud, aunque destacan aumentos cercanos al 20 % entre aproximadamente 40°S y 42°S, junto con incrementos del orden de 15 % sobre el océano Pacífico frente a este sector. En la zona Austral, en contraste, predominan disminuciones más homogéneas tanto sobre el territorio continental como sobre el océano, con reducciones del orden de 20 a 25 %. Durante el otoño (Figura 11b), se mantienen los aumentos en sectores cordilleranos del Norte Chico y de la zona Central, aunque con menor magnitud que en verano. Sin embargo, los aumentos aislados observados en la zona Sur se intensifican durante esta estación, alcanzando valores cercanos a 35–40 %.

En la época de invierno (Figura 11c), predominan aumentos del orden de 20 a 25 % en el Norte Grande y Norte Chico, aunque también se observan disminuciones localizadas en algunos sectores del Norte Grande, con valores cercanos a 15–20 %. Sobre el océano Pacífico, el aumento de la WPD presenta una distribución continua frente a las zonas costeras del Norte Grande, Norte Chico y parte de la zona Central. En contraste, desde aproximadamente 37°S hasta el extremo austral predominan disminuciones más homogéneas que en las estaciones anteriores, tanto sobre el territorio continental como sobre el océano, con reducciones del orden de 15–20 %. Finalmente, en primavera (Figura 11d) se mantiene un patrón similar al observado en invierno, aunque destacan algunos aumentos localizados en sectores cordilleranos de las zonas Central y Sur, aproximadamente entre 32°S y 40°S, con valores cercanos a 20–25 %.

Las zonas con significancia estadística se distribuyen principalmente sobre amplios sectores del océano Pacífico, mientras que en el territorio continental el achurado presenta una distribución más discontinua. Durante verano y otoño, la significancia se concentra especialmente en sectores donde predominan disminuciones hacia la zona Austral, mientras que en invierno y primavera el achurado en dicho sector es menor.

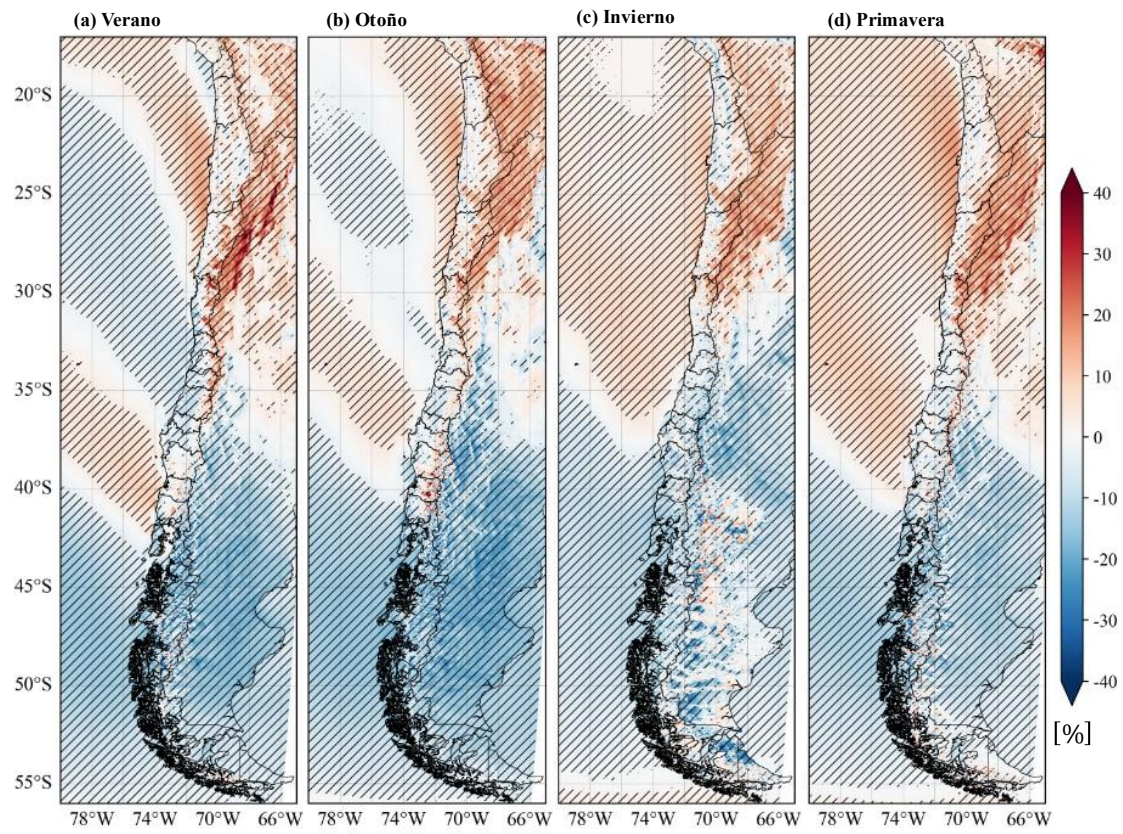


Figura 11: Delta porcentual estacional de WPD entre PGW e HIST para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

4.5 Acción del viento sobre estructuras

Con el objetivo de evaluar las posibles implicancias estructurales de los cambios proyectados en los vientos extremos, se seleccionó como caso de estudio un punto ubicado en el sector Parque Fotovoltaico Campos del Sol, en la Región de Atacama, aproximadamente a 60 km al noreste de Copiapó, con coordenadas de 27,0527°S y 69,9168°O. El emplazamiento se encuentra en la macrozona del Norte Chico, donde los resultados de WRF-SAAG muestran aumentos de la rapidez máxima anual bajo el escenario PGW, por lo que fue seleccionado como caso de estudio para la aplicación estructural.

La Figura 12a muestra la ubicación del punto seleccionado sobre el campo de variación anual de la rapidez máxima del viento, donde se puede ver que en el entorno del parque predominan aumentos bajo el escenario PGW. Como referencia, se incorpora además una vista de la infraestructura presente en el emplazamiento en la Figura 12b.

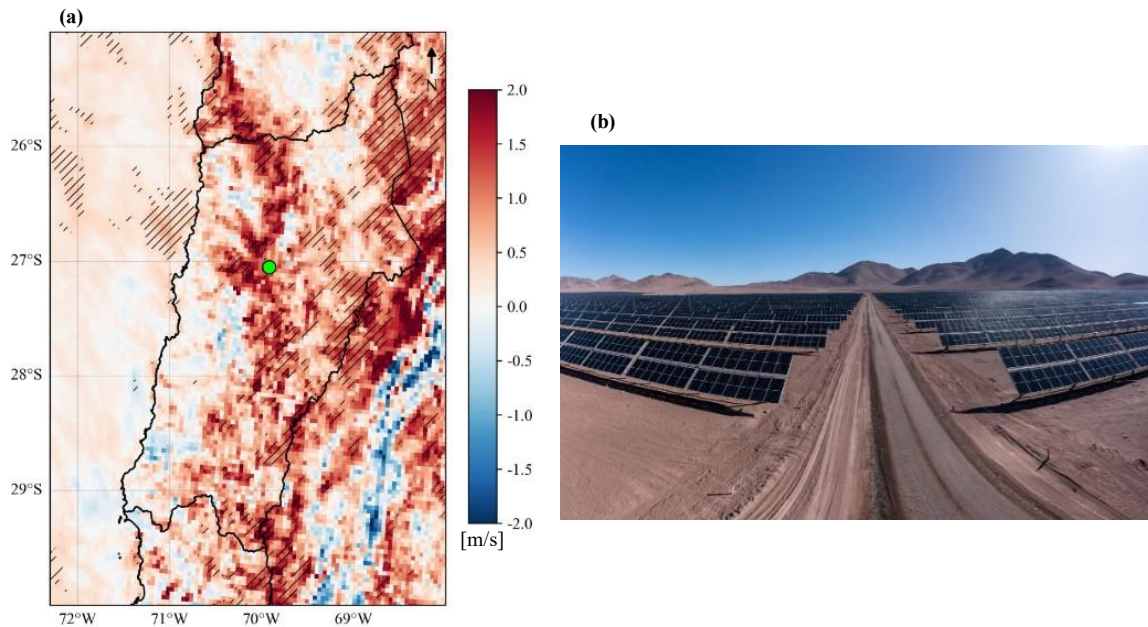


Figura 12: Delta anual de la rapidez máxima del viento en la Región de Atacama y ubicación del punto de análisis (a). Vista del Parque Fotovoltaico Campos del Sol (b). Fuente: Enel Green Power, 2023.

Para el análisis de extremos se extrajeron las series de máximos anuales de rapidez del viento a 10 metros de altura para HIST y PGW correspondientes al píxel WRF-SAAG más cercano al punto seleccionado. Previo al ajuste de las curvas de período de retorno, se evaluó la compatibilidad de ambas series con una distribución de Gumbel mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados de las pruebas de bondad de ajuste a la distribución de Gumbel aplicadas a las series de máximos anuales de rapidez del viento para los períodos HIST y PGW en el sector del Parque Fotovoltaico Campos del Sol.

Período	KS valor p	Chi-cuadrado valor p	Resultado
HIST	0,846	0,079	No se rechaza Gumbel
PGW	0,739	0,201	No se rechaza Gumbel

Para ambos períodos, los valores p obtenidos mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado son superiores al nivel de significancia de 0,05. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis de compatibilidad con una distribución de Gumbel, permitiendo utilizar este ajuste para estimar las velocidades asociadas a distintos períodos de retorno.

Una vez verificada la compatibilidad de ambas series con la distribución de Gumbel, se estimaron las velocidades asociadas a distintos períodos de retorno mediante el método de los momentos. La Figura 13 presenta los datos empíricos y las curvas ajustadas para HIST y PGW, junto con sus respectivos intervalos de confianza del 95 %. En todo el rango analizado, la curva correspondiente a PGW se mantiene por sobre la de HIST, observándose además una separación creciente entre ambas al aumentar el período de retorno. La figura señala también el límite empírico aproximado de la muestra, correspondiente a 22 años, permitiendo distinguir las estimaciones obtenidas dentro del rango de los datos de aquellas asociadas a períodos de retorno mayores.

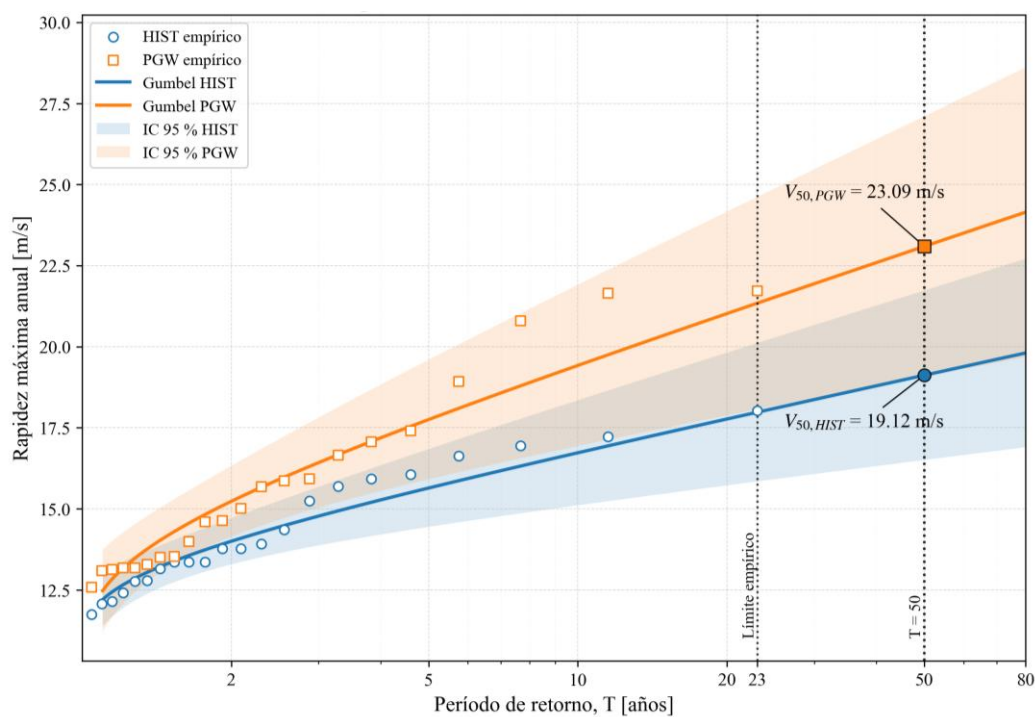


Figura 13: Curvas de período de retorno de la rapidez máxima anual para los períodos HIST y PGW en el sector del Parque Fotovoltaico Campos del Sol, ajustadas mediante la distribución de Gumbel. Se presentan los datos empíricos y los intervalos de confianza del 95 %.

Para un período de retorno de 50 años, la velocidad estimada aumenta desde 19,12 m/s en HIST hasta 23,09 m/s en PGW, correspondiente a un incremento de 3,97 m/s, equivalente aproximadamente a un 20,8 %. Debido a que las series utilizadas contienen 22 máximos anuales, la estimación de V_{50} corresponde a una extrapolación respecto del rango empírico de los datos.

La Tabla 4 resume las estimaciones de V_{50} para los períodos HIST y PGW junto con sus límites inferior y superior correspondientes a un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 4: Velocidad asociada a un período de retorno de 50 años e intervalo de confianza del 95 %.

Período	V_{50}^{inf} [m/s]	V_{50} [m/s]	V_{50}^{sup} [m/s]
HIST	16,51	19,12	21,73
PGW	19,08	23,09	27,11

Los intervalos de confianza de HIST y PGW presentan un cierto grado de superposición. Sin embargo, tanto la estimación central de V_{50} como los límites inferior y superior correspondientes presentan valores mayores en PGW que en HIST.

A partir de las estimaciones de V_{50} y sus límites de confianza se calcularon los cambios absoluto y relativo entre PGW e HIST, junto con el factor R_{50} asociado a cada caso. Para representar la influencia de la incertidumbre se compararon los límites equivalentes de ambas estimaciones, definiéndose los casos inferior, central y superior presentados en la Tabla 5. Estos casos se utilizan como escenarios de sensibilidad para la posterior aplicación estructural.

Tabla 5: Cambio proyectado en V_{50} y factor relativo R_{50} para los casos inferior, central y superior.

Caso	ΔV_{50} [m/s]	ΔV_{50} [%]	R_{50}
Límite inferior	2,57	15,6	1,156
Central	3,97	20,8	1,208
Límite superior	5,38	24,7	1,247

Para aplicar estos resultados a los valores de referencia de la NCh432:2025, se consideró que el emplazamiento corresponde a la zona I-A, para la cual la norma establece una velocidad básica de 27 m/s y una presión de referencia de 447 N/m². La velocidad ajustada se obtuvo aplicando el factor R_{50} sobre la velocidad básica, mientras que la presión de referencia se calculó mediante la ecuación de presión de velocidad y los criterios establecidos en la metodología. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Ajuste de la velocidad básica y de la presión de referencia de la NCh432.

Caso	R_{50}	Velocidad ajustada [m/s]	Presión ajustada [N/m ²]	Δp_0 [%]
Límite inferior	1,156	31,2	596,7	33,5
Central	1,208	32,6	651,4	45,7
Límite superior	1,247	33,7	696,2	55,7

Para el caso central, el factor R_{50} incrementa la velocidad básica desde 27,0 hasta 32,6 m/s, mientras que la presión de referencia aumenta desde 447 N/m² hasta aproximadamente 651,4 N/m², equivalente a un incremento cercano al 46 %. Para los casos inferior y superior, el aumento de la presión se encuentra aproximadamente entre 34 y 56 %.

4.6 Altura significativa del oleaje

Con el fin de evaluar el efecto de las variaciones proyectadas del viento sobre el oleaje, se estimó la altura significativa H_s en los 19 nodos del Atlas de Oleaje de Chile utilizando la metodología WRF-SPM. La Figura 14a presenta la ubicación de los nodos y su distribución entre las cinco macrozonas, desde el Nodo 1 en el Norte Grande hasta el Nodo 19 en la zona Austral.

La Figura 14b presenta la altura significativa media en los 19 nodos para el Atlas de Oleaje y las estimaciones HIST y PGW, junto con el rango de las medias mensuales de ambos periodos simulados. En las tres series se observa un aumento general de H_s hacia el sur. Para HIST y PGW, los nodos más al norte como N1 y N2, presentan valores medios del orden de 0,5 a 0,7 metros. En los nodos intermedios, aproximadamente entre N8 y N12, las medias se encuentran entre 1,8 y 2,6 m, mientras que, hacia los nodos australes, particularmente entre el N15 y N19, alcanza valores del orden de 3,5 a 5,5 metros. Los valores del Atlas son superiores a las estimaciones WRF-SPM principalmente en los nodos del norte, mientras que hacia los nodos intermedios las magnitudes se aproximan y en los nodos australes las estimaciones WRF-SPM alcanzan valores superiores a los del Atlas. Al comparar HIST y PGW, en los nodos de las zonas Norte y Centro-Norte predominan valores medios levemente superiores en PGW, mientras que desde la zona Centro-Sur hacia el extremo austral predominan valores inferiores en el período futuro.

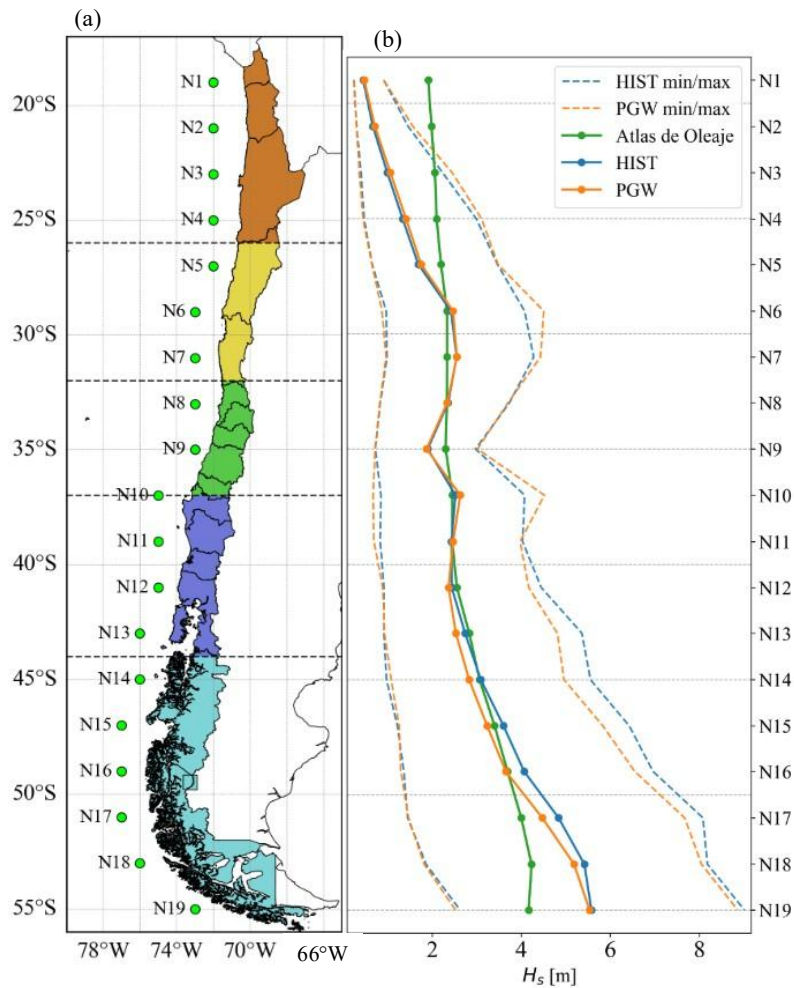


Figura 14: Ubicación de los 19 nodos del Atlas de Oleaje de Chile (a). Comparación de la altura significativa media entre el Atlas de Oleaje y las estimaciones HIST y PGW para los 19 nodos (b).

La Figura 15 presenta la diferencia de la altura significativa media entre PGW e HIST para cada nodo. Entre N1 y N7 predominan cambios positivos, destacando N3 y N4 con aumentos cercanos a 0,07 m. También se observan aumentos en N10 y N11, alcanzándose en el Nodo 10 el mayor incremento de los 19 nodos, con $\Delta H_S = 0,109$ metros.

Desde N12 hacia el sur predominan los cambios negativos. Las mayores disminuciones se registran en N15, N16 y N17 con valores entre -0,36 y -0,41 m aproximadamente, siendo el Nodo 16 el que presenta la mayor reducción entre los nodos analizados.

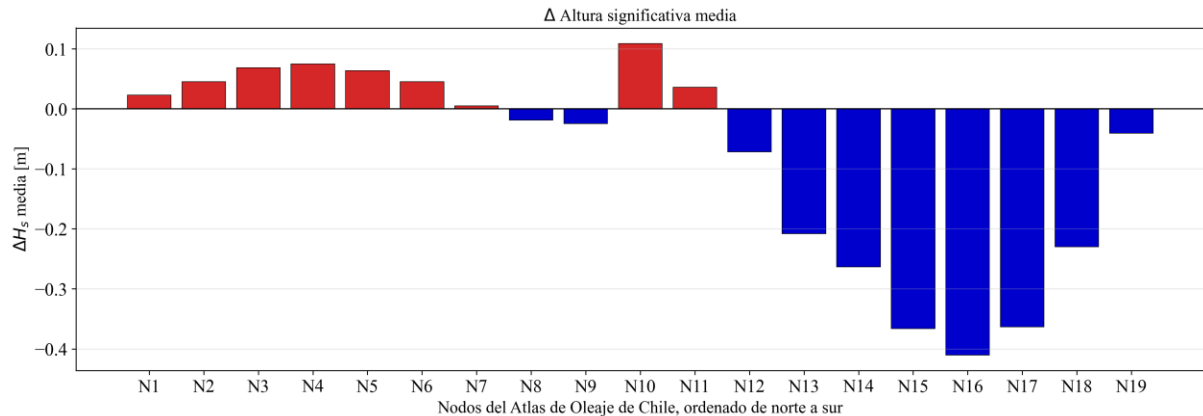


Figura 15: Variación de la altura significativa media de oleaje entre PGW e HIST para los 19 nodos. Los valores positivos indican aumentos de H_S y los negativos disminuciones.

Para comparar el comportamiento temporal de la estimación HIST con el Atlas de Oleaje de Chile se analizaron los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson (Figura 16), donde se puede observar que ambos presentan un comportamiento similar.

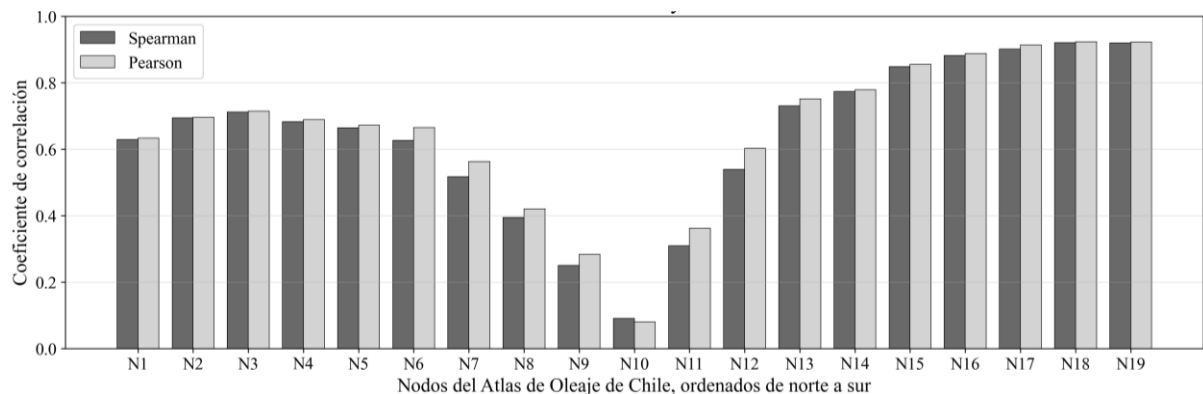


Figura 16: Coeficientes de correlación de Spearman y Pearson entre las series mensuales de altura significativa del Atlas de Oleaje de Chile y la estimación WRF-SPM del período HIST para los 19 nodos analizados.

Entre N1 y N6 Spearman y Pearson varían entre 0,61 y 0,71, los coeficientes disminuyen entre N7 y N11, registrándose en N10 los valores más bajos, con aproximadamente 0,091 para Spearman y 0,080 para Pearson. Desde N12 hacia el sur las correlaciones aumentan progresivamente alcanzando valores superiores a 0,8 desde N15 y máximos cercanos a 0,92 en N18 y N19.

Para el análisis detallado se seleccionaron dos nodos considerando la magnitud y el signo de ΔH_S y los coeficientes de correlación obtenidos respecto del Atlas. Si bien el nodo 10 presenta el mayor incremento de la altura significativa media, con $\Delta H_S = 0,109$ m, registra los menores coeficientes de correlación de los 19 nodos, con valores cercanos a 0,09 para Spearman y 0,08 para Pearson. Por esta razón, se seleccionó el Nodo 4 (Taltal), que presenta el mayor aumento entre los nodos restantes, con $\Delta H_S = 0,075$ m, junto con coeficientes de 0,683 para Spearman y 0,689 para Pearson. Como caso de disminución se

seleccionó el Nodo 16 (Isla Esmeralda), que presenta la mayor reducción de H_S , con $\Delta H_S = -0,410$ y coeficientes de 0,881 y 0,888 para Spearman y Pearson, respectivamente.

En las climatologías mensuales de H_S se puede observar que para el N4 (Figura 17a), los valores del Atlas varían aproximadamente entre 1,8 y 2,3 metros, mientras que HIST presenta valores entre 0,8 y 1,9 metros. En ambas series los menores valores se registran durante los primeros meses del año y los mayores durante invierno y primavera. La estimación PGW se mantiene por sobre HIST durante los doce meses, alcanzando mayores diferencias durante la segunda mitad del año.

En el Nodo 16 (Figura 17b), los valores del Atlas se encuentran aproximadamente entre 3,3 y 4,0 m, mientras que HIST varía entre 3,4 y 4,5 m. La estimación HIST presenta valores superiores a los del Atlas durante todo el año, mientras que PGW supera al Atlas principalmente entre junio y septiembre. A diferencia de N4, la estimación PGW se mantiene por debajo de HIST durante todo el año.

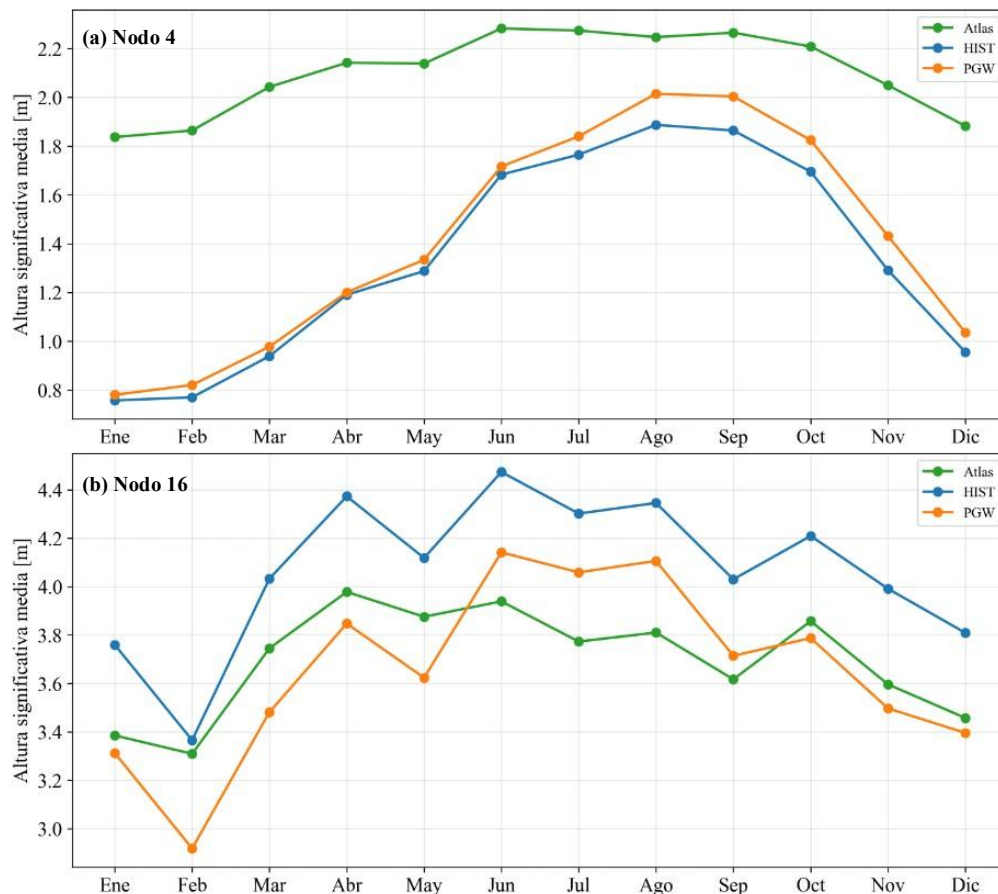


Figura 17: Climatología mensual de la altura significativa de oleaje para el Nodo 4 Taltal (a) y Nodo 16 Isla Esmeralda (b).

La magnitud y estacionalidad de estas diferencias se observan con mayor claridad en la Figura 18, donde se presenta el cambio mensual ΔH_S . En el Nodo 4 (Figura 18a), los cambios son positivos durante los doce meses, con incrementos relativamente bajos durante el primer semestre y una intensificación durante la segunda mitad del año. Los mayores aumentos ocurren entre agosto y noviembre, alcanzando un máximo cercano a 0,14 m.

El Nodo 16 (Figura 18b) presenta el comportamiento opuesto, con disminuciones durante todos los meses. Las reducciones varían aproximadamente entre -0,24 y -0,55 m, las mayores se registran en marzo, seguido por abril, noviembre y mayo. Las menores disminuciones se observan durante los meses de invierno.

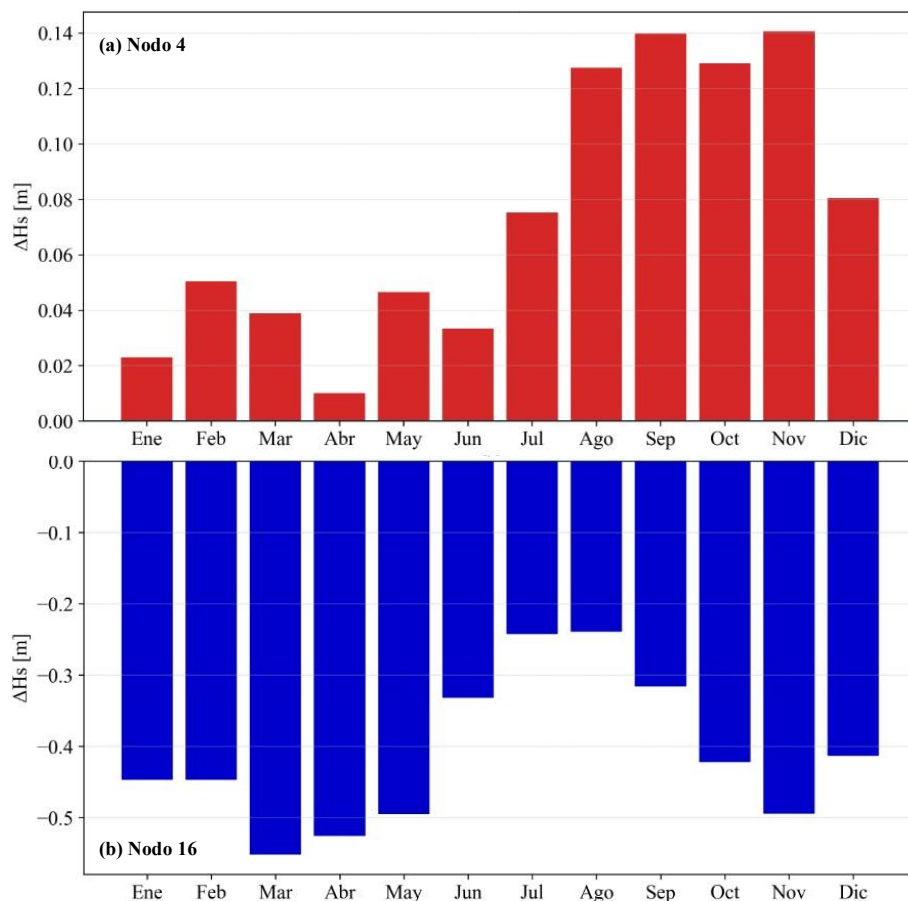


Figura 18: Variación mensual de la altura significativa de oleaje entre PGW e HIST para el Nudo 4 Taltal (a) y el Nudo 16 Isla Esmeralda (b).

Para complementar el análisis de H_s , se evaluaron los cambios en la frecuencia de ocurrencia de las direcciones del viento en ambos nodos. La Tabla 7 resume los sectores dominantes y las variaciones más relevantes entre HIST y PGW.

Tabla 7: Frecuencia direccional del viento en N4 y N16.

Nodo	Sector	HIST [%]	PGW [%]	Δ frecuencia
4	S	76,73	80,5	+3,77
	SE	7,97	6,24	-1,73
	SO	6,83	6,26	-0,56
16	NO	28,48	27,45	-1,03
	O	27,39	25,78	-1,61
	S	8,09	9,63	+1,54
	SE	4,71	5,30	+0,59

En el Nudo 4 existe un marcado predominio de los vientos provenientes del sector sur, que representan un 76,73 % en HIST y aumentan hasta 80,50 % en PGW. Paralelamente, disminuye la participación de los sectores restantes, destacando el sureste con una reducción de 1,73.

En cambio, en el Nudo 16 la distribución es más diversa. Durante HIST predominan los sectores noroeste y oeste, con frecuencias de 28,48 y 27,39 % respectivamente. En el período PGW ambos disminuyen a 27,45 y 25,78 % respectivamente, mientras que la ocurrencia de vientos provenientes del sur aumenta desde 8,09 % hasta 9,63 % y en menor medida en el sureste de 4,71 a 5,30 %.

5 Discusión de resultados

5.1 Variaciones climáticas del viento

Los resultados obtenidos muestran que las variaciones proyectadas del viento no presentan un comportamiento uniforme a lo largo del territorio. Para la rapidez media se identifica un patrón relativamente definido, con aumentos principalmente en el Norte Grande y Norte Chico, especialmente en sectores cordilleranos, y disminuciones predominantes hacia las zonas Sur y Austral, mientras que la zona Central presenta cambios de menor magnitud. Este comportamiento se mantiene en términos generales durante las cuatro estaciones y cuenta con una amplia presencia de diferencias estadísticamente significativas según el test de Wilcoxon, lo que entrega mayor respaldo al patrón espacial identificado.

En cambio, la rapidez máxima presenta una respuesta más heterogénea, aunque conserva de manera general los aumentos hacia el norte y las disminuciones hacia el sur. En este caso, las zonas estadísticamente significativas son más limitadas y discontinuas, por lo que sus variaciones deben interpretarse con mayor cautela. Esto sugiere que los cambios en la rapidez media del viento presentan una señal más persistente entre los años analizados, mientras que los máximos muestran una mayor variabilidad. El análisis de frecuencia complementa estos resultados, ya que en algunas macrozonas las variaciones son más pronunciadas en el P95 que en la media espacial de la rapidez máxima, particularmente en el Norte Chico y la zona Sur. Esto evidencia que los cambios proyectados pueden manifestarse de manera diferente en el comportamiento promedio y en la parte alta de la distribución.

Otra consideración importante corresponde a las características del experimento climático utilizado. Las simulaciones WRF-SAAG futuras fueron generadas mediante el enfoque *Pseudo Global Warming* (PGW), modificando las condiciones históricas mediante una señal de cambio climático obtenida de CESM2-LENS2 bajo SSP3-7.0. Esta configuración favorece la comparación HIST-PGW al mantener condiciones sinópticas comparables, pero también limita la interpretación de los resultados, ya que no representa completamente posibles cambios futuros en la frecuencia o secuencia de los sistemas meteorológicos. Aunque las perturbaciones PGW incluyen cambios en viento y altura geopotencial, la evolución sinóptica continúa condicionada por el período histórico (Dominguez et al., 2024). En consecuencia, los resultados de esta investigación deben interpretarse como una proyección de la respuesta del viento bajo el estado climático futuro considerado, y no como una predicción de todos los cambios posibles en la ocurrencia futura de eventos meteorológicos.

Finalmente, la alta resolución de las simulaciones WRF-SAAG no garantiza por sí sola una representación exacta de las magnitudes del viento. Las evaluaciones disponibles para Chile han mostrado resultados favorables en la representación de temperatura y en algunas aplicaciones hidrológicas; sin embargo, estas se han concentrado principalmente en variables como precipitación y temperatura y no constituyen una validación específica del viento utilizado en este estudio (Segovia, 2025). Por esto, una limitación relevante corresponde a la ausencia de una validación directa de las componentes U_{10} y V_{10} , y de la rapidez del viento a lo largo del país.

Al comparar los resultados obtenidos con Reboita et al. (2018), se observa una concordancia parcial en la Patagonia. Estos autores proyectaron una disminución cercana a 0,75 m/s durante el verano, mientras que WRF-SAAG muestra reducciones de aproximadamente 0,25–0,75 m/s desde 40° S hacia el extremo austral durante verano y otoño. Sin embargo, ambos estudios difieren en las latitudes más australes, ya que Reboita et al. (2018) proyectaron un fortalecimiento del viento al sur de 50° S, mientras que WRF-SAAG mantiene predominantemente disminuciones en este sector.

Las diferencias son más evidentes al comparar con Garreaud y Falvey (2009), quienes proyectaron aumentos cercanos a 1 m/s, equivalentes aproximadamente a 15 %, en el viento superficial costero entre 37° S y 41° S durante primavera y verano. En WRF-SAAG, en cambio, esta franja latitudinal corresponde a una zona de transición, con variaciones generalmente menores a $\pm 0,25$ m/s durante verano, mientras que hacia el sur predominan reducciones de 0,25–0,75 m/s. Por lo tanto, además de diferir parcialmente en el signo del cambio, WRF-SAAG proyecta magnitudes menores en esta franja

costera. Estas diferencias deben interpretarse considerando las distintas configuraciones experimentales de los estudios, resumidas en la Tabla 8.

Tabla 8: Comparación de las principales variaciones proyectadas de la rapidez del viento superficial obtenidas mediante WRF-SAAG y estudios previos para Sudamérica.

Estudio	Configuración	Resultados
Este estudio, WRF-SAAG	WRF, 4 km, PGW SSP3-7.0. HIST: 2000-2021; PGW: 2060-2081	A escala anual se proyectan aumentos de 0,25-0,75 m/s en sectores del norte y cordilleranos, con incrementos locales cercanos a 1 m/s en Atacama. Hacia el sur predominan disminuciones de 0,25-0,75 m/s, alcanzando localmente valores cercanos a 1 m/s. Durante verano y otoño se observan reducciones de 0,25-0,75 m/s desde aproximadamente 40°S hacia el extremo austral.
Reboita et al. (2018)	RegCM4, 50 km, RCP8.5. Presente: 1979-2005; futuro cercano: 2020-2050; futuro lejano: 2070-2098.	Para el futuro cercano se proyectan disminuciones de aproximadamente 0,75 m/s en Patagonia durante el verano y aumentos entre 0,25-0,75 m/s al sur de 50°S. En el futuro lejano, los aumentos en sectores australes aumentan en magnitud, alcanzando aproximadamente 0,75-1,5 m/s en algunos sectores oceánicos.
Garreaud y Falvey (2009)	PRECIS, 25 km, escenarios A2 y B2. Presente: 1961-1990; futuro: 2071-2100.	Bajo A2 se proyecta un aumento de aproximadamente 1 m/s en la rapidez media del viento superficial cercano a la costa, los mayores incrementos se dan entre 37°S y 41°S durante primavera y verano. Bajo B2 el patrón es similar, pero con una amplitud de cambio menor que en A2.

5.2 Potencial eólico

Los resultados de densidad de potencia eólica muestran una respuesta espacial coherente con las variaciones proyectadas de la rapidez del viento, pero con magnitudes mayores debido a la dependencia cúbica de la WPD con la rapidez. En los sectores cordilleranos del Norte Grande y Norte Chico, incrementos moderados de la rapidez se traducen en aumentos de WPD, mientras que hacia las zonas Sur y Austral predominan disminuciones, tanto sobre el continente como sobre el océano Pacífico.

En este sentido, la interpretación conjunta de los cambios absolutos y porcentuales resulta especialmente importante. Un aumento porcentual elevado no necesariamente representa una variación energética importante cuando la WPD inicial es baja; de la misma manera, una disminución porcentual moderada en una región con un recurso históricamente elevado puede representar una diferencia absoluta considerable. Los sectores cordilleranos del norte destacan porque presentan simultáneamente incrementos porcentuales cercanos al 25 % y aumentos absolutos de hasta 100–300 W/m², mientras que el extremo austral mantiene algunos de los mayores valores de WPD del dominio pese a las disminuciones proyectadas. Por lo tanto, los cambios deben interpretarse considerando también la magnitud del recurso histórico.

En términos generales, las proyecciones obtenidas mediante WRF-SAAG presentan concordancias con estudios previos que identifican una disminución futura del recurso eólico en sectores de Chile. Martínez e Iglesias (2024) proyectaron reducciones de WPD de hasta aproximadamente 50 % en sectores del sur del país, mientras que de Souza Ferreira et al. (2024) obtuvieron disminuciones cercanas a 30 % en la zona Centro-Sur. Estas magnitudes son comparables con las reducciones del orden de 20–30 % obtenidas mediante WRF-SAAG hacia las zonas Sur y Austral, aunque las diferencias entre estudios

deben interpretarse considerando sus distintas resoluciones espaciales, escenarios, períodos de análisis y alturas de cálculo de la WPD.

Una diferencia más marcada se observa respecto de Reboita et al. (2018). Si bien dicho estudio proyecta disminuciones de WPD en sectores de Patagonia, concordantes con el debilitamiento obtenido mediante WRF-SAAG hacia el sur del dominio, también muestra un fortalecimiento del recurso en latitudes superiores a 50° S hacia fines del siglo XXI. En contraste, WRF-SAAG mantiene predominantemente disminuciones en las latitudes más australes. La Tabla 9 resume las principales características y resultados de los estudios considerados.

Tabla 9: Comparación de las principales variaciones proyectadas de la densidad de potencia eólica obtenidas mediante WRF-SAAG y estudios previos para Sudamérica.

Estudio	Configuración	Resultados
Este estudio, WRF-SAAG	WRF, 4 km, PGW SSP3-7.0. HIST: 2000-2021; PGW: 2060-2081. WPD a 10 m.	Aumentos de WPD en sectores del Norte Grande y Norte Chico de entre 20-25 % a escala anual y de hasta 40 % en sectores cordilleranos. Hacia las zonas Sur y Austral se proyectan disminuciones del orden de 20-30 %.
Martínez e Iglesias (2024)	CMIP6, SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Histórico: 1995-2014; futuro medio: 2041-2060; futuro lejano: 2081-2100.	Identifican al sur de Chile como una de las regiones con mayor recurso eólico de Sudamérica, con valores históricos superiores a 800 W/m ² . En el futuro proyectan disminuciones de WPD de hasta 50 % en sectores del sur de Chile.
de Souza Ferreira et al. (2024)	Ensamble de 8 modelos CMIP6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Histórico: 1995–2014; futuro: 2020–2039, 2040–2059, 2060–2079 y 2080–2099. WPD a 100 m.	Proyectan aumentos de aproximadamente 25-50 % en el nordeste y sur de Brasil, mientras que en el centro-sur de Chile se observan disminuciones cercanas a 30 %.
Reboita et al. (2018)	RegCM4, 50 km, RCP8.5. Presente: 1979-2005; futuro cercano: 2020-2050; futuro lejano: 2070-2098. WPD a 100 m.	Proyectan disminuciones de WPD en el centro-norte de Patagonia durante todo el año. A diferencia de WRF-SAAG, obtienen un fortalecimiento del recurso en latitudes superiores a 50°S hacia fines del siglo XXI.

Para contextualizar las implicancias prácticas de estos cambios, se analizaron tres sectores asociados a proyectos eólicos existentes o en desarrollo: el Parque Eólico Horizonte, en el norte de Chile, y los proyectos eólicos marinos Viento Azul Biobío y Don Julio, ubicados en la zona Centro-Sur y Austral, respectivamente.

El análisis de estos emplazamientos muestra comportamientos diferenciados a lo largo del país. En el sector del Parque Eólico Horizonte, la WPD aumenta en todas las estaciones, con incrementos del orden de 2–12 % bajo PGW. Frente a la Región del Biobío, en el sector considerado para Viento Azul, los cambios son de menor magnitud y predominantemente positivos, alcanzando aproximadamente 7 % según la estación. En contraste, en el sector del proyecto Don Julio, en Tierra del Fuego, predominan las disminuciones durante verano, otoño e invierno, alcanzando cerca de 9 % durante otoño. Estos resultados muestran que las modificaciones proyectadas del recurso eólico pueden diferir considerablemente entre emplazamientos y que, incluso dentro de los patrones regionales descritos anteriormente, la magnitud y el signo del cambio dependen de la localización específica.

Finalmente, los valores de WPD presentan algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar sus magnitudes absolutas. En primer lugar, el cálculo se realizó utilizando la rapidez del viento a 10 m para mantener consistencia con la variable superficial empleada en la caracterización climática de HIST y PGW. Sin embargo, esta altura no corresponde a la de operación habitual de los aerogeneradores. Como referencia, la WPD fue calculada a 100 m en Reboita et al. (2018), mientras que Watts y Jara (2011) extrapolaron sus registros a 61,5 m, correspondiente a la altura de buje de la turbina considerada. En segundo lugar, se adoptó una densidad del aire constante de $1,225 \text{ kg/m}^3$, simplificación utilizada también por Martínez e Iglesias (2024), aunque esta varía con la presión, temperatura y altitud, por lo que este supuesto puede afectar especialmente las magnitudes calculadas en sectores cordilleranos. Por estas razones, la WPD estimada en este estudio debe interpretarse principalmente como un indicador comparativo entre HIST y PGW, y no como una estimación directa de la generación eléctrica futura.

5.3 Impactos en diseño estructural

Los resultados obtenidos para el caso de estudio muestran que el cambio proyectado en los extremos de viento puede amplificarse al trasladarse a una variable de interés estructural. Para un período de retorno de 50 años, la velocidad estimada aumenta aproximadamente un 21 % entre HIST y PGW, dando un factor central $R_{50} = 1,208$. Al aplicar este cambio relativo a la velocidad básica de la NCh432:2025, la presión de referencia aumenta cerca de un 46 %, con un rango aproximado entre 34 y 56 % al considerar la incertidumbre. Esta diferencia responde a la dependencia cuadrática de la presión respecto de la velocidad y muestra que variaciones moderadas de los extremos de viento pueden producir cambios proporcionalmente mayores en las presiones asociadas. Un comportamiento similar fue evidenciado por Ossandón (2008), donde una velocidad básica 54 % mayor en Concepción se tradujo en un aumento cercano al 138 % de la carga básica de viento, mientras que en Punta Arenas un incremento del 97 % en la velocidad implicó un aumento cercano al 288 % en dicha carga.

La metodología utilizada presenta varios elementos establecidos en el Anexo B de la NCh432:2025 para estudios específicos de velocidad del viento. Este recomienda utilizar registros de largo plazo, preferentemente superiores a 10 años y señala que las series de máximos anuales son una alternativa habitual para este tipo de análisis; en este estudio se dispuso de 22 máximos anuales para cada período. Asimismo, en el Anexo B se presenta la distribución de Gumbel como una de las aproximaciones comúnmente empleada en estudios relacionados con el viento.

El ajuste de Gumbel se realizó mediante el método de los momentos que cuenta con antecedentes en la estimación de velocidades básicas de viento. Su elección se sustenta en su simplicidad y en el criterio adoptado por Ossandón (2008), quien utilizó máximos anuales y el método de los momentos siguiendo la metodología empleada para la elaboración del mapa de velocidades básicas de Estados Unidos asociado a ASCE 7-05, también identificó su utilización en normativas argentinas, aunque en ese caso a partir de máximos mensuales. El mismo autor advierte que el método puede presentar una menor precisión para muestras de 20 datos o menos, aunque las series utilizadas en este estudio contienen 22 valores, la estimación de una velocidad con período de retorno de 50 años continúa siendo una extrapolación. Por esta razón, y siguiendo la recomendación del Anexo B de la NCh432:2025, se incorporó un análisis de sensibilidad para determinar el rango de incertidumbre y se evaluaron los casos inferior, central y superior.

Una limitación corresponde al intervalo temporal de las velocidades analizadas. Los máximos obtenidos del modelo corresponden a valores horarios, mientras que la velocidad básica de diseño está asociada a una ráfaga de 3 segundos. El Anexo B contempla procedimientos de normalización para registros obtenidos bajo distintas condiciones de medición, pero esta no es aplicable directamente para las salidas horarias utilizadas en esta investigación. Por esta razón, las velocidades V_{50} estimadas no se utilizaron directamente como velocidades básicas de diseño, en cambio, se aplicó el cambio relativo entre PGW e HIST mediante R_{50} . De esta forma se evita comparar velocidades definidas con intervalos de promedio diferentes, aunque se asume que el cambio relativo de los máximos horarios puede ser representativo del cambio en las ráfagas de diseño, constituyendo una limitación de la aplicación.

5.4 Impactos en el oleaje

Los resultados obtenidos muestran que las variaciones proyectadas de la altura significativa de oleaje no son uniformes a lo largo de los 19 nodos analizados. En los nodos del norte predominan aumentos de H_s , mientras que desde la zona Centro-Sur hacia el extremo austral las disminuciones adquieren una mayor magnitud. El mayor aumento se registra en N10, sin embargo, este nodo presenta los menores coeficientes de correlación con el Atlas. Esto limita su representatividad para un análisis detallado, ya que una variación futura elevada no implica necesariamente una adecuada reproducción del comportamiento histórico del oleaje.

En el período histórico, tanto las estimaciones WRF-SPM como el Atlas presentan un aumento general de H_s hacia latitudes mayores. Este comportamiento coincide con la climatología del Pacífico Sudoriental obtenida mediante WaveWatch III, donde las mayores alturas hacia el sur se relacionan con el incremento de la velocidad media del viento (Aguirre et al., 2017). Sin embargo, las magnitudes obtenidas mediante WRF-SPM presentan diferencias respecto del Atlas: en los nodos del norte predominan valores inferiores, las estimaciones se aproximan al Atlas en varios nodos intermedios y hacia el extremo austral alcanzan valores superiores al Atlas. La mayor correspondencia temporal observada en varios nodos australes podría estar relacionada con la mayor influencia del forzamiento local del viento sobre el oleaje en estas latitudes, donde los intensos vientos del oeste favorecen una mayor generación local de olas (Aguirre et al., 2017). Esto podría favorecer el desempeño de una metodología basada principalmente en el viento, aunque no implica que la contribución del mar de fondo sea despreciable. Esto muestra que una correlación elevada no implica necesariamente una reproducción adecuada de la magnitud absoluta, como ocurre en nodos australes.

Las proyecciones futuras disponibles para Chile también presentan diferencias entre estudios. El análisis de Cofré y Beyá (2016), realizado en ocho puntos de aguas profundas utilizando un conjunto de modelos climáticos bajo RCP8.5, muestra una elevada variabilidad entre modelos y diferencias importantes respecto del Atlas durante el período histórico. De manera adicional, las proyecciones desarrolladas para las costas de Chile mediante WaveWatch III forzado por seis modelos climáticos indican un incremento leve de la altura media hacia 2026–2045 bajo RCP8.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Este resultado presenta concordancia con los aumentos obtenidos en los nodos del norte, pero difiere de las disminuciones proyectadas mediante WRF-SPM hacia las zonas Sur y Austral. Estas diferencias pueden estar asociadas a los distintos períodos, escenarios climáticos y modelos atmosféricos empleados.

Finalmente, debe considerarse que la metodología WRF-SPM corresponde a una aproximación simplificada del oleaje, basada principalmente en la acción del viento y el Fetch. El clima de oleaje frente a las costas de Chile es más complejo y puede estar compuesto por múltiples sistemas generados tanto local como remotamente, incluyendo mar de viento y mar de fondo con distintas direcciones y características espectrales. Por esta razón, factores asociados a la generación remota, propagación e interacción de distintos sistemas de oleaje no son representados explícitamente mediante este procedimiento (Aguirre et al., 2017; Ministerio del Medio Ambiente, 2019). En consecuencia, los resultados deben interpretarse principalmente como una estimación de los cambios en el oleaje asociados a las variaciones proyectadas del viento entre HIST y PGW, y no como una representación completa del clima futuro de oleaje frente a Chile.

6 Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar las variaciones proyectadas del viento sobre Chile continental y el océano Pacífico adyacente mediante simulaciones climáticas regionales WRF-SAAG de alta resolución, y evaluar cómo estas variaciones pueden influir en distintas aplicaciones de la Ingeniería Civil. Los resultados muestran que el cambio futuro del viento no presenta una señal uniforme a lo largo del territorio, sino una marcada diferenciación espacial, con aumentos predominantes en sectores del norte del país, particularmente en zonas cordilleranas, y disminuciones hacia las zonas Sur y Austral. La zona Central presenta, en términos generales, variaciones de menor magnitud.

La rapidez media mostró una señal espacial más consistente que la rapidez máxima, tanto a escala anual como estacional. Mientras los cambios en el régimen medio presentan amplias zonas estadísticamente significativas, las variaciones de los máximos son más heterogéneas y su significancia se concentra en sectores específicos. El análisis de la parte alta de la distribución permitió complementar esta caracterización, evidenciando que, en algunas regiones, particularmente en el Norte Chico, los cambios pueden manifestarse con mayor intensidad en los valores elevados de rapidez que en el comportamiento promedio. En conjunto, estos resultados permitieron identificar áreas donde las variaciones del viento podían adquirir mayor relevancia desde el punto de vista de la Ingeniería Civil.

Las aplicaciones estudiadas evidenciaron que variaciones relativamente moderadas del viento pueden adquirir una relevancia mayor cuando se trata de aplicaciones ingenieriles. En el caso del potencial eólico, la dependencia cúbica con la rapidez amplifica los cambios proyectados, generando aumentos del recurso principalmente en sectores del norte y cordilleranos, mientras que hacia las zonas Sur y Austral predominan reducciones. Esto indica que la evolución futura del recurso eólico tampoco sería homogénea en Chile y que las condiciones climáticas futuras pueden modificar tanto zonas favorables para su aprovechamiento como áreas donde actualmente existe un recurso elevado.

En la aplicación estructural, el análisis de extremos mostró que los cambios proyectados pueden amplificarse al transformarse en presiones de viento debido a su dependencia cuadrática con la velocidad. Para el caso de estudio analizado, un incremento del orden de 20 % en la velocidad extrema se tradujo en un aumento cercano al 46 % de la presión de referencia. Si bien este resultado corresponde a un análisis de sensibilidad de los parámetros normativos ante variaciones de viento bajo cambio climático, evidencia que la posible evolución futura de los extremos de viento puede adquirir relevancia para infraestructura con vidas útiles prolongadas y que su consideración constituye un aspecto de interés para futuros estudios de diseño estructural.

La aplicación de oleaje mostró también una respuesta espacial diferenciada, con aumentos de la altura significativa estimada principalmente en los nodos del norte y reducciones de mayor magnitud hacia las zonas Sur y Austral. La comparación histórica con el Atlas de Oleaje permitió comprobar que la metodología simplificada WRF-SPM reproduce el gradiente general de aumento del oleaje hacia el sur y presenta una mayor correspondencia en varios nodos australes, aunque existen diferencias en las magnitudes absolutas. Por lo tanto, esta aplicación muestra que las variaciones proyectadas del viento pueden transmitirse al oleaje generado por este, aunque su interpretación debe considerar que el clima real de oleaje depende además de sistemas generados remotamente y de procesos que no son representados mediante la aproximación utilizada.

En conjunto, los resultados demuestran que las variaciones futuras del viento pueden tener implicancias diferentes dependiendo de la región y de la aplicación considerada, por lo que una misma señal climática puede traducirse en oportunidades o riesgos para distintas áreas de la Ingeniería Civil. Las simulaciones WRF-SAAG constituyen una herramienta de alta resolución que permite identificar estas diferencias espaciales y avanzar desde la caracterización climática hacia variables de interés ingenieril. Sin embargo, los resultados deben entenderse como proyecciones asociadas al experimento PGW y al escenario climático considerado, y no como una predicción única del clima futuro. Futuras investigaciones podrían ampliar estos resultados mediante una validación específica del viento y la incorporación de otros escenarios y modelos climáticos, permitiendo evaluar la robustez de los patrones identificados y profundizar en sus implicancias para la planificación, diseño y adaptación de infraestructura frente al cambio climático.

Referencias

- Aguirre, C., Rutllant, J. A., & Falvey, M. (2017). Wind waves climatology of the Southeast Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4288–4301. <https://doi.org/10.1002/joc.5084>
- Asociación de Ingenieros Civiles Estructurales. (2025, 4 de julio). *Seminario NCh 432: Actualización técnica de la norma de cargas de viento*. AICE. <https://aice.cl/web/seminario-nch-432-avanza-actualizacion-tecnica-de-la-norma-de-cargas-de-viento/>
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, F., Winckler, P., & Molina M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. <https://oleaje.uv.cl/atlas.html>
- Brogli, R., Heim, C., Mensch, J., Sørland, S. L., & Schär, C. (2023). The pseudo-global-warming (PGW) approach: methodology, software package PGW4ERA5 v1.1, validation, and sensitivity analyses. *Geoscientific Model Development*, 16, 907–926. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-907-2023>
- Carrera Ávila, N. C. (2022). *Modelación numérica de viento Raco en el Cajón del Maipo* [Tesis de Magíster en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile].
- Cofré González, C., & Beyá Marshall, J. (2016). Proyecciones y tendencias en el clima de oleaje en las costas chilenas bajo escenarios de cambio climático. *Proceedings del VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria (SIOP 2016)*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Colegio de Ingenieros de Chile. (2025, 28 de abril). *Nueva actualización de la norma NCh 432: un hito para la ingeniería estructural en Chile*. <https://www.ingenieros.cl/consejos-de-especialidades/articulos-ingenieria-civil/nueva-actualizacion-de-la-norma-nch-432-un-hito-para-la-ingenieria-estructural-en-chile/>
- Comité Nacional Chileno del CIGRE. (2017). *Guía de consulta: Análisis y recomendaciones sobre efectos del viento en el diseño de líneas aéreas de redes eléctricas en Chile*.
- de Souza Ferreira, G. W., Reboita, M. S., Ribeiro, J. G. M., Carvalho, V. S. B., Santiago, M. E. V., Silva, P. L. L. S., Baldoni, T. C., & de Souza, C. A. (2024). Assessment of the wind power density over South America simulated by CMIP6 models in the present and future climate. *Climate Dynamics*, 62, 1729–1763. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06993-3>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Dominguez, F., Rasmussen, R., Liu, C., Ikeda, K., Prein, A., Varble, A., Arias, P. A., Bacmeister, J., Bettolli, M. L., Callaghan, P., Carvalho, L. M. V., Castro, C. L., Chen, F., Chug, D., Chun, K. P. S., Dai, A., Danaila, L., da Rocha, R. P., de Lima Nascimento, E., ... Schneider, T. (2024). Advancing South American water and climate science through multidecadal convection-permitting modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(1), E32–E44. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0226.1>
- Enel Green Power. (2023, 15 de febrero). *Enel Green Power Chile inicia la operación comercial de la central fotovoltaica Campos del Sol*. <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/press/2023/02/operacion-comercial-de-la-central-fotovoltaica-campos-del-sol>

- European Commission, Joint Research Centre. (2022, 2 de diciembre). *Towards the publication of the Second-Generation Eurocodes: The European Commission Mandate M/515 is now completed. Eurocodes: Building the future.* <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/news/towards-publication-second-generation-eurocodes-european-commission-mandate-m515-now-completed>
- Falvey, M., Ibarra, M., Pérez, R., & Hernández, V. (2018). *Explorador Eólico 2018: Descripción y Guía de Uso*. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, para el Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- Garreaud, R. D., & Falvey, M. (2009). The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*, 29(4), 543–554. <https://doi.org/10.1002/joc.1716>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177, 87. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/gumb92958>
- Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., Alves, L. M., Amjad, M., Gorodetskaya, I. V., Grose, M., Klutse, N. A. B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L. O., Mernild, S. H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., & Yoon, J.-H. (2021). Atlas. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric statistical methods* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119196037>
- Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An introduction to dynamic meteorology* (5th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Instituto Nacional de Normalización. (2025). *NCh 432:2025. Cálculo de cargas de viento en estructuras*.
- Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., & Mitchell, J. F. B. (2004). *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre.
- Li, H., Huang, M., Wang, Y., Cai, K., Liu, B., Xiao, H., & Zhou, Y. (2026). Assessment of future typhoon rainfall and equivalent rainfall return periods based on the WRF-PGW method. *Applied Sciences*, 16(12), 5914. <https://doi.org/10.3390/app16125914>
- Li, Y., Li, Z., Zhang, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., & Pan, X. (2019). High-resolution regional climate modeling and projection over western Canada using a weather research forecasting model with a pseudo-global warming approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 4635–4659. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4635-2019>

- Martínez, A., & Iglesias, G. (2024). Climate change and wind energy potential in South America. *Science of The Total Environment*, 957, 177675. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177675>
- Merino, R. A., & Gassmann, M. I. (2022). Wind trends analysis in southern South America from weather station and reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 42, 2117–2134. <https://doi.org/10.1002/joc.7355>
- Ministerio de Energía. (2024, 4 de abril). *ERNC y otro récord: generación eléctrica en base a este tipo de energía llegó al 41% en lo que va de 2024*. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/ernc-y-otro-record-generacion-electrica-en-base-este-tipo-de-energia-llego-al-41-en-lo-que-va-de-2024>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). *Volumen 1: Amenazas, en Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile*.
- Montecinos, A., Muñoz, R. C., Oviedo, S., Martínez, A., & Villagrán, V. (2017). Climatological characterization of Puelche winds down the western slope of the extratropical Andes Mountains using the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(3), 677–696. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0289.1>
- Morales Gamboa, E., Winckler Grez, P., & Herrera Araya, M. (2019). *Costas de Chile: Medio natural, cambio climático, ingeniería oceánica y gestión costera*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Ossandón Tapia, R. A. (2008). *Determinación de la acción del viento sobre las estructuras en Chile* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile].
- Pearson, K. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., van Lipzig, N. P. M., & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>
- Ramírez Cabrera, L. (2022). *Cálculo manual de la carga de viento para análisis estructural de edificios según ASCE7-2016* [Informe de actividad de graduación de magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile].
- Reboita, M. S., Amaro, T. R., & de Souza, M. R. (2018). Winds: Intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. *Climate Dynamics*, 51, 187–205. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3913-5>
- Rodgers, K. B., Lee, S.-S., Rosenbloom, N., Timmermann, A., Danabasoglu, G., Deser, C., Edwards, J., Kim, J.-E., Simpson, I. R., Stein, K., Stuecker, M. F., Yamaguchi, R., Bódai, T., Chung, E.-S., Huang, L., Kim, W. M., Lamarque, J.-F., Lombardozzi, D. L., Wieder, W. R., & Yeager, S. G. (2021). Ubiquity of human-induced changes in climate variability. *Earth System Dynamics*, 12, 1393–1411. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1393-2021>
- Royal Meteorological Society. (2023, 14 de diciembre). *What is wind?* <https://www.rmets.org/metmatters/what-wind>
- Segovia Escafi, S. J. (2025). *Evaluation of WRF-SAAG precipitation and temperature simulations and their potential for hydrological modeling in continental Chile* [Tesis de magíster y memoria de título, Universidad de Chile].
- Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres. (2024, 2 de agosto). *Ministra del Interior encabezó COGRID Nacional por sistema frontal desde la Región de Atacama hasta Aysén*. SENAPRED. <https://www.senapred.cl/2024/08/02/ministra-del-interior-encabezo-cogrid-nacional-por-sistema-frontal-desde-la-region-de-atacama-hasta-aysen/>

- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., & Huang, X.-Y. (2019). *A description of the Advanced Research WRF Version 4* (NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR). National Center for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Standards Australia. (2021). *AS 1170.2-2021: Structural design actions – Part 2: Wind actions*. Standards Australia Limited.
- Stull, R. (2017). *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia.
- Trenberth, K. E. (1991). Storm tracks in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(19), 2159–2178. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1991\)048<2159:STITSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048<2159:STITSH>2.0.CO;2)
- U.S. Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual* (4th ed., Vols. 1–2). U.S. Government Printing Office.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1993). *Hydrologic Frequency Analysis* (Engineer Manual EM 1110-2-1415). Department of the Army.
- Watts, D., & Jara, D. (2011). Statistical analysis of wind energy in Chile. *Renewable Energy*, 36(5), 1603–1613. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.005>
- Węglarczyk, S. (2018). Kernel density estimation and its application. *ITM Web of Conferences*, 23, 00037. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20182300037>
- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain meteorology: Fundamentals and applications*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195132717.001.0001>
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>