



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Explorador **Eólico Marino** de Chile

**Documentación técnica
y guía de uso de la
herramienta en línea**

Enero 2026

Autores: Marcelo Ibarra, U. de Chile
Álvaro Valderrama, U. de Chile
Camilo Márquez, U. de Chile
Nicole Acevedo, U. de Chile
Camila Vásquez, Ministerio de Energía
Hernán Sepúlveda, Ministerio de Energía

Tabla de contenidos

1	Introducción	5
1.1	Contexto energético nacional	5
1.2	Rol del viento marino en la transición energética	6
1.3	Propósito del Explorador Eólico Marino	6
2	La iniciativa Exploradores de Energía.....	7
2.1	Origen y objetivos de la iniciativa	7
2.2	Continuidad histórica de los Exploradores Energéticos	8
2.2.1	Explorador Eólico 2012	9
2.2.2	Explorador Eólico 2018	9
2.3	Articulación con políticas públicas y planificación energética.....	9
3	Base de datos eólica marina.....	11
3.1	Motivación y alcance de la base de datos.....	11
3.2	Origen de la información y configuración de la modelación.....	12
3.2.1	Fuentes meteorológicas y oceanográficas.....	12
3.2.2	Configuración base del modelo atmosférico.....	13
3.3	Enfoque general de modelación del recurso eólico marino	14
3.4	Cobertura espacial y temporal.....	14
3.5	Variables disponibles y productos derivados	14
3.6	Principales fortalezas del conjunto de datos.....	14
4	Validación de la información.....	15
4.1	4.1 Enfoque general del proceso de validación	15
4.2	Validación con estaciones meteorológicas in situ	16
4.2.1	Resultados generales y distribución espacial de la correlación.....	17
4.2.2	Distribución puntual: comparación directa observación vs simulación	17
4.2.3	Ánálisis de sesgo y error	19
4.2.4	Ciclos anuales y diarios: evaluación de patrones temporales	21
4.3	Validación de resultados de modelación de viento offshore mediante comparación con productos satelitales.....	24
4.3.1	Resultados por dominio geográfico.....	25
4.3.2	Ánálisis espacial de sesgo y RMSE	32
4.3.3	Consideraciones finales de la validación satelital	33

4.3.4	Conclusión general del proceso de validación.....	34
5	Explorador Eólico Marino: La herramienta en-línea	35
5.1	Vista general de la interfaz	36
5.1.1	Componentes principales de la interfaz	36
5.1.2	Flujo general de uso	37
5.2	Módulo Recurso y visualización en el mapa	37
5.2.1	Selección del recurso eólico	37
5.2.2	Altura de evaluación del recurso.....	38
5.2.3	Selección de aerogenerador (factor de planta)	38
5.2.4	Visualización del recurso en el mapa	38
5.3	Módulo de agregaciones del mapa	39
5.3.1	Agregación estadística.....	39
5.3.2	Agregación intradiaria	40
5.3.3	Agregación anual y estacional.....	40
5.3.4	Uso combinado de agregaciones.....	40
5.4	Leyenda interactiva e interpretación visual.....	41
5.4.1	Contenido de la leyenda.....	41
5.4.2	Ajuste dinámico de colores y rangos.....	41
5.4.3	Interpretación de valores fuera de rango.....	42
5.5	Descripción de sitio seleccionado	43
5.5.1	Selección de un punto en el mapa	43
5.5.2	Descripción del Sitio	43
5.5.3	Estadísticas del viento.....	43
5.6	Gráficos y descarga de resultados	44
5.6.1	Tipos de gráficos disponibles.....	44
5.6.2	Descarga de datos	46
5.6.3	Consideraciones sobre el uso de los gráficos y datos.....	46
5.7	Capas de información geográfica complementaria	47
5.7.1	Información marina (batimetría, pendiente, oleaje y costa)	47
5.7.2	Transporte marítimo (GMTDS).....	47
5.7.3	Infraestructura de transporte marino (MTT + OSM)	48
5.7.4	Información de áreas marinas (usos y restricciones)	48

5.7.5	Infraestructura complementaria (energía)	49
5.7.6	Proyectos eólicos offshore (dominio público)	49
5.8	Mapas base y herramientas de navegación.....	49
5.8.1	Selección de mapa base	49
5.8.2	Herramientas de navegación del visor	50
5.8.3	Recomendaciones de uso para análisis comparativos	50

Tablas

Tabla 3-1	Fuentes de información utilizadas	12
Tabla 3-2	Configuración base de las simulaciones WRF para las costas de Chile.....	13

Figuras

Figura 4-1	Promedios observado vs simulados en 61 estaciones de la DMC usando datos horarios del periodo 2023. La correlación individual es coloreada.....	17
Figura 4-2	Gráfico de dispersión estaciones DMC.	18
Figura 4-3	Estadísticos en estaciones DMC, correlación de Pearson, sesgo y error cuadrático medio.	20
Figura 4-4	Ciclo anual de la velocidad del viento, simulación (naranjo) y estaciones meteorológicas(azul)	22
Figura 4-5	Ciclo diario de la velocidad del viento, simulación (naranjo) y estaciones meteorológicas DMC(azul).....	23
Figura 4-6	Validación satelital por temporada del año. dominio Norte.....	27
Figura 4-7	Validación satelital por temporada del año. dominio Centro	28
Figura 4-8	Validación satelital por temporada del año. dominio Chiloé	29
Figura 4-9	Validación satelital por temporada del año. dominio Sur.....	30
Figura 4-10	Validación satelital por temporada del año. dominio Austral B	31
Figura 4-11	Validación satelital por temporada del año. dominio Austral A	32

1 Introducción

El desarrollo de energías renovables constituye uno de los pilares fundamentales de la política energética de Chile, tanto por su contribución a la seguridad de suministro como por su rol en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la transición hacia una matriz energética más sostenible. En este contexto, el aprovechamiento del recurso eólico ha sido históricamente un componente clave del crecimiento del sector eléctrico nacional, principalmente a través de proyectos eólicos terrestres.

En los últimos años, el interés por el recurso eólico marino (también conocido en idioma inglés como energía eólica offshore) ha aumentado de manera significativa, impulsado por avances tecnológicos, reducción de costos a nivel internacional y la necesidad de diversificar las alternativas de generación renovable disponibles en el país. Chile, dada su extensa costa y sus condiciones meteorológicas favorables, presenta un potencial relevante para el desarrollo futuro de esta tecnología, lo que plantea nuevos desafíos en materia de información, planificación y evaluación preliminar del recurso.

En respuesta a esta necesidad, el Ministerio de Energía, en colaboración con la Universidad de Chile, ha impulsado el desarrollo del Explorador Eólico Marino, una iniciativa orientada a poner a disposición información pública, sistematizada y validada sobre el recurso eólico marino en el territorio nacional. La presente documentación tiene como objetivo introducir el contexto, propósito y alcance de esta iniciativa, con especial énfasis en la base de datos que la sustenta y en la herramienta que facilita su acceso, revisión y análisis.

1.1 Contexto energético nacional

El sistema energético chileno ha experimentado transformaciones profundas durante la última década, caracterizadas por una rápida incorporación de fuentes renovables no convencionales, una disminución progresiva de la participación de combustibles fósiles y un fortalecimiento de los instrumentos de planificación de largo plazo. En este proceso, la disponibilidad de información confiable y accesible ha sido un factor clave para apoyar la toma de decisiones públicas y privadas.

Si bien el desarrollo eólico terrestre ha alcanzado un alto nivel de madurez y ha realizado una contribución fundamental al crecimiento de las energías renovables en el país, la evolución del sector energético abre nuevas oportunidades para ampliar y diversificar este desarrollo. En este contexto, la energía eólica marina surge como una alternativa complementaria con alto potencial, capaz de impulsar nuevas cadenas de valor, fomentar la innovación tecnológica, generar empleo especializado y fortalecer la provisión de energía limpia, contribuyendo de manera adicional a los objetivos de desarrollo sostenible y transición energética de Chile.

El análisis del potencial eólico marino requiere, sin embargo, información específica y de alta resolución sobre el comportamiento del viento sobre el mar, así como sobre su variabilidad espacial y temporal. Históricamente, este tipo de información ha sido escasa o fragmentada, lo que ha dificultado evaluaciones preliminares consistentes y comparables a escala nacional.

1.2 Rol del viento marino en la transición energética

La energía eólica marina se ha consolidado a nivel internacional como una tecnología estratégica para la descarbonización de los sistemas eléctricos, especialmente en países con limitaciones territoriales o con alta demanda energética en zonas costeras. Entre sus principales atributos se encuentran la mayor intensidad y estabilidad del viento sobre el mar, así como la posibilidad de instalar aerogeneradores de gran escala.

En el caso de Chile, el viento marino representa una oportunidad de largo plazo para diversificar la matriz energética, fortalecer la seguridad de suministro y apoyar el cumplimiento de los compromisos climáticos del país. No obstante, su desarrollo requiere etapas previas de exploración, caracterización y análisis del recurso, que permitan identificar zonas con mayor potencial y comprender las condiciones generales bajo las cuales esta tecnología podría implementarse.

En este sentido, la generación de información base, homogénea y validada sobre el recurso eólico marino constituye un insumo esencial para la planificación energética, el diseño de políticas públicas y la evaluación preliminar de proyectos, sin reemplazar los estudios específicos que deben realizarse en etapas posteriores de desarrollo.

1.3 Propósito del Explorador Eólico Marino

El Explorador Eólico Marino tiene como propósito principal poner a disposición información pública y sistematizada sobre el recurso eólico marino en Chile, basada en un proceso de modelación atmosférica, validación técnica y desarrollo de plataformas de información que cubran necesidades relacionadas a la evaluación de prefactibilidad de proyectos energéticos.

2 La iniciativa Exploradores de Energía

La iniciativa Exploradores de Energía surge en un contexto de creciente interés por comprender y sistematizar el potencial de las energías renovables en el territorio nacional, mediante información confiable, estandarizada y territorialmente explícita. Un antecedente relevante de este enfoque fue la publicación técnica Energías Renovables en Chile: Potencial Eólico, Solar e Hidroeléctrico desde Arica a Chiloé (GIZ & Ministerio de Energía, 2014), en la cual se presentaron estimaciones del potencial de distintas fuentes renovables en el país y que sirvió como base conceptual para el desarrollo posterior de las plataformas Exploradores.

Desde sus primeras versiones, los Exploradores de Energía han buscado poner a disposición del público información que tradicionalmente se encontraba dispersa o era de difícil acceso, integrándola en plataformas abiertas, de uso gratuito y orientadas a análisis exploratorios. Su diseño responde a la necesidad de contar con instrumentos que permitan realizar evaluaciones preliminares, comparables y consistentes a escala nacional, sin sustituir los estudios específicos requeridos para el desarrollo de proyectos energéticos.

En este marco, el Explorador Eólico Marino se inscribe como una evolución natural de la iniciativa, extendiendo su alcance hacia el ámbito marino y hacia tecnologías emergentes de interés estratégico, en coherencia con los desafíos actuales de la transición energética.

2.1 Origen y objetivos de la iniciativa

La iniciativa Exploradores de Energía surge en un contexto de creciente interés por comprender y sistematizar el potencial de las energías renovables en el territorio nacional, a partir de información confiable, estandarizada y territorialmente explícita. Un antecedente relevante de este enfoque fue la publicación técnica Energías Renovables en Chile: Potencial Eólico, Solar e Hidroeléctrico desde Arica a Chiloé (Santana et al, 2014¹), en la cual se presentaron estimaciones del potencial de distintas fuentes renovables en el país y que sirvió como base conceptual para el desarrollo posterior de la plataforma Exploradores.

A partir de estos primeros esfuerzos, la iniciativa evolucionó progresivamente hacia el desarrollo de herramientas digitales que permiten visualizar, explorar y analizar información energética de manera integrada. Estas plataformas están orientadas

¹ Santana C., Falvey M., Ibarra M. y García M. 2014. Energías renovables en Chile: El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. Chile. Preparado para Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

<https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/20.500.13082/510>

principalmente a apoyar procesos de análisis preliminar, planificación sectorial y una comprensión general del desarrollo energético del país, facilitando el acceso a información de carácter público y homogéneo.

En este marco, la iniciativa Exploradores de Energía ha estado orientada a:

- Facilitar el acceso público a información energética relevante, bajo criterios de transparencia y estandarización.
- Contribuir a una mayor comprensión sobre la disponibilidad, distribución y comportamiento de los recursos energéticos renovables.
- Apoyar los procesos de planificación energética y la formulación de políticas públicas.
- Entregar insumos técnicos para evaluaciones preliminares del potencial energético.
- Promover una comprensión más amplia y fundamentada del desarrollo energético nacional.

Estos lineamientos se han mantenido constantes a lo largo del tiempo, adaptándose progresivamente a nuevas tecnologías, escalas de análisis y necesidades de información, en coherencia con la evolución del sector energético y los desafíos asociados a la transición energética.

2.2 Continuidad histórica de los Exploradores Energéticos

La iniciativa Exploradores de Energía se ha desarrollado de manera progresiva a lo largo del tiempo, consolidándose como una línea de trabajo institucional orientada a mejorar el acceso público a información energética y a fortalecer las capacidades de análisis preliminar a escala nacional. Su evolución ha estado marcada por la incorporación gradual de nuevos recursos energéticos, mejoras en la resolución y calidad de la información, y el desarrollo de plataformas digitales cada vez más robustas y accesibles.

A lo largo de sus distintas etapas, los Exploradores de Energía han mantenido principios comunes, tales como el acceso abierto a la información, el carácter orientativo de los resultados y su rol complementario a los estudios técnicos de mayor detalle. Esta continuidad ha permitido que las plataformas se consoliden como herramientas de referencia para distintos actores del sector energético, incluyendo organismos públicos, profesionales, académicos y público general interesado.

En este contexto, los Exploradores Eólicos desarrollados en los años 2012 y 2018 constituyen hitos relevantes dentro de la historia de la iniciativa, tanto por su aporte a la caracterización del recurso eólico terrestre como por el fortalecimiento de enfoques metodológicos y de visualización de la información, que posteriormente han servido de base para el desarrollo de nuevas herramientas, como el Explorador Eólico Marino.

2.2.1 Explorador Eólico 2012

El Explorador Eólico 2012 representó un hito relevante en la historia de los Exploradores de Energía, al constituirse como la primera herramienta pública de amplio alcance orientada a la visualización y comprensión detallada del recurso eólico en Chile. Si bien existían estudios previos de caracterización del viento, como los desarrollos eólicos realizados en décadas anteriores, estos no habían logrado un nivel comparable de difusión ni de impacto en la comprensión general del comportamiento del recurso.

La principal contribución del Explorador Eólico 2012 fue derribar barreras en torno a la comprensión de la distribución espacial y temporal del viento, al poner a disposición información con un nivel de detalle sin precedentes a través de una plataforma accesible y de uso público. Esto permitió avanzar hacia una comprensión más clara y compartida del comportamiento del viento a escala nacional, facilitando el análisis preliminar del recurso tanto para actores técnicos como para un público más amplio.

Este esfuerzo marcó un punto de inflexión en la forma en que la información eólica era utilizada y comunicada en el país, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de proyectos, estudios y líneas de trabajo asociadas a las energías renovables, y sentando las bases para la expansión posterior de la iniciativa hacia nuevos recursos y ámbitos de análisis.

2.2.2 Explorador Eólico 2018

El Explorador Eólico 2018 representó una evolución significativa respecto de la versión anterior, incorporando mejoras en la robustez de la información, actualizaciones en los insumos de datos y una plataforma de visualización más moderna que mejoraba la experiencia de los usuarios. Estas mejoras permitieron una representación más detallada del recurso eólico terrestre y ampliaron las posibilidades de análisis exploratorio por parte de los usuarios.

Esta versión consolidó el rol de los Exploradores de Energía Eólica como herramientas de referencia para el sector en Chile, ampliando sus posibilidades de uso a ámbitos de planificación, estudios preliminares y análisis territoriales. La experiencia acumulada en el desarrollo del Explorador Eólico 2018 constituyó un insumo clave para la extensión posterior de la iniciativa hacia nuevas áreas de análisis, incluyendo el desarrollo del nuevo Explorador Eólico Marino.

2.3 Articulación con políticas públicas y planificación energética

La iniciativa Exploradores de Energía ha sido concebida como un instrumento de apoyo a los procesos de planificación energética y de formulación de políticas públicas, mediante la provisión de información técnica de carácter público, homogéneo y territorialmente explícito. En este sentido, los Exploradores no constituyen herramientas prescriptivas ni

sustituyen los estudios técnicos de mayor detalle, sino que cumplen un rol orientativo y complementario dentro del ecosistema de información energética del país.

La información generada y sistematizada a través de los Exploradores de Energía contribuye a la identificación de tendencias generales, a la exploración preliminar del potencial de distintas fuentes renovables y al análisis territorial a escala nacional. Esto permite contar con una base común de información que puede ser utilizada por organismos públicos, profesionales del sector energético, instituciones académicas y otros actores relevantes, facilitando una comprensión compartida del desarrollo energético del país.

En el marco de los instrumentos de planificación energética de largo plazo impulsados por el Ministerio de Energía, los Exploradores de Energía aportan insumos técnicos que apoyan el análisis estratégico, la evaluación comparativa de alternativas tecnológicas y la identificación de oportunidades para el desarrollo de energías renovables. Su carácter público y accesible contribuye, además, a fortalecer la transparencia y la difusión de información relevante para la toma de decisiones.

El Explorador Eólico Marino se integra a esta lógica institucional, ampliando el alcance de la iniciativa hacia el ámbito marino y proporcionando información base sobre una tecnología emergente de interés estratégico. De este modo, se refuerza la articulación entre generación de información técnica, planificación energética y políticas públicas, manteniendo la coherencia con los objetivos generales de la transición energética y el desarrollo sostenible del sector energético chileno.

3 Base de datos eólica marina

La base de datos eólica marina constituye el núcleo técnico del nuevo Explorador Eólico Marino y representa el principal insumo de información que sustenta tanto la plataforma de exploración como los análisis preliminares que esta permite realizar. Su desarrollo responde a la necesidad de contar con información sistemática, homogénea y de cobertura nacional sobre el comportamiento del viento en el ámbito marino, en un contexto donde la disponibilidad de mediciones directas es limitada y espacialmente discontinua.

La base de datos fue construida a partir de simulaciones atmosféricas numéricas de mesoescala, aplicadas de manera consistente a lo largo del dominio marino adyacente a la costa continental de Chile. Este enfoque permite caracterizar patrones espaciales y temporales del viento relevantes para el análisis del recurso eólico offshore, proporcionando una base común de información para procesos de planificación energética, estudios exploratorios y evaluación inicial de oportunidades de desarrollo.

Es importante destacar que la información contenida en esta base de datos tiene un carácter orientativo y exploratorio, y no reemplaza mediciones en terreno ni estudios de ingeniería de detalle. Su propósito es apoyar etapas tempranas de análisis y facilitar una comprensión general del potencial eólico marino del país.

3.1 Motivación y alcance de la base de datos

La base de datos eólica offshore del Explorador Eólico Marino fue desarrollada con el objetivo de reducir las brechas de información existentes sobre el comportamiento del viento en el ámbito marino, poniendo a disposición un conjunto de datos homogéneos y de cobertura amplia que permita caracterizar el recurso eólico a lo largo de la costa chilena. Su motivación principal radica en la necesidad de contar con información base que facilite análisis preliminares del potencial eólico marino, en un contexto donde las mediciones directas sobre el mar son escasas, costosas y espacialmente limitadas.

En este sentido, la base de datos busca apoyar la comprensión general del recurso eólico offshore, entregando una visión integrada de sus principales patrones espaciales y temporales. Esto resulta especialmente relevante para etapas tempranas de planificación energética, estudios exploratorios y análisis estratégicos, donde se requiere identificar tendencias generales y zonas de interés potencial, más que realizar evaluaciones de detalle a escala local.

El alcance de la base de datos es nacional, abarcando el entorno marino adyacente a la costa continental de Chile y considerando una representación continua del recurso eólico en el tiempo. La información generada permite analizar el comportamiento medio del

viento, su variabilidad y otros indicadores relevantes para el análisis energético, bajo un enfoque consistente y comparable a lo largo del territorio cubierto.

Su propósito es servir como un insumo inicial que apoye la toma de decisiones informadas, facilite la identificación de oportunidades y contribuya a una mejor comprensión del potencial eólico marino del país.

3.2 Origen de la información y configuración de la modelación

La base de datos eólica offshore se generó a partir de simulaciones realizadas con el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting), utilizando una configuración base definida específicamente para las costas de Chile. Este enfoque integra fuentes de información meteorológica y oceanográfica de referencia internacional con un esquema de modelación de mesoscala, aplicado de forma sistemática sobre el dominio de estudio.

La combinación de forzantes atmosféricos globales, información de temperatura superficial del mar y una configuración numérica consistente permite representar de manera coherente la circulación atmosférica en el entorno costero y marino, incluyendo fenómenos relevantes para la caracterización del viento.

3.2.1 Fuentes meteorológicas y oceanográficas

Las simulaciones atmosféricas que sustentan la base de datos utilizan información proveniente de reanálisis atmosféricos globales y de productos de temperatura superficial del mar (SST), los cuales actúan como condiciones iniciales y de borde del modelo.

Las principales fuentes utilizadas se resumen a continuación:

Tipo de información	Fuente
Forzamiento atmosférico	Reanálisis ERA5
Temperatura superficial del mar	OSTIA
Cobertura espacial	Global
Resolución temporal de entrada	Horaria
Uso principal	Condiciones iniciales y de borde del modelo WRF

Tabla 3-1 Fuentes de información utilizadas

Estas fuentes son ampliamente utilizadas en estudios atmosféricos y energéticos a nivel internacional y permiten asegurar coherencia temporal y espacial en la simulación del viento sobre el océano.

3.2.2 Configuración base del modelo atmosférico

La caracterización del recurso eólico marino se realizó mediante simulaciones del modelo WRF, versión 4.5.2, aplicadas durante el año 2023. La configuración utilizada corresponde a una configuración base para las costas de Chile, definida y documentada en el Informe Final del proyecto (enero de 2025).

Las principales características de esta configuración se presentan en la siguiente tabla:

Parámetro	Configuración
Extensión temporal	Año 2023
Versión del modelo	WRF 4.5.2
Anidación de dominios	9 km / 3 km
Resolución temporal (salida)	60 minutos
Niveles verticales	61 niveles, hasta 50 hPa
Niveles bajo 1 km	20 niveles
Forzamiento atmosférico	ERA5
Forzamiento de SST	OSTIA
Capa límite planetaria (PBL)	MYNN o YSU (según región)
Capa superficial	MYNN o MM5 (según región)
Modelo de superficie terrestre	Noah
Microfísica	Ferrier
Radiación de onda larga	RRTM
Radiación de onda corta	RRTM
Parametrización de cúmulos	Kain–Fritsch
Base topográfica	GMT USGS
Uso del suelo	CORINE 100 m (Copernicus Land Monitoring Service, 2019)

Tabla 3-2 Configuración base de las simulaciones WRF para las costas de Chile

Esta configuración permite representar de manera adecuada los principales procesos atmosféricos que controlan el régimen de vientos en zonas costeras y marinas, incluyendo brisas marinas, gradientes térmicos mar-tierra y variabilidad diaria y estacional. La alta resolución vertical en las capas bajas de la atmósfera resulta particularmente relevante para el análisis del recurso eólico a alturas de interés energético.

3.3 Enfoque general de modelación del recurso eólico marino

El enfoque de modelación adoptado tiene como objetivo caracterizar el comportamiento general del recurso eólico marino, más que reproducir condiciones locales específicas. Las simulaciones permiten generar campos de viento consistentes en el espacio y el tiempo, adecuados para análisis estadísticos y comparativos a escala regional y nacional.

Este enfoque privilegia la coherencia y comparabilidad de los resultados a lo largo del territorio cubierto, asegurando que las diferencias observadas entre zonas reflejen principalmente variaciones reales del régimen de viento y no inconsistencias metodológicas.

3.4 Cobertura espacial y temporal

La base de datos cubre el entorno marino adyacente a la costa continental de Chile, utilizando una malla de resolución anidada que permite representar gradientes espaciales relevantes en el comportamiento del viento. La cobertura temporal corresponde al año 2023, con salidas horarias que permiten analizar tanto patrones medios como variabilidad diaria y estacional.

3.5 Variables disponibles y productos derivados

La base de datos resultante incluye velocidad y dirección del viento directamente simuladas por el modelo, que sirven como insumo para productos derivados orientados al análisis energético. Incluye resultados a 30 alturas (desde los 10m a 300m con espaciamiento vertical de 10 metros), estadísticas temporales y métricas relevantes para la evaluación preliminar del recurso eólico.

3.6 Principales fortalezas del conjunto de datos

Entre las principales fortalezas de la base de datos eólica offshore destacan:

- Uso de un modelo atmosférico de referencia internacional, con configuración documentada.
- Alta resolución espacial y temporal para análisis exploratorios.
- Cobertura nacional y coherente del entorno marino.
- Transparencia metodológica y trazabilidad de las fuentes de información.
- Validación posterior frente a observaciones in-situ y productos satelitales, descrita en la sección 4.

4 Validación de la información

La validación de la base de datos eólica offshore constituye un componente central del Explorador Eólico Marino, en cuanto permite evaluar de manera objetiva la calidad, consistencia y confiabilidad de la información generada mediante modelación atmosférica numérica. Dado que la caracterización del recurso eólico marino se basa en simulaciones y no exclusivamente en mediciones directas, resulta indispensable contrastar los resultados del modelo con observaciones independientes, utilizando enfoques reconocidos y metodológicamente robustos.

El proceso de validación fue diseñado siguiendo buenas prácticas internacionales aplicadas en estudios de recurso eólico, especialmente en contextos offshore, donde la disponibilidad de observaciones directas sobre el mar es limitada.

La validación realizada no tiene por objetivo certificar el recurso eólico a escala local ni reemplazar campañas específicas de medición requeridas para el desarrollo de proyectos, sino evaluar la capacidad del modelo para reproducir de manera realista los patrones espaciales y temporales del viento a escala regional y nacional. En este sentido, la validación constituye un respaldo técnico fundamental para el uso de la base de datos en análisis preliminares, planificación energética y estudios exploratorios.

4.1 4.1 Enfoque general del proceso de validación

El enfoque de validación adoptado combina evaluaciones temporales y espaciales del viento simulado, comparándolo con observaciones independientes provenientes de estaciones meteorológicas costeras y de productos satelitales especializados en viento marino. Esta aproximación permite analizar distintos aspectos del desempeño del modelo, incluyendo la representación de promedios, la variabilidad horaria y estacional, y la coherencia espacial de los patrones de viento.

Las comparaciones se realizaron sobre series temporales horarias, coherentes con la resolución temporal de salida del modelo, y se evaluaron mediante indicadores estadísticos estándar utilizados en estudios atmosféricos y energéticos, tales como coeficientes de correlación, sesgos medios y errores cuadráticos medios. Estos indicadores permiten cuantificar de manera objetiva el grado de concordancia entre las simulaciones y las observaciones.

4.2 Validación con estaciones meteorológicas in situ

La validación in situ se realizó utilizando registros horarios de estaciones meteorológicas operadas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), distribuidas a lo largo de Chile continental. Si bien estas estaciones se ubican mayoritariamente en tierra incluyendo zonas costeras, constituyen una referencia relevante para evaluar la capacidad del modelo de reproducir la variabilidad temporal del viento en el entorno costero.

El análisis incluyó comparaciones de series temporales completas, ciclos diarios y estadísticas agregadas, permitiendo evaluar la coherencia temporal entre los valores observados y simulados. Los resultados muestran un buen nivel de concordancia, con correlaciones elevadas en un número significativo de estaciones y sesgos moderados, compatibles con estudios de caracterización eólica a escala regional.

La **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta una comparación directa entre los promedios horarios simulados y observados en las 61 estaciones consideradas. En este gráfico de dispersión, cada punto representa una estación, y el color indica el valor de la correlación de Pearson obtenida para la serie temporal horaria correspondiente. Destaca el hecho de que más del 57% de las estaciones (35 de 61) muestran una correlación superior a 0.7, mientras que 8 estaciones superan el 0.8, lo que representa una concordancia notable entre la señal simulada y la real. Estas últimas se encuentran, en su mayoría, en instalaciones aeroportuarias con alta exposición al viento, y baja interferencia, y en donde la calidad de los instrumentos de medición tiende a ser superiores, lo que refuerza la confiabilidad de las observaciones.

Este alto grado de correlación en diversas latitudes evidencia la capacidad del modelo para captar la variabilidad temporal del viento en contextos de alta complejidad atmosférica, un requisito clave para estimaciones precisas del recurso eólico offshore.

4.2.1 Resultados generales y distribución espacial de la correlación

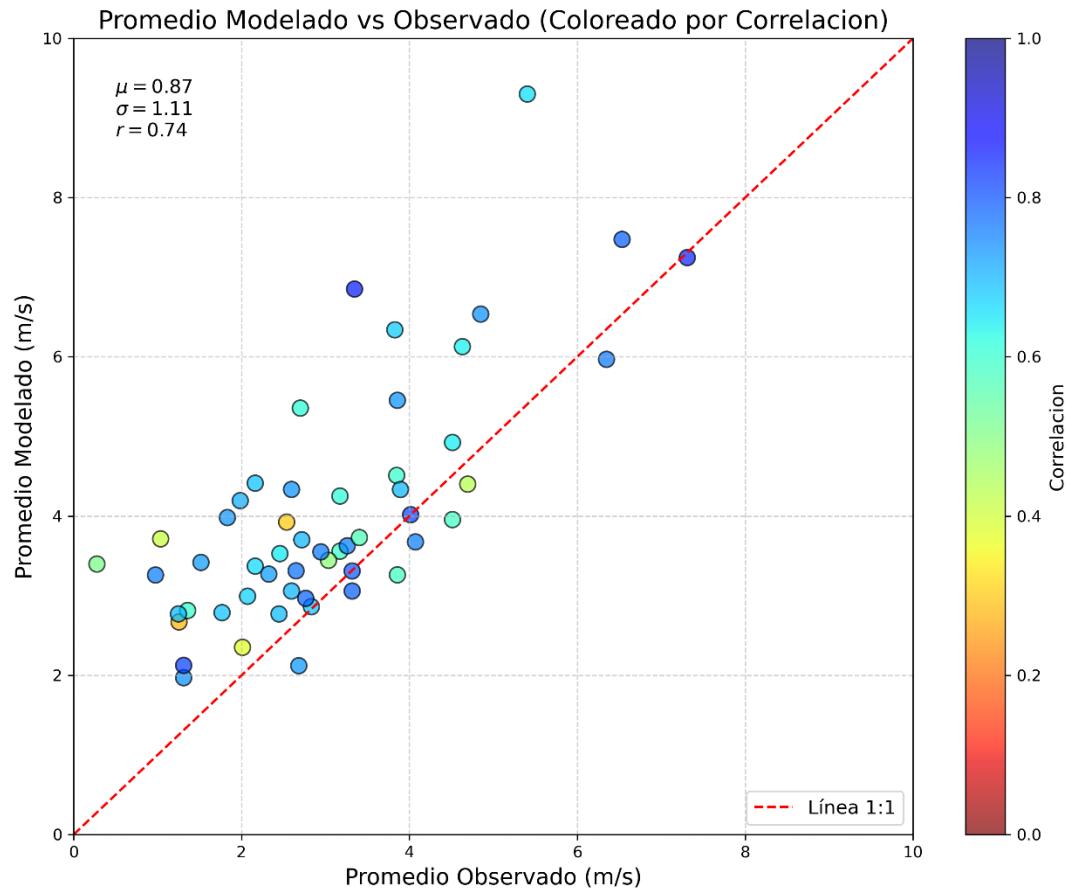


Figura 4-1 Promedios observado vs simulados en 61 estaciones de la DMC usando datos horarios del periodo 2023. La correlación individual es coloreada

4.2.2 Distribución puntual: comparación directa observación vs simulación

La **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** entrega una vista de tipo dispersión entre los valores simulados y observados en una selección representativa de estaciones. La densidad de puntos a lo largo de la diagonal indica un buen grado de ajuste, especialmente en el rango de velocidades medias (4–9 m/s), que es de particular relevancia para aplicaciones energéticas. En los extremos, como es común en este tipo de modelos, se observa una mayor dispersión, con tendencia a sobreestimar en los valores bajos y subestimar en los valores extremadamente altos, aunque sin afectar significativamente el promedio global.

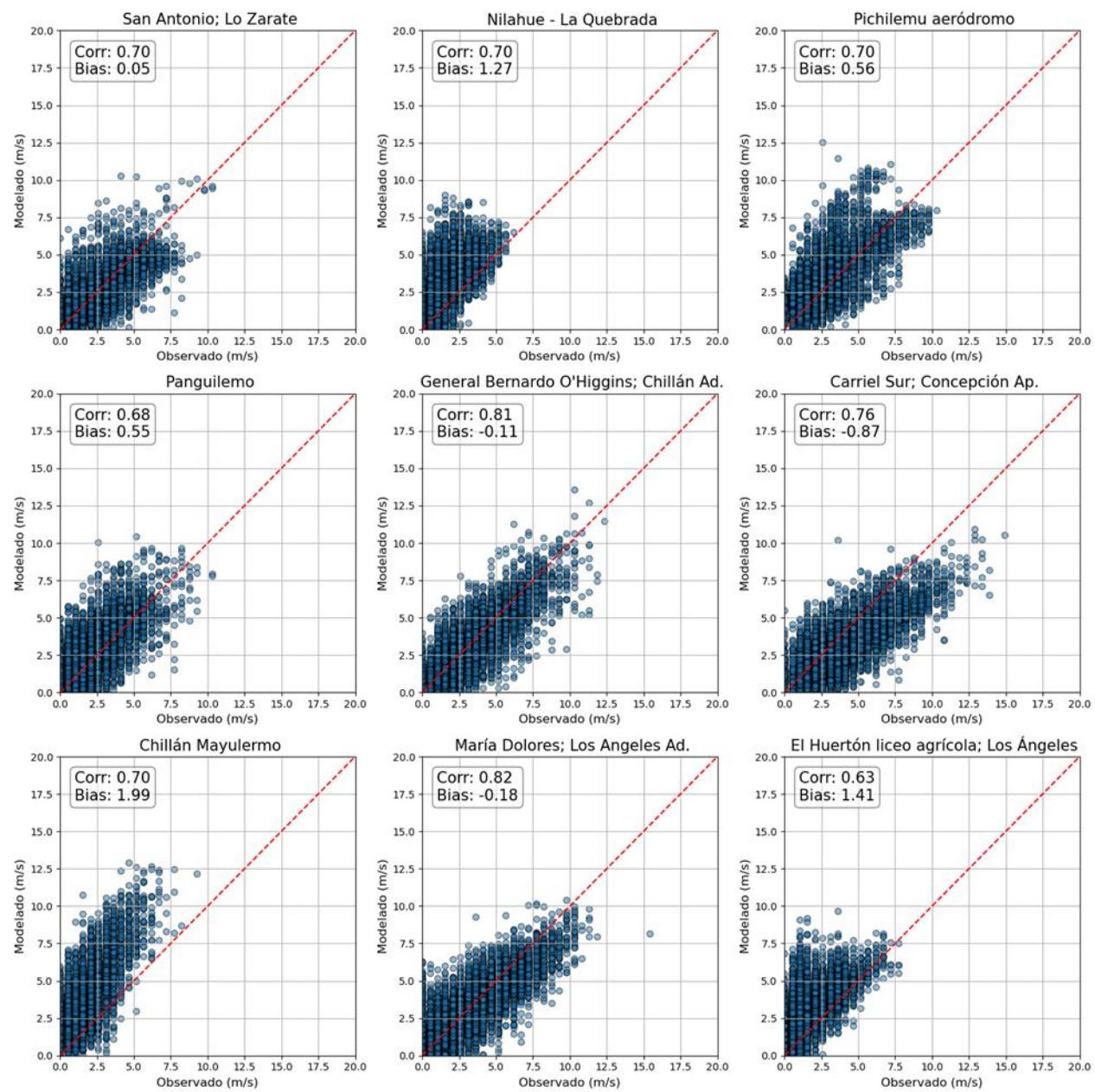


Figura 4-2 Gráfico de dispersión estaciones DMC.

4.2.3 Análisis de sesgo y error

La ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~ complementa el análisis anterior al presentar tres estadísticos fundamentales para cada estación: la correlación de Pearson, el sesgo (bias) y el error cuadrático medio (RMSE). La disposición espacial de estos estadísticos permite identificar patrones geográficos en el rendimiento del modelo.

- Correlación: Se mantiene alta en la mayoría del litoral, con valores especialmente sólidos en las regiones centro-norte y centro-sur, donde la estabilidad atmosférica favorece la predictibilidad del régimen de vientos costeros.
- Sesgo: Se identifica una leve sobreestimación del viento (sesgo positivo) en buena parte de las estaciones del norte y centro del país. Esta sobreestimación podría asociarse a la limitación del modelo para representar efectos locales de fricción terrestre y obstáculos topográficos en la interfaz mar-marino.
- RMSE: A pesar del sesgo, los valores del RMSE son relativamente bajos, lo cual indica que los errores absolutos entre simulación y observación son reducidos, confirmando un buen ajuste general.

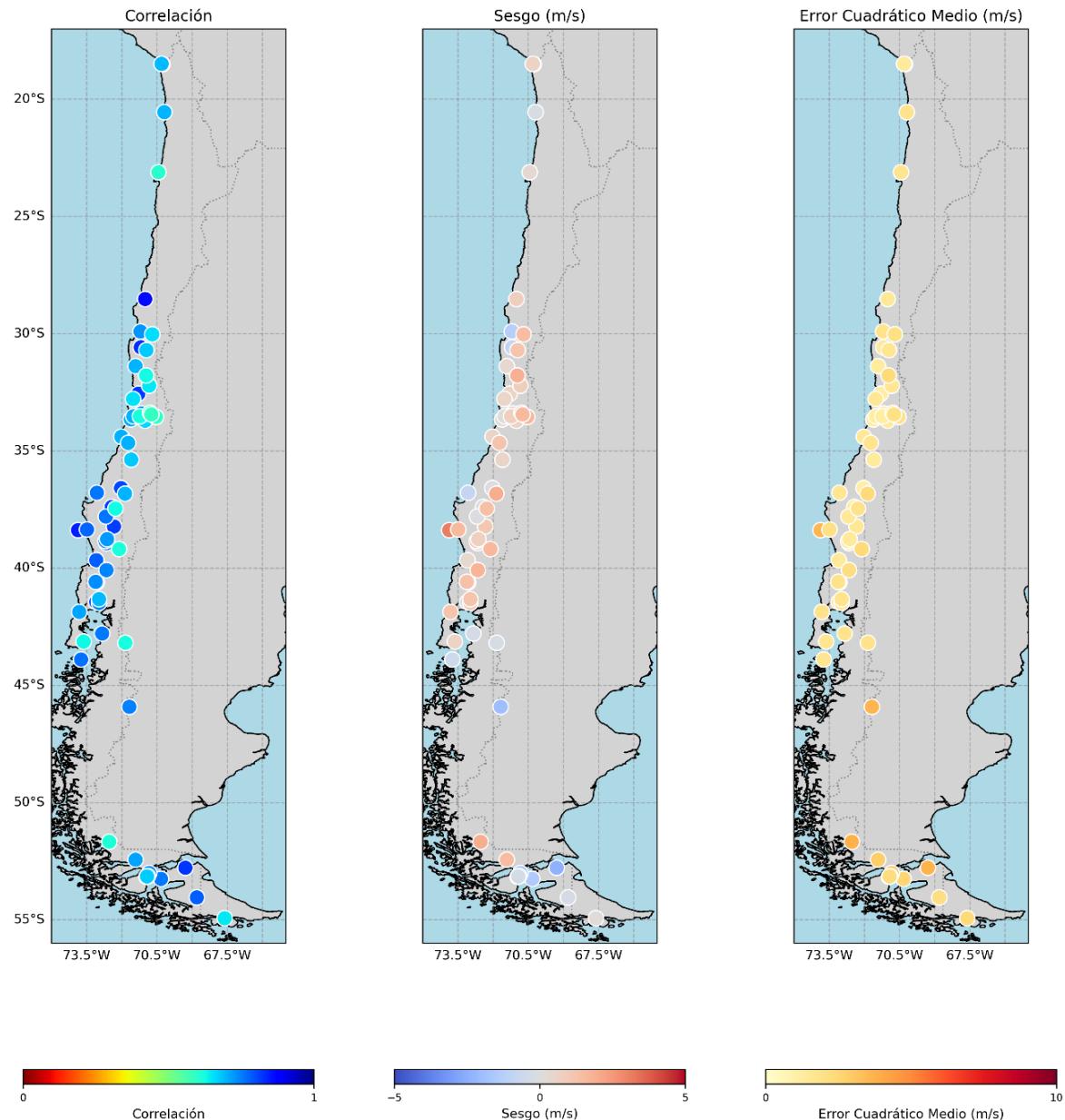
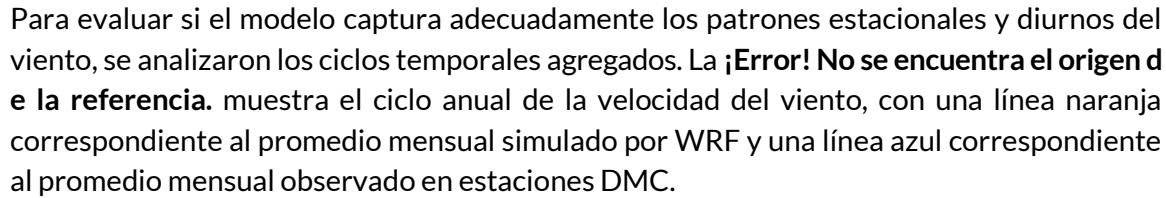


Figura 4-3 Estadísticos en estaciones DMC, correlación de Pearson, sesgo y error cuadrático medio.

4.2.4 Ciclos anuales y diarios: evaluación de patrones temporales

Para evaluar si el modelo captura adecuadamente los patrones estacionales y diurnos del viento, se analizaron los ciclos temporales agregados. La  muestra el ciclo anual de la velocidad del viento, con una línea naranja correspondiente al promedio mensual simulado por WRF y una línea azul correspondiente al promedio mensual observado en estaciones DMC.

El análisis revela que el modelo logra representar correctamente la forma general del ciclo anual, capturando el aumento de viento durante la primavera-verano y la disminución en otoño-invierno, especialmente en latitudes medias. Las discrepancias en valores absolutos son menores a 1 m/s en promedio, lo que constituye un buen resultado en términos operacionales.

Por su parte, la  expone el ciclo diario promedio, un aspecto crítico para aplicaciones como la programación de carga y mantenimiento de parques eólicos offshore. Aquí se aprecia cómo el modelo representa adecuadamente el aumento del viento en las horas vespertinas, típico de las brisas marinas inducidas por el calentamiento diferencial entre mar y tierra. No obstante, en ciertas zonas se observa una ligera sobreestimación de la magnitud del viento durante este peak vespertino, lo que podría atribuirse a la sensibilidad del modelo ante los gradientes térmicos en condiciones costeras.

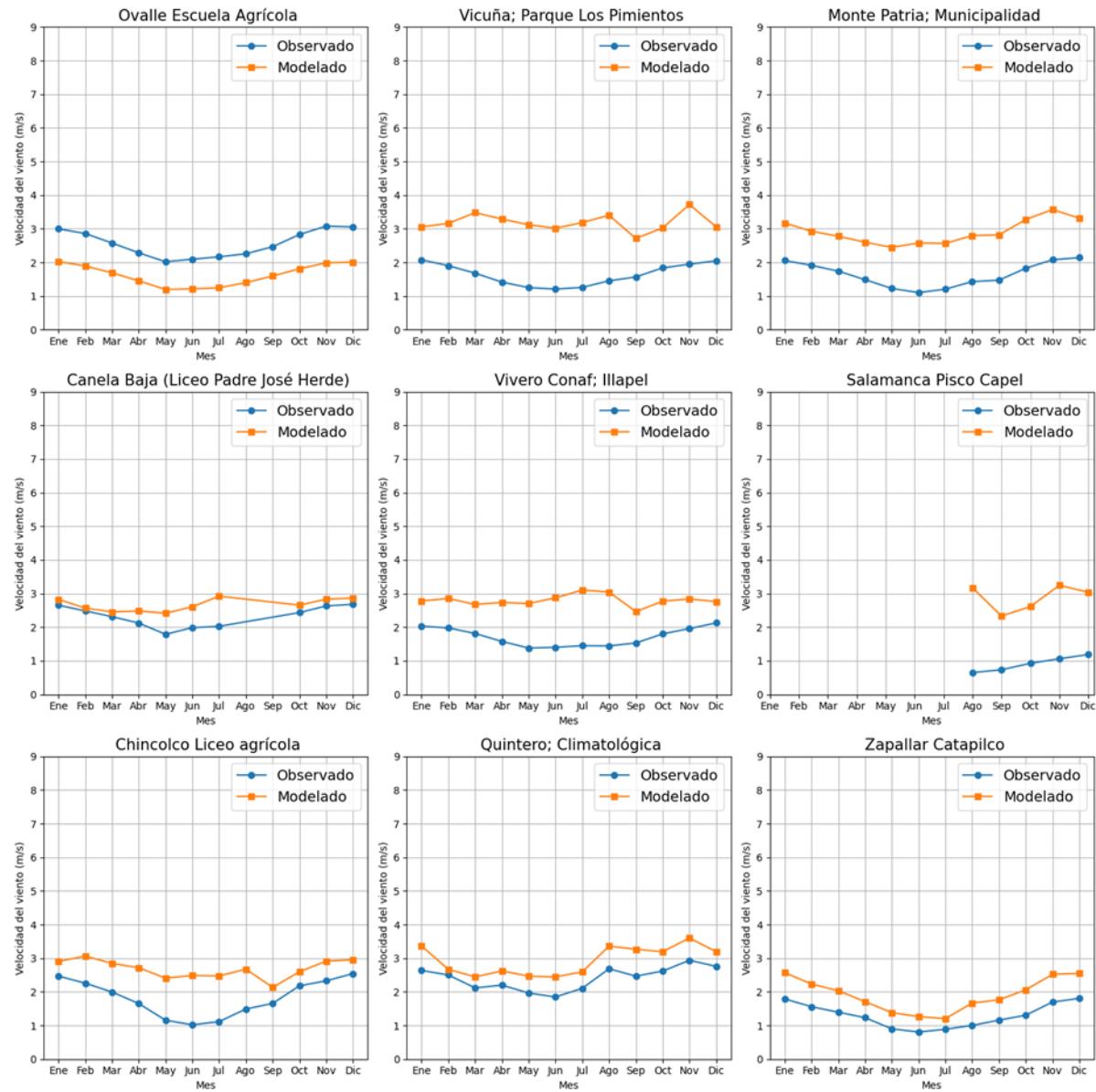


Figura 4-4 Ciclo anual de la velocidad del viento, simulación (naranjo) y estaciones meteorológicas(azul)

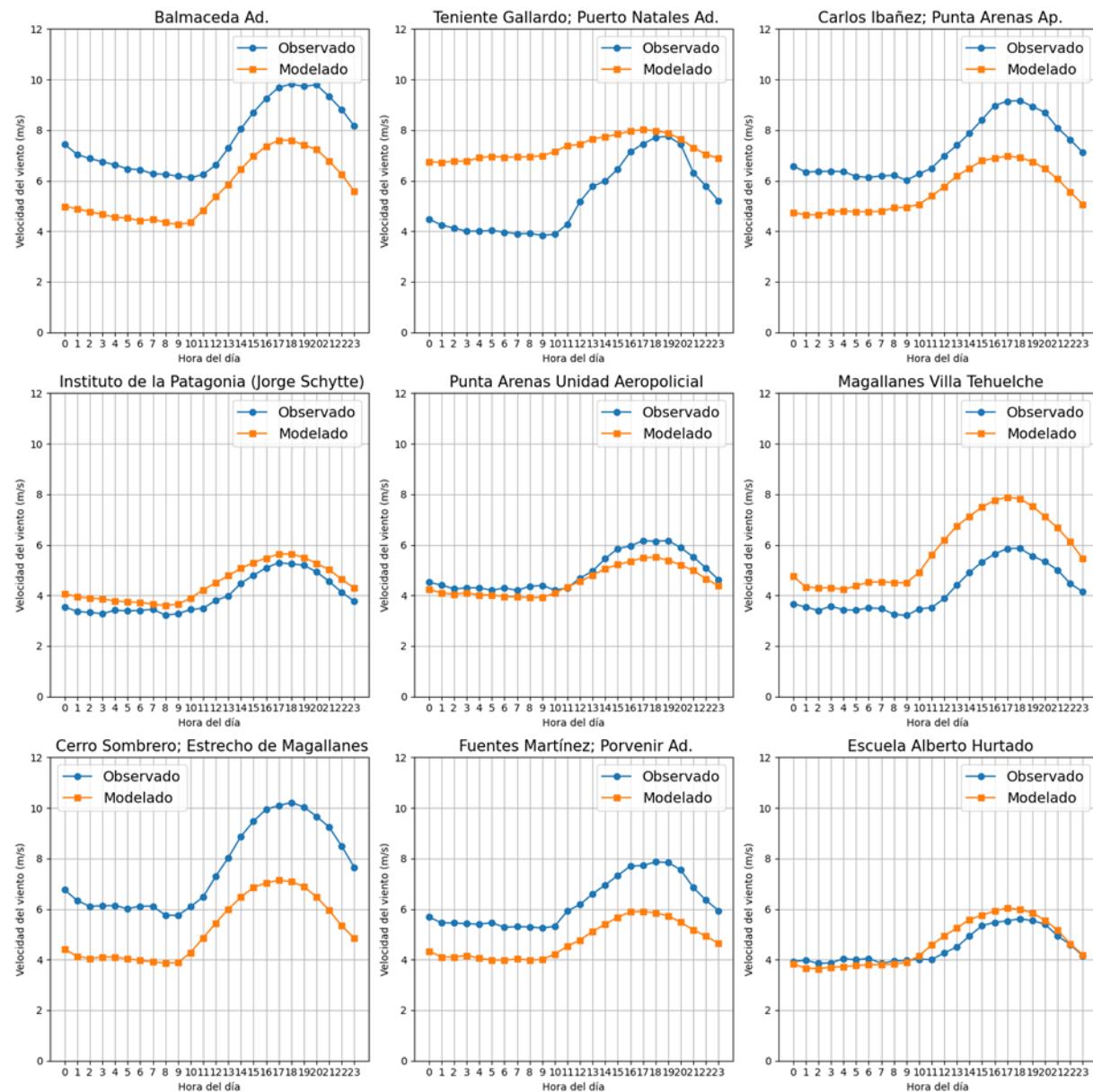


Figura 4-5 Ciclo diario de la velocidad del viento, simulación (naranjo) y estaciones meteorológicas DMC(azul)

4.2.4.1 Consideraciones finales de la validación *in-situ*

En conjunto, estos resultados permiten afirmar que el modelo WRF, en su configuración actual, ofrece una representación consistente y confiable del recurso eólico en zonas offshore cercanas a la costa chilena. La concordancia estadística con las observaciones *in-situ* valida su uso como herramienta de planificación energética y análisis de potencial eólico en franjas marítimas de interés estratégico.

Es importante destacar que el rendimiento del modelo es particularmente sólido en zonas abiertas o semiurbanas, donde las condiciones de exposición del anemómetro son adecuadas y las perturbaciones locales son mínimas. Esta característica permite utilizar los resultados de la simulación como base para la definición preliminar de zonas aptas para desarrollo eólico marino, análisis de estacionalidad, y estudios de integración energética.

Asimismo, la coherencia temporal capturada por el modelo –tanto en los ciclos anuales como diarios– representa un activo clave para estudios de variabilidad y escenarios futuros de operación, especialmente en un contexto de creciente incorporación de fuentes intermitentes a la matriz energética nacional.

4.3 Validación de resultados de modelación de viento offshore mediante comparación con productos satelitales

Dada la limitada disponibilidad de mediciones directas sobre el océano, la validación de la modelación del viento offshore requiere complementar las observaciones *in situ* con fuentes de información independientes que permitan evaluar el desempeño del modelo sobre amplias áreas marinas. En este contexto, los productos satelitales de viento superficial constituyen una referencia ampliamente utilizada en estudios de recurso eólico marino a nivel internacional, debido a su cobertura espacial continua y a su consistencia temporal.

Para el Explorador Eólico Marino, la validación satelital se realizó mediante la comparación de los campos de viento simulados por el modelo WRF con el producto NOAA NCEI Blended SeaWinds (NBS), versión 2.0, el cual proporciona estimaciones de velocidad del viento superficial sobre el océano a partir de la combinación de observaciones de múltiples satélites dispersómetros. Este producto presenta una resolución espacial de 0,25° y una resolución temporal de 6 horas, y ha sido utilizado extensamente en aplicaciones meteorológicas, oceanográficas y energéticas.

El uso de un producto satelital combinado permite evaluar de manera robusta la coherencia espacial del viento simulado, reduciendo las limitaciones asociadas a la cobertura individual de un único satélite. La comparación se desarrolló considerando distintos dominios geográficos a lo largo de la costa chilena, lo que permite analizar el desempeño del modelo bajo diversos regímenes atmosféricos y condiciones oceánicas.

Este enfoque de validación complementa la comparación con estaciones meteorológicas costeras presentada en la sección anterior, aportando un respaldo adicional sobre la capacidad del modelo para reproducir los principales patrones espaciales del régimen de vientos marinos. En conjunto, los resultados fortalecen la confianza en el uso de la base de datos eólica offshore para análisis preliminares, planificación energética y evaluación exploratoria del potencial eólico marino, en coherencia con los alcances definidos para el Explorador Eólico Marino.

4.3.1 Resultados por dominio geográfico

4.3.1.1 *Dominio Norte:*

La Figura 4-6 muestra la correlación entre el modelo WRF y los datos satelitales se mantiene elevada durante la mayor parte del año, alcanzando valores cercanos a 0.8 en el mar interior y disminuyendo levemente hacia la costa. Esta disminución se explica por la menor resolución espacial de los sensores (~25 km) y por el hecho de que no están optimizados para medir sobre tierra firme. Cabe destacar que en verano la correlación se ve moderadamente afectada por la presencia del invierno altiplánico o boliviano, que introduce una componente convectiva más variable difícil de capturar con precisión por los sensores satelitales. Aun así, el modelo logra representar de manera realista las tendencias predominantes, especialmente en el borde costero y sobre el océano abierto.

4.3.1.2 *Dominio Centro:*

En esta región (descrita en la Figura 4-7), la correlación muestra altos niveles durante primavera y verano, con una leve disminución en los meses de invierno, atribuible al paso de ciclones extratropicales que inducen transiciones rápidas en la dirección y magnitud del viento. Estas condiciones meteorológicas dinámicas reducen la coherencia instantánea entre modelo y satélite, pero el promedio estacional se mantiene dentro de márgenes aceptables. El sesgo se encuentra cercano a cero, lo que indica una alta precisión del modelo en la estimación de velocidades medias.

4.3.1.3 *Dominio Chiloé:*

En la Figura 4-8 se observa un comportamiento similar al dominio Centro, con correlaciones superiores a 0.7 en la mayor parte del dominio. Durante el invierno, los eventos de paso frontal y la alta nubosidad impactan marginalmente la correlación, pero el patrón general de distribución del viento es correctamente reproducido por el modelo. El sesgo es ligeramente positivo, lo que refleja una leve sobreestimación del viento por parte del WRF en este sector, aunque sin comprometer su utilidad operativa.

4.3.1.4 *Dominio Sur:*

En la Figura 4-9 los valores de correlación se mantienen relativamente estables a lo largo del año, con un desempeño sólido durante primavera y verano. En otoño se evidencia una

reducción en la correlación, posiblemente vinculada al aumento de episodios de transición atmosférica. El RMSE sigue siendo bajo, lo cual sugiere que el modelo representa adecuadamente las condiciones medias, incluso en presencia de fenómenos transitorios.

4.3.1.5 *Dominios Austral A y B:*

En estos dominios de latitudes extremas (Figura 4-10 y Figura 4-11), la validación satelital pone a prueba la capacidad del modelo en zonas de alta energía eólica y escasa cobertura observacional. A pesar de estas condiciones desafiantes, el modelo mantiene correlaciones robustas, con sesgos negativos leves en algunos sectores que sugieren una ligera subestimación del viento en invierno, particularmente en zonas de alta exposición como el paso de Drake. Este comportamiento es coherente con la naturaleza más errática y turbulenta del viento en estas latitudes. En verano, sin embargo, se alcanza una concordancia sobresaliente, lo que resulta altamente prometedor para estudios de diseño de aprovechamiento del recurso eólico marino en el extremo sur del país.

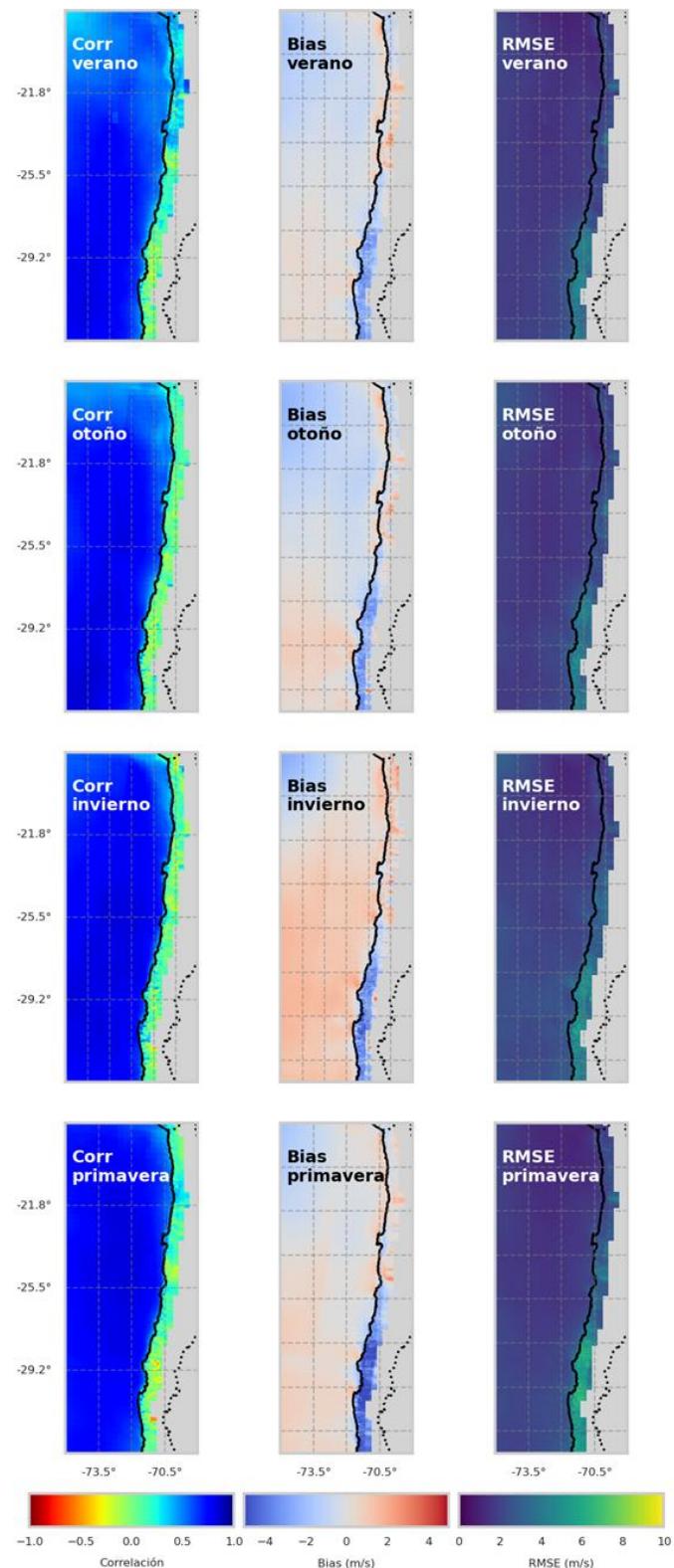


Figura 4-6 Validación satelital por temporada del año. dominio Norte.

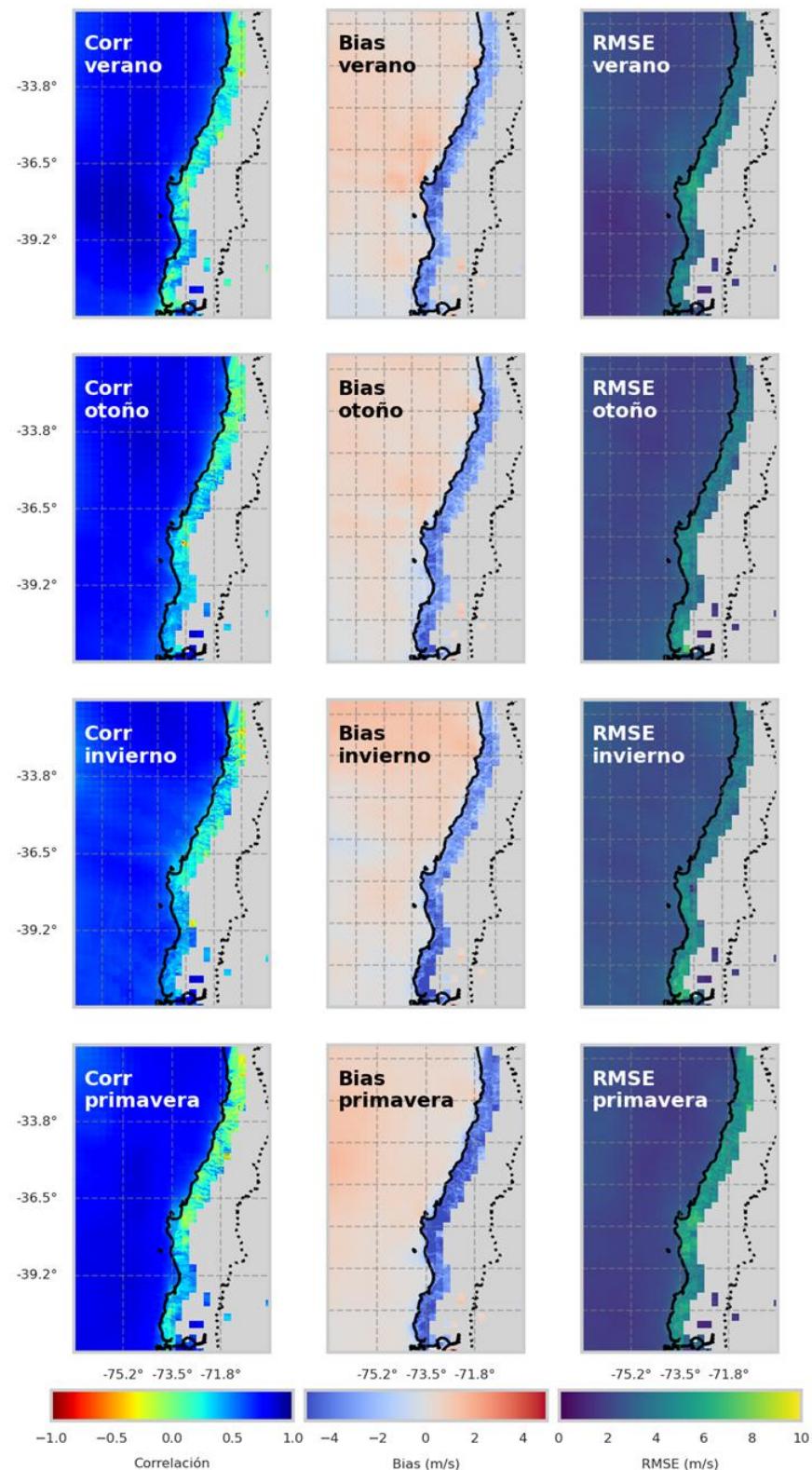


Figura 4-7 Validación satelital por temporada del año. dominio Centro

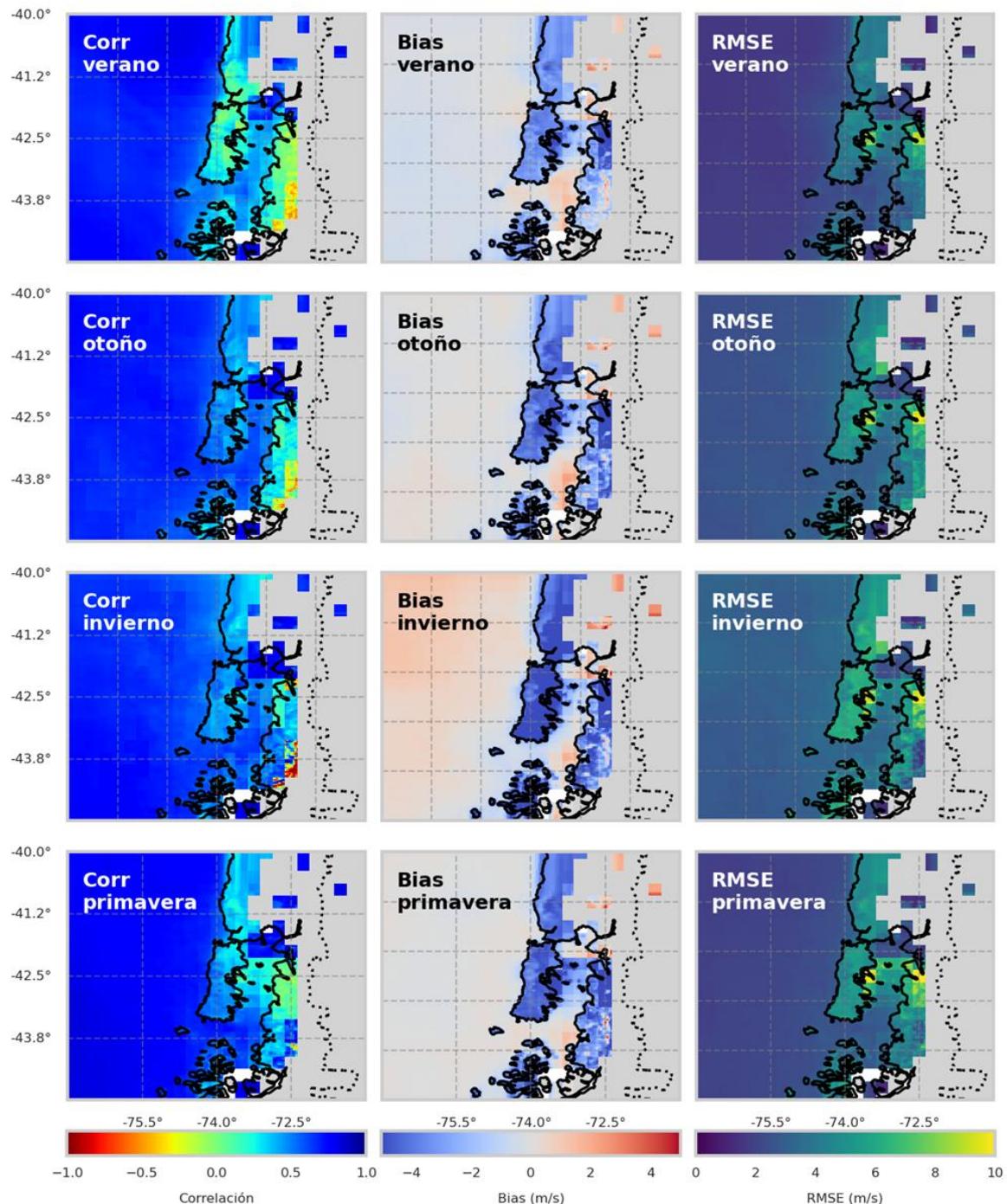


Figura 4-8 Validación satelital por temporada del año. dominio Chiloé

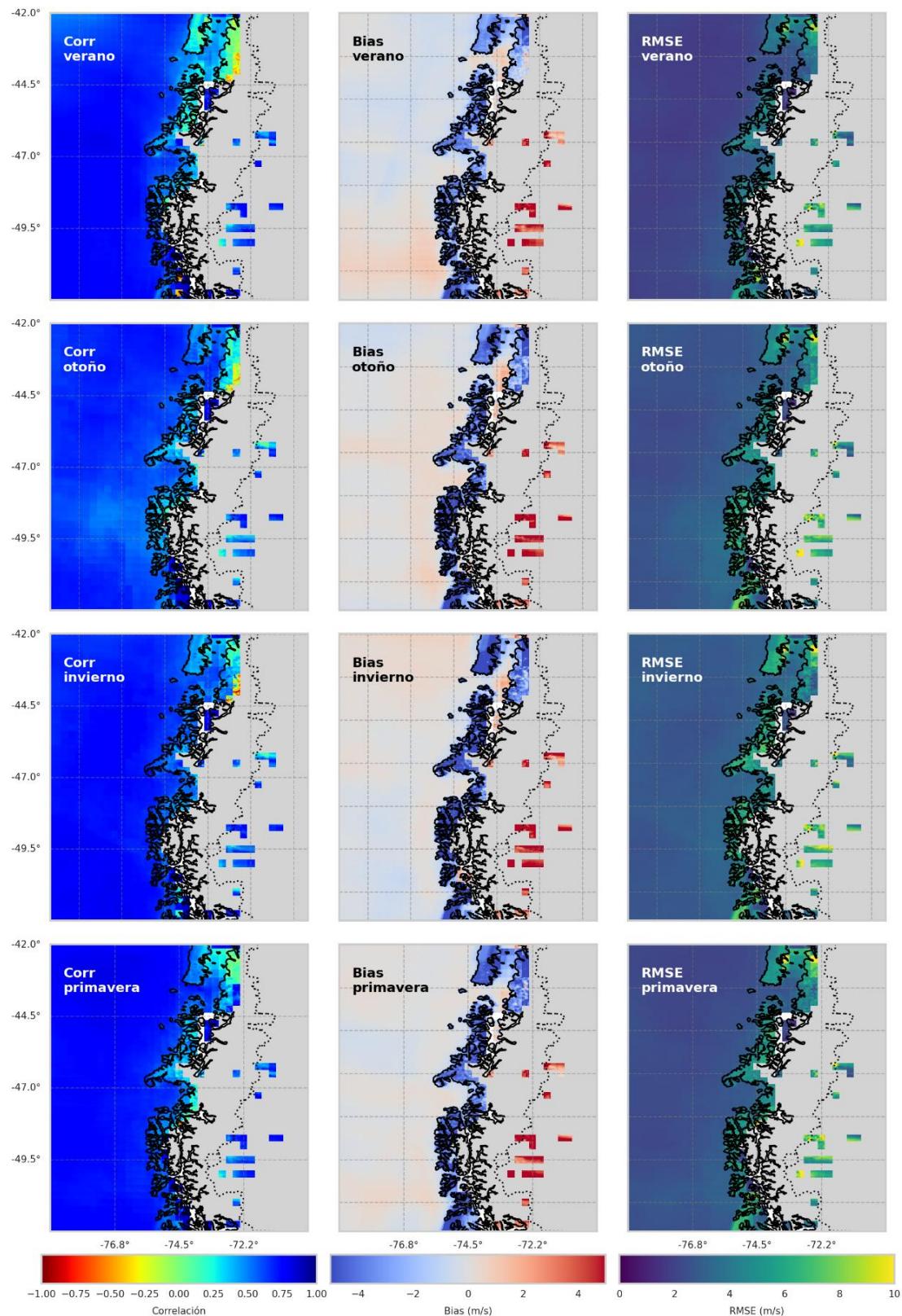


Figura 4-9 Validación satelital por temporada del año. dominio Sur

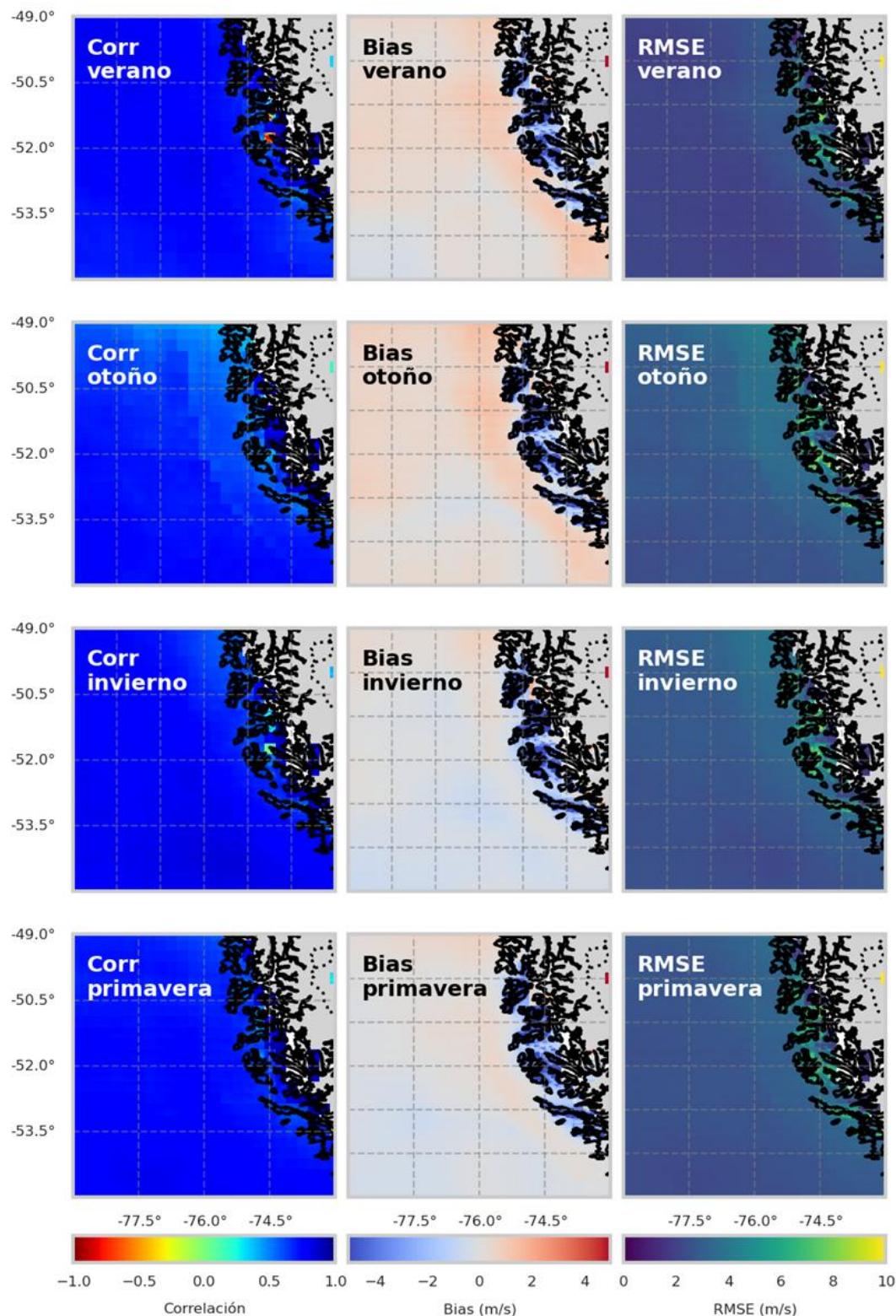


Figura 4-10 Validación satelital por temporada del año. dominio Austral B

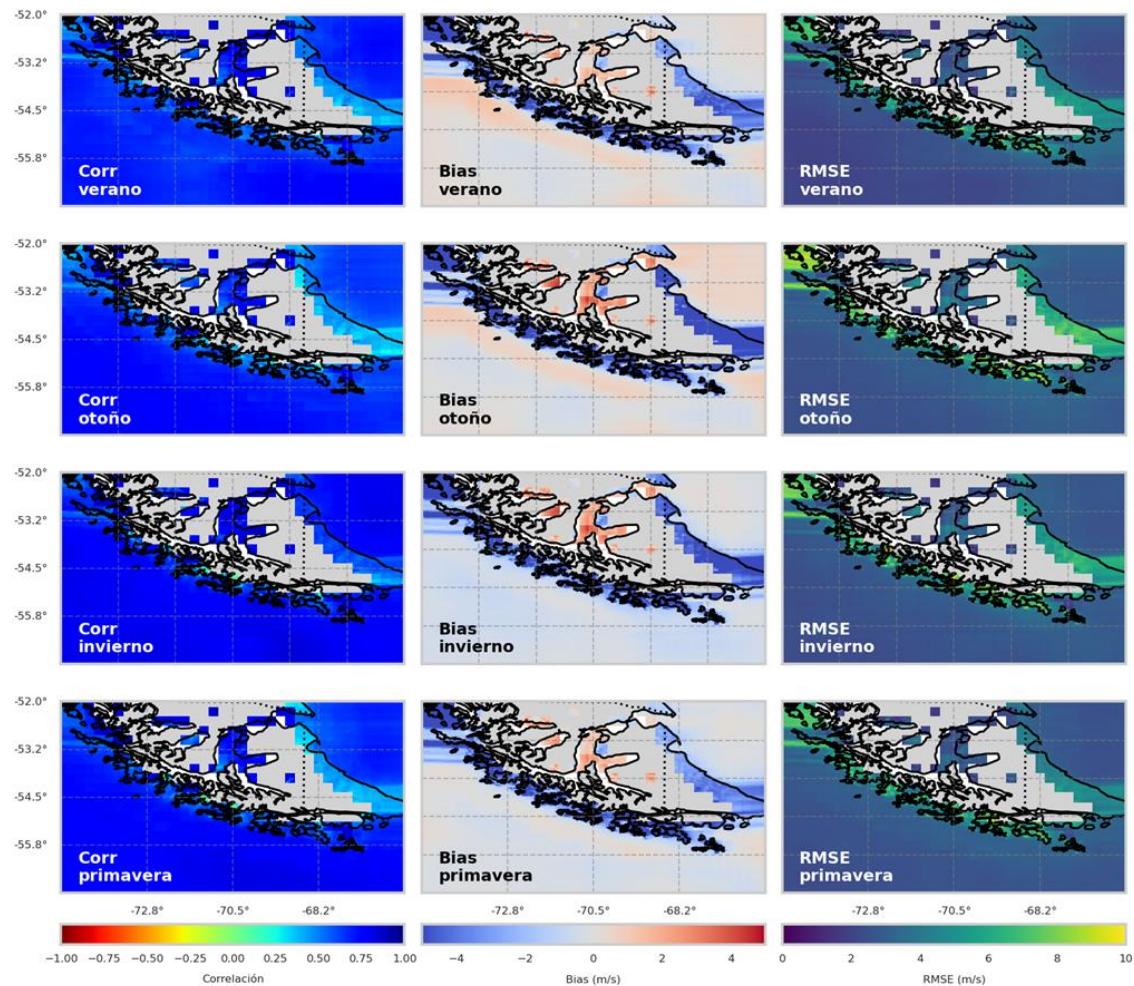


Figura 4-11 Validación satelital por temporada del año. dominio Austral A

4.3.2 Análisis espacial de sesgo y RMSE

Los mapas comparativos generados permiten identificar patrones coherentes de sesgo: un sesgo negativo en el norte, que se atenúa hacia la zona central y luego se torna ligeramente positivo, para volver a valores negativos en el sur de Chiloé. Esta oscilación en el sesgo es consistente con la transición de regímenes sinópticos dominantes y no representa un deterioro del modelo, sino una adaptación natural a las condiciones atmosféricas variables del litoral chileno.

El RMSE, por su parte, permanece en valores bajos sobre la mayor parte del océano, confirmando que el modelo no solo reproduce bien las tendencias, sino que no incurre en grandes errores absolutos, un atributo crucial para aplicaciones prácticas como la

estimación de factor de planta o la planificación de operaciones energéticas eólicas offshore.

4.3.3 Consideraciones finales de la validación satelital

La comparación entre los resultados del modelo WRF y los productos satelitales revela un desempeño muy satisfactorio del modelo en la representación del viento sobre el océano a lo largo del litoral chileno. Las altas correlaciones observadas en la mayoría de los dominios, especialmente en mar abierto, indican que el modelo reproduce con precisión la dinámica del viento en zonas clave para el desarrollo de iniciativas de aprovechamiento eólico offshore. Este buen ajuste es particularmente relevante dado que las observaciones satelitales constituyen una de las pocas fuentes de referencia disponibles para validar modelos en áreas marinas extensas y de difícil acceso.

El análisis estacional mostró que el modelo es capaz de capturar adecuadamente la variabilidad temporal del recurso eólico en distintos regímenes atmosféricos, incluyendo fenómenos típicos como el invierno altiplánico en el norte, los sistemas frontales en la zona centro-sur y las condiciones altamente dinámicas del extremo austral. Si bien se identifican ciertas variaciones en el sesgo según la estación y el dominio geográfico, estas permanecen dentro de márgenes esperables y no afectan significativamente la utilidad de los resultados para fines energéticos.

Asimismo, los valores bajos de RMSE sobre el océano refuerzan la solidez de la modelación, indicando que los errores absolutos entre simulaciones y observaciones satelitales son reducidos. Esto resulta fundamental para aplicaciones que requieren estimaciones confiables de largo plazo, como el cálculo de factores de planta, la identificación de zonas prioritarias para inversión y la planificación de operaciones marítimas.

En conjunto, los resultados de esta validación satelital respaldan el uso del modelo WRF como una herramienta robusta y precisa para la caracterización del recurso eólico offshore. Su capacidad para reproducir patrones espaciales y estacionales del viento con coherencia frente a observaciones remotas lo convierte en una base técnica sólida para estudios de pre-inversión, diseño preliminar de infraestructura y apoyo a políticas públicas orientadas a la transición energética en Chile.

4.3.4 Conclusión general del proceso de validación

El proceso de validación realizado para el modelo WRF en su aplicación a la estimación del recurso eólico offshore a lo largo de la costa de Chile continental demuestra de manera concluyente su capacidad para reproducir con fidelidad tanto la variabilidad temporal como espacial del viento marino, en escalas horarias, estacionales y anuales.

Por un lado, la comparación con datos in-situ de 61 estaciones meteorológicas costeras operadas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) permitió constatar niveles altos de correlación horaria, especialmente en aquellas estaciones con buena exposición y bajo grado de interferencia local. Esta validación muestra que el modelo es capaz de captar los patrones temporales dominantes, incluyendo la intensidad y ocurrencia del peak vespertino asociado al régimen de brisa marina, así como la estacionalidad del viento en las distintas regiones del país. A pesar de leves sesgos detectados en algunos sectores —como la sobreestimación moderada en zonas del norte y centro—, los errores absolutos se mantuvieron bajos en términos de RMSE, lo que valida su uso como herramienta confiable para simulaciones energéticas.

De forma complementaria, la validación frente a productos satelitales de referencia internacional —proporcionados por NOAA y especializados en el monitoreo del viento superficial marino— aportó evidencia robusta sobre la coherencia espacial de las simulaciones. Las correlaciones obtenidas fueron particularmente elevadas sobre mar abierto, y se mantuvieron en niveles aceptables incluso en dominios con alta variabilidad atmosférica como el extremo austral. Los patrones de sesgo identificados a través de las estaciones del año y entre regiones reflejan variaciones meteorológicas naturales más que deficiencias del modelo, lo que refuerza la confiabilidad global de sus salidas.

Ambas estrategias de validación —in-situ y satelital— convergen en una misma conclusión: la configuración actual del modelo WRF constituye una base técnica robusta para la caracterización del recurso eólico offshore en Chile. Esta validación múltiple, sobre diferentes fuentes de observación y metodologías estadísticas, consolida la posición del modelo como un instrumento operativo de alto estándar para estudios de planificación energética, evaluación de sitios, diseño preliminar de infraestructura y análisis de escenarios de integración renovable.

Los resultados alcanzados no solo respaldan el uso del modelo con fines científicos, sino que también lo posicionan como un componente clave en la toma de decisiones estratégicas del país en materia de desarrollo eólico marino. En un contexto de transición energética, donde la incorporación de fuentes limpias y de alta disponibilidad es una prioridad, contar con herramientas de simulación validadas empíricamente resulta esencial para reducir la incertidumbre, orientar inversiones y fomentar un despliegue ordenado y sustentable del potencial eólico nacional.

5 Explorador Eólico Marino: La herramienta en-línea

El Explorador Eólico Marino es una herramienta en línea de acceso público desarrollada por la Universidad de Chile para el Ministerio de Energía, disponible a través del portal Exploradores de Energía. Esta plataforma gratuita permite a usuarios visualizar, analizar y descargar información asociada al recurso eólico marino sobre el territorio marítimo chileno, integrando variables atmosféricas junto con información oceanográfica y geográfica relevante.

La herramienta está concebida para facilitar una evaluación preliminar del potencial eólico marino, mediante mapas interactivos, agregaciones estadísticas por sitio y funcionalidades de descarga de datos, sin requerir software especializado. Sus resultados están orientados a apoyar etapas tempranas de análisis, estudios exploratorios, comparaciones territoriales y procesos de planificación estratégica en el ámbito de las energías renovables.

El objetivo principal del Explorador Eólico Marino es permitir la consulta, visualización y análisis referencial del recurso eólico en el mar, junto con variables complementarias de contexto —como batimetría, oleaje, transporte marítimo, infraestructura y áreas con restricciones ambientales—, con el fin de apoyar la identificación de zonas de interés y la comprensión de la distribución espacial del recurso eólico marino en Chile.

La plataforma no reemplaza estudios de detalle ni mediciones *in situ*, sino que constituye una herramienta de carácter exploratorio y referencial, diseñada para apoyar la toma de decisiones informadas en fases iniciales de evaluación y planificación.

La herramienta se encuentra disponible en la siguiente dirección web:

<https://eoffshore.exploradorenergia.cl/>

El acceso es directo y no requiere registro previo, únicamente la aceptación de las políticas y condiciones de uso al ingresar. La herramienta es de dominio público y no requiere suscripción ni pago para su utilización. Opera íntegramente en un entorno web y no exige la instalación de software adicional. Por lo mismo, una conexión a Internet es necesaria para la carga de mapas, capas y resultados dinámicos. Se recomienda el uso de navegadores modernos para una correcta visualización y funcionamiento.

La herramienta está diseñada para ser utilizada por usuarios con distintos niveles de conocimiento técnico, desde público general hasta especialistas en energía, planificación territorial y análisis geoespacial.

5.1 Vista general de la interfaz

La interfaz del Explorador Eólico Marino ha sido diseñada para permitir una exploración intuitiva y progresiva del recurso eólico offshore y de la información geográfica asociada, combinando un visor cartográfico central con paneles de control laterales que organizan las distintas funcionalidades de la herramienta.

Desde el punto de vista del usuario, la plataforma se estructura en torno a un flujo de uso secuencial, en el cual se definen primero las variables y configuraciones de análisis, para luego seleccionar un sitio específico en el mar y revisar los resultados asociados.

5.1.1 Componentes principales de la interfaz

La interfaz se compone de los siguientes elementos principales:

- Visor cartográfico central

Ocupa la mayor parte de la pantalla y constituye el elemento principal de interacción. En este visor se despliegan las capas de información seleccionadas, tales como el recurso eólico, variables marítimas, infraestructura y áreas de relevancia para la industria. El usuario puede navegar libremente mediante zoom y desplazamiento, y seleccionar puntos específicos directamente sobre el mapa.

- Paneles de configuración y análisis

Ubicado de forma lateral, este panel agrupa los controles que permiten:

- Seleccionar la variable o recurso a visualizar.
- Definir parámetros asociados al recurso eólico (por ejemplo, altura de evaluación o tipo de aerogenerador).
- Configurar agregaciones estadísticas temporales y espaciales.
- Acceder a la leyenda dinámica y ajustar rangos de visualización.

- Panel de información del sitio seleccionado

Una vez seleccionado un punto en el mar, la interfaz despliega información detallada asociada a dicha ubicación, incluyendo características del sitio y estadísticas del viento calculadas para las configuraciones definidas por el usuario.

- Panel de resultados, gráficos y descargas

Permite visualizar gráficos asociados a la serie de datos del punto seleccionado y descargar los resultados en formatos tabulares estándar para su análisis posterior.

- Controles de navegación y mapa base

Incluyen herramientas para cambiar el tipo de mapa base, controlar el nivel de zoom y facilitar la lectura espacial del territorio marítimo.

5.1.2 Flujo general de uso

El uso típico del Explorador Eólico Marino sigue el siguiente flujo lógico:

1. Selección del recurso o variable de interés, definiendo los parámetros asociados (por ejemplo, altura del viento o aerogenerador).
2. Configuración de las agregaciones estadísticas, tanto temporales como espaciales, según el objetivo del análisis.
3. Visualización del recurso en el mapa, apoyada por la leyenda dinámica.
4. Selección de un punto de interés en el mar, directamente sobre el visor cartográfico.
5. Revisión de la información del sitio, estadísticas del viento y gráficos asociados.
6. Descarga de resultados, para análisis externo o documentación.
7. Utilizar información geográfica relevante para verificar características de la zona de interés

Este diseño permite que el usuario avance desde una visión regional y exploratoria hacia un análisis puntual de sitios específicos, manteniendo siempre la trazabilidad entre las configuraciones seleccionadas y los resultados obtenidos.

5.2 Módulo Recurso y visualización en el mapa

El Módulo Recurso corresponde al conjunto de controles que permiten definir qué variable eólica se analiza y cómo se representa espacialmente en el visor cartográfico. Este módulo constituye el punto de partida del análisis, ya que las decisiones tomadas en él determinan tanto la visualización del mapa como los cálculos y estadísticas que se obtienen posteriormente para los sitios seleccionados.

5.2.1 Selección del recurso eólico

El Explorador Eólico Marino permite seleccionar distintas variables asociadas al recurso eólico offshore, las cuales se visualizan directamente sobre el mapa en forma de capas raster continuas. Entre las variables disponibles se incluyen, entre otras:

- Velocidad del viento

Representa la velocidad media del viento modelada para el dominio marítimo, permitiendo identificar zonas con mayor o menor potencial eólico.

- Factor de planta

Corresponde a un indicador energético derivado, que expresa el porcentaje de energía efectivamente generable en relación con la potencia nominal de un aerogenerador, considerando la distribución del viento y la curva de potencia del equipo seleccionado.

La selección del recurso define automáticamente la simbología, la leyenda y los rangos de valores que se muestran en el mapa.

5.2.2 Altura de evaluación del recurso

Para el caso de variables asociadas directamente al viento, el módulo permite definir la altura de evaluación, correspondiente a la altura sobre el nivel del mar a la cual se estima el recurso eólico. La plataforma ofrece un rango de 30 alturas discretas, típicamente entre 10 y 300 metros, coherente con alturas de buje de aerogeneradores offshore modernos.

La altura seleccionada impacta directamente en:

- Los valores visualizados en el mapa.
- Las estadísticas calculadas para los puntos seleccionados.
- Los resultados descargables.

Este control permite al usuario explorar cómo varía el recurso con la altura y realizar comparaciones preliminares entre distintas configuraciones tecnológicas.

5.2.3 Selección de aerogenerador (factor de planta)

Cuando se selecciona el factor de planta como variable de análisis, la interfaz habilita un control adicional para definir el modelo de aerogenerador. Esta selección determina la curva de potencia utilizada para el cálculo del indicador energético.

De este modo, el usuario puede evaluar de forma exploratoria cómo distintos tipos de aerogeneradores offshore influyen en el desempeño esperado del recurso en distintas zonas del mar chileno.

5.2.4 Visualización del recurso en el mapa

Una vez definido el recurso y sus parámetros, la información se despliega en el visor cartográfico central como una capa raster continua, superpuesta al mapa base seleccionado. La visualización se apoya en una leyenda dinámica, que muestra:

- El rango de valores representados.
- La escala de colores asociada.
- El título dinámico que resume la configuración activa (variable, altura, agregaciones y, cuando corresponde, aerogenerador).

Adicionalmente, el usuario puede ajustar la transparencia de la capa, lo que facilita la lectura simultánea del recurso eólico junto con capas geográficas complementarias, como batimetría, infraestructura o áreas marinas.

La visualización del recurso en el mapa permite una interpretación espacial inmediata, identificando patrones regionales, gradientes y zonas de interés que pueden ser posteriormente analizadas en mayor detalle mediante la selección de sitios específicos.

5.3 Módulo de agregaciones del mapa

El Módulo de Agregaciones permite definir cómo se procesan y resumen temporalmente los datos del recurso eólico antes de su visualización en el mapa y del cálculo de estadísticas para los sitios seleccionados. Este módulo es fundamental para interpretar correctamente los resultados, ya que determina el período, la frecuencia y el tipo de estadístico que representa cada valor mostrado.

Las agregaciones se aplican tanto a la visualización espacial del recurso como a los resultados numéricos y gráficos asociados a un punto específico en el mar, asegurando coherencia entre el mapa y la información analítica.

5.3.1 Agregación estadística

La herramienta permite seleccionar distintos estadísticos de agregación, que resumen la serie temporal de datos disponible para cada celda del modelo y para cada punto seleccionado. Entre las opciones disponibles se incluyen, entre otras:

- Promedio (mean): representa el valor medio del recurso para el período considerado.
- Máximo (max): muestra el valor máximo registrado en la serie temporal.
- Mínimo (min): muestra el valor mínimo registrado.
- Desviación estándar (std): entrega una medida de la variabilidad del recurso.
- Fecha específica: permite visualizar el valor correspondiente a una fecha y hora determinada.

La selección del estadístico influye directamente en la interpretación del recurso, permitiendo analizar tanto su comportamiento medio como sus extremos y su variabilidad.

5.3.2 Agregación intradiaria

Adicionalmente, el módulo permite definir agregaciones intradiarias, orientadas a capturar patrones horarios del viento. Estas opciones permiten restringir el análisis a:

- Todo el día (all).
- Horario diurno (day).
- Horario nocturno (night).
- Horas específicas, seleccionadas por el usuario.

Este tipo de agregación resulta especialmente útil para analizar ciclos diarios del viento, evaluar ventanas operacionales o estudiar diferencias entre condiciones diurnas y nocturnas, relevantes tanto para la generación energética como para operaciones marítimas.

5.3.3 Agregación anual y estacional

El Explorador Eólico Marino permite también definir agregaciones anuales o estacionales, mediante la selección de:

- Meses específicos del año.
- Estaciones (por ejemplo, verano, otoño, invierno o primavera).

Esta funcionalidad facilita el análisis de la variabilidad estacional del recurso eólico marino, permitiendo identificar períodos con mayor o menor potencial, así como contrastar comportamientos entre distintas épocas del año.

5.3.4 Uso combinado de agregaciones

Las distintas opciones de agregación pueden combinarse de manera coherente, permitiendo, por ejemplo:

- Visualizar el promedio estacional diurno del viento.
- Analizar el máximo horario nocturno durante un conjunto de meses.
- Evaluar una fecha específica bajo una configuración de altura determinada.

El diseño del módulo asegura que las agregaciones seleccionadas se reflejen explícitamente en la leyenda del mapa y en los títulos dinámicos de la visualización,

manteniendo la trazabilidad entre las configuraciones definidas por el usuario y los resultados obtenidos.

5.4 Leyenda interactiva e interpretación visual

La leyenda interactiva cumple un rol central en la interpretación de la información visualizada en el visor cartográfico, ya que permite comprender y controlar de manera explícita cómo se representan los valores del recurso eólico en el mapa. Este componente no solo informa los rangos de valores y la escala cromática utilizada, sino que también entrega herramientas activas para ajustar la visualización según los objetivos del análisis.

La leyenda se actualiza dinámicamente en función del recurso seleccionado, la altura de evaluación, las agregaciones estadísticas definidas y, cuando corresponde, el aerogenerador seleccionado.

5.4.1 Contenido de la leyenda

La leyenda muestra de forma integrada los siguientes elementos:

- Título dinámico, que resume la configuración activa del análisis, incluyendo:
 - Variable seleccionada (por ejemplo, velocidad del viento o factor de planta).
 - Altura de evaluación del recurso.
 - Tipo de agregación estadística y temporal aplicada.
 - Modelo de aerogenerador, cuando corresponde.
- Escala de colores, que representa gráficamente el rango de valores del recurso visualizado.
- Valores mínimo y máximo de visualización, que definen el intervalo de datos que será efectivamente coloreado en el mapa.

Esta información permite al usuario mantener trazabilidad entre las configuraciones seleccionadas y la representación cartográfica resultante.

5.4.2 Ajuste dinámico de colores y rangos

La leyenda permite una configuración interactiva avanzada de la visualización del recurso, mediante dos mecanismos complementarios:

- Cambio de paleta de colores

Al hacer clic sobre los extremos de la escala cromática, el usuario puede seleccionar distintas combinaciones de colores a partir de una paleta dinámica, lo

que facilita adaptar la visualización a distintos criterios analíticos, preferencias visuales o necesidades de contraste.

- Definición de umbrales mínimo y máximo de visualización

El usuario puede modificar los valores mínimo y máximo que delimitan el rango de datos que será coloreado en el mapa. Estos valores no modifican los datos originales ni los cálculos, sino que controlan exclusivamente la representación visual.

Cuando se define un umbral mínimo mayor que el valor mínimo real de los datos, todas las celdas con valores inferiores a dicho umbral quedan sin colorear (transparentes). De forma análoga, si se define un umbral máximo menor que el valor máximo real, las celdas con valores superiores a ese umbral también quedan sin colorear.

Este comportamiento permite, por ejemplo:

- Resaltar únicamente zonas que superan un cierto valor crítico del recurso.
- Excluir visualmente valores extremos que no son relevantes para un análisis específico.
- Comparar áreas dentro de un rango operativo o tecnológico definido por el usuario.

5.4.3 Interpretación de valores fuera de rango

Las áreas del mapa que quedan fuera del rango definido por los umbrales mínimo y máximo no se representan con colores, lo que indica explícitamente que sus valores no cumplen con los criterios visuales establecidos. Esta ausencia de color no implica ausencia de datos, sino una decisión consciente de filtrado visual por parte del usuario.

Es importante considerar que los valores extremos utilizados como referencia inicial en la leyenda corresponden a los valores agregados del dominio completo del modelo, y no necesariamente a un subconjunto específico del análisis actual. Por ello, se recomienda revisar siempre el título dinámico de la leyenda y los rangos definidos antes de interpretar patrones espaciales o realizar comparaciones entre zonas.

La leyenda interactiva constituye así una herramienta fundamental para realizar una exploración visual controlada, transparente y reproducible del recurso eólico marino, permitiendo adaptar la representación del mapa a distintos objetivos analíticos sin alterar la base de datos subyacente.

5.5 Descripción de sitio seleccionado

El Explorador Eólico Marino permite realizar análisis puntuales mediante la selección de un sitio directamente sobre el visor cartográfico. Al hacer clic sobre el mar dentro del dominio de la herramienta, se despliega automáticamente un panel que entrega (i) una caracterización del sitio y (ii) estadísticas descriptivas del recurso eólico evaluado para la configuración activa.

5.5.1 Selección de un punto en el mapa

Para consultar un sitio, el usuario debe hacer clic sobre el mapa en una ubicación marítima dentro del área cubierta por el explorador. La selección del punto activa el panel de resultados puntuales, el cual se actualiza cada vez que se selecciona un nuevo sitio. Este análisis puntual es coherente con la configuración definida por el usuario en los módulos previos (recurso/variable, altura, agregaciones, y aerogenerador cuando aplique).

5.5.2 Descripción del Sitio

El bloque Descripción del Sitio entrega información geográfica y oceanográfica básica para contextualizar la ubicación seleccionada. Entre los campos típicos se incluyen:

- Latitud y Longitud del punto seleccionado (coordenadas geográficas).
- Profundidad del mar (m), como parámetro relevante para evaluar alternativas de fundaciones (fijas o flotantes) y restricciones de instalación.
- Distancia al continente (km), útil para una primera aproximación logística (conexión, operación y mantenimiento).
- Distancia a isla (km), como referencia adicional de proximidad a zonas insulares y su potencial relación con restricciones o condiciones particulares.
- Inclinación ($^{\circ}$) del fondo oceánico y
- Altura de oleaje (m), variables que aportan contexto para una evaluación preliminar de condiciones marinas del sitio.

Nota: estos parámetros describen el sitio seleccionado y no sustituyen estudios específicos de ingeniería u oceanografía para proyectos.

5.5.3 Estadísticas del viento

El bloque Estadísticas del viento presenta un resumen cuantitativo del recurso eólico evaluado en el sitio, incluyendo la altura de viento evaluado (m) (coherente con la altura seleccionada en el módulo de recurso) y un conjunto de estadísticos descriptivos de la serie temporal del punto.

Los indicadores típicamente reportados incluyen:

- Velocidad mínima y máxima (m/s): valores extremos de la serie, relevantes para entender rangos operacionales y condiciones exigentes.
- Velocidad promedio (m/s): medida central para comparación preliminar entre sitios.
- Percentiles (por ejemplo P5 y P95): entregan un rango probabilístico para interpretar condiciones típicas y extremas sin depender exclusivamente de mínimos/máximos.

Adicionalmente, el panel incluye un mensaje informativo (tooltip) que indica que las estadísticas están calculadas sobre el año de modelación 2023 y con una resolución espacial de 3 km, lo que refuerza el carácter referencial del análisis puntual y la escala a la cual debe interpretarse.

5.6 Gráficos y descarga de resultados

Además de la visualización cartográfica y de las estadísticas resumidas por sitio, el Explorador Eólico Marino permite acceder a un conjunto de gráficos y productos temporales asociados al punto seleccionado. Estos recursos están orientados a facilitar la comprensión de la variabilidad temporal del viento, tanto a escala horaria como diaria, mensual y estacional, así como a entregar insumos visuales útiles para evaluaciones preliminares del recurso.

Los gráficos disponibles se generan de forma dinámica y son coherentes con la configuración activa del análisis (variable, altura de evaluación, agregaciones temporales y aerogenerador, cuando corresponde).

5.6.1 Tipos de gráficos disponibles

Para cada sitio seleccionado, la herramienta pone a disposición los siguientes tipos de visualización:

5.6.1.1 *Datos horarios*

Corresponde a la serie temporal horaria completa del recurso eólico modelado para el sitio seleccionado. Este gráfico permite:

- Analizar la variabilidad intradiaria del viento.
- Identificar eventos extremos o episodios de alta y baja intensidad.
- Evaluar continuidad y persistencia del recurso en el tiempo.

Es especialmente útil para análisis exploratorios de variabilidad de corto plazo y para comprender el comportamiento dinámico del viento a escala horaria.

5.6.1.2 *Promedios diarios*

Representa la serie de valores diarios promedio, obtenidos a partir de los datos horarios. Este gráfico permite:

- Suavizar la variabilidad horaria.
- Identificar tendencias de corto y mediano plazo.
- Comparar períodos consecutivos de manera más estable.

Este producto resulta adecuado para evaluaciones preliminares de estabilidad diaria del recurso y para análisis comparativos entre distintos sitios.

5.6.1.3 *Promedios mensuales*

Muestra los valores promedio mensuales del recurso eólico para el período de modelación. Permite:

- Analizar la estacionalidad del viento.
- Identificar meses con mayor o menor potencial eólico.
- Apoyar evaluaciones de complementariedad temporal con otras fuentes de energía.

Este tipo de gráfico es particularmente relevante para estudios de planificación energética y análisis de comportamiento estacional del recurso.

5.6.1.4 *Ciclo diario*

Corresponde al perfil horario promedio de un día típico, calculado a partir de la agregación de todos los días del período considerado. Este gráfico permite:

- Identificar patrones sistemáticos a lo largo del día.
- Analizar la presencia de máximos y mínimos horarios recurrentes.
- Evaluar la influencia de fenómenos como brisas marinas.

Es un insumo clave para comprender la estructura intradiaria del viento y su relación con posibles ventanas operacionales.

5.6.1.5 *Perfil mensual-horario*

Este gráfico combina la dimensión mensual y horaria, mostrando cómo varía el viento a lo largo del día para cada mes del año. Permite:

- Analizar simultáneamente estacionalidad e intradiariedad.
- Identificar meses con patrones horarios más favorables.
- Evaluar diferencias en el régimen diario del viento según la época del año.

Este producto ofrece una visión sintética y potente de la variabilidad temporal del recurso eólico offshore.

5.6.1.6 *Rosa de viento*

La rosa de viento representa la distribución de direcciones y magnitudes del viento en el sitio seleccionado. Permite:

- Identificar direcciones predominantes del viento.
- Analizar la frecuencia relativa de distintos rangos de velocidad.
- Apoyar evaluaciones preliminares de orientación y diseño conceptual de parques eólicos offshore.

Este tipo de gráfico es ampliamente utilizado en estudios eólicos y constituye un complemento fundamental a los análisis de velocidad del viento.

5.6.2 Descarga de datos

La herramienta permite descargar los datos asociados al punto seleccionado en formatos tabulares estándar, tales como CSV y Excel, manteniendo coherencia con la configuración activa al momento de la descarga.

Los archivos descargados contienen la serie de datos utilizada para generar los gráficos y estadísticas, facilitando su uso en análisis externos, elaboración de informes o integración con otras herramientas de evaluación.

5.6.3 Consideraciones sobre el uso de los gráficos y datos

Tanto los gráficos como los datos descargados mantienen el carácter referencial y exploratorio de la herramienta. Corresponden a resultados de modelación con una resolución espacial de 3x3 kilómetros y a un período temporal específico (año de modelación 2023).

Se recomienda que su uso posterior incluya siempre una referencia explícita a su origen, alcance y limitaciones, y que no se sustituyan con ellos estudios de medición en terreno ni análisis de ingeniería de detalle.

5.7 Capas de información geográfica complementaria

Además del recurso eólico, el Explorador Eólico Marino incorpora un conjunto de capas de información geográfica complementaria que permiten contextualizar el potencial eólico offshore desde una perspectiva territorial, ambiental, logística y operativa. Estas capas se organizan en secciones temáticas dentro del menú Información Geográfica Relevante, e incluyen herramientas de activación/desactivación y, en algunos casos, filtros jerárquicos (por ejemplo, por mes, tipo de embarcación o calado).

5.7.1 Información marina (batimetría, pendiente, oleaje y costa)

En la sección Información Marina, la herramienta dispone de capas físicas del medio marino, incluyendo:

- Profundidad del fondo marino basada en batimetría GEBCO (2024).
- Pendiente del fondo marino, derivada de GEBCO (2024).
- Altura significativa de olas, combinando información anual en altamar para 2023 (Servicio Marino de Copernicus) con información cercana a la costa para 2010 proveniente del Explorador Marino del Ministerio de Energía.
- Línea de costa, como referencia espacial base.

Estas capas permiten interpretar el recurso eólico considerando restricciones físicas generales del entorno oceánico.

5.7.2 Transporte marítimo (GMTDS)

La capa Transporte Marítimo representa densidades de tráfico marítimo a partir de datos provenientes de GMTDS (Global Maritime Traffic Density Service), para el período septiembre de 2023 a agosto de 2024.

La herramienta permite activar el transporte marítimo como contexto para identificar zonas con mayor actividad de navegación y apoyar análisis exploratorios de compatibilidad espacial.

Adicionalmente, la capa admite filtros jerárquicos que permiten refinar la visualización según distintos criterios:

- Mes (selección mensual de Ene a Dic).

- Todas las embarcaciones (capa agregada).
- Tipo de embarcación: Carga, Pesqueros, Rompehielos, No Comerciales, Pasajeros, Servicio, Tanque, Otras y Desconocido.
- Calado: 0,1–2 m; 2–5 m; 5–10 m; 10–15 m; 15–20 m; 20 m o más; y Desconocido.
- En espera: embarcaciones en espera versus no en espera.

Estos filtros permiten explorar escenarios específicos, por ejemplo: tráfico pesquero en determinados meses, embarcaciones de gran calado, o zonas de espera.

5.7.3 Infraestructura de transporte marino (MTT + OSM)

La capa Infraestructura de Transporte Marino integra información de:

- Red Portuaria en Macrozonas del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), y
- Infraestructura e instalaciones de transporte marítimo obtenidas desde OpenStreetMap (OSM).

La herramienta permite visualizar la infraestructura de manera agregada (“Todos”) o activarla por componentes individuales (MTT u OSM). Su propósito es apoyar análisis preliminares de logística, conectividad y cercanía a infraestructura portuaria.

5.7.4 Información de áreas marinas (usos y restricciones)

La sección Información de áreas marinas incluye capas asociadas a usos del borde costero, actividades productivas y áreas de protección:

- Caletas pesqueras (IDE SUBPESCA).
- Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) (IDE SUBPESCA).
- Concesiones de acuicultura (IDE SUBPESCA).
- Áreas marinas protegidas (SIMBIO, Ministerio del Medio Ambiente).
- Áreas apropiadas para la acuicultura (IDE SUBPESCA).

Estas capas apoyan evaluaciones exploratorias de compatibilidad territorial y ayudan a identificar tempranamente posibles restricciones o zonas sensibles.

5.7.5 Infraestructura complementaria (energía)

Finalmente, la sección Infraestructura Complementaria incorpora capas energéticas del IDE del Ministerio de Energía, tales como:

- Almacenamiento de energía,
- Líneas de transmisión,
- Subestaciones, y
- Terminales marítimos.

Estas capas permiten contextualizar el recurso eólico offshore respecto de infraestructura energética existente en el territorio.

5.7.6 Proyectos eólicos offshore (dominio público)

La sección Proyectos permite visualizar proyectos eólicos offshore de dominio público como capa vectorial de referencia. La herramienta admite:

- Visualización de todos los proyectos disponibles, o
- Selección de proyectos individuales

Esta capa se utiliza como contexto comparativo para contrastar el recurso eólico con iniciativas existentes o propuestas públicas.

5.8 Mapas base y herramientas de navegación

El Explorador Eólico Marino se apoya en un visor cartográfico interactivo que permite explorar el dominio marítimo mediante herramientas estándar de navegación y la selección de distintos mapas base. Estas funcionalidades facilitan la interpretación espacial de los resultados, la lectura del territorio y la comparación visual entre capas.

5.8.1 Selección de mapa base

La herramienta ofrece opciones de mapa base que permiten adaptar la visualización al tipo de análisis requerido. En términos generales, los mapas base se utilizan para:

- Proveer contexto geográfico (costa, islas, referencias visuales).
- Facilitar la orientación espacial durante la navegación.
- Mejorar la lectura de capas temáticas (recurso eólico y capas complementarias).

Se recomienda seleccionar el mapa base según el objetivo del análisis:

- Mapas con énfasis físico (por ejemplo, elevación/batimetría): útiles para interpretar el entorno oceánico y comprender gradientes del relieve submarino.
- Mapas ruteos o de referencia: útiles para ubicar elementos de infraestructura, áreas pobladas y referencias territoriales generales.
- Mapas satelitales o de imagen: útiles como apoyo visual para el reconocimiento del borde costero, islas y rasgos geográficos relevantes.

El mapa base no modifica los datos del recurso eólico; su función es exclusivamente contextual y visual.

5.8.2 Herramientas de navegación del visor

El visor cartográfico permite navegar el mapa mediante:

- Zoom: acercar o alejar la visualización para analizar patrones regionales o explorar áreas específicas con mayor detalle.
- Desplazamiento (paneo): mover el mapa para recorrer el dominio marítimo.
- Recentrado por interacción: al seleccionar un sitio o activar capas, el usuario puede orientar la exploración hacia zonas específicas de interés.

Estas herramientas permiten alternar entre una exploración a escala nacional y un análisis focalizado en zonas puntuales.

5.8.3 Recomendaciones de uso para análisis comparativos

Para mejorar la consistencia de la interpretación, se recomienda que, al comparar zonas o sitios, el usuario mantenga:

- La misma variable (p. ej., velocidad del viento o factor de planta).
- La misma altura de evaluación.
- Las mismas agregaciones (estadístico, intradiario y estacional/mensual).
- Un criterio consistente de rangos y colores en la leyenda (umbrales mínimo/máximo).

Adicionalmente, cuando se active más de una capa (por ejemplo, recurso + transporte marítimo + áreas marinas), se recomienda ajustar la transparencia del recurso eólico y/o de las capas complementarias para facilitar una lectura integrada sin ocultar información.