

Presentación del Proyecto para optar al título de Ingeniero civil oceánico

EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO EÓLICO MARINO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA BAHÍA DE TONGOY EN BASE AL MODELO NUMÉRICO WRF

ERICK WLADIMIR SOTO ROMÁN

NOVIEMBRE 2024

INTRODUCCIÓN

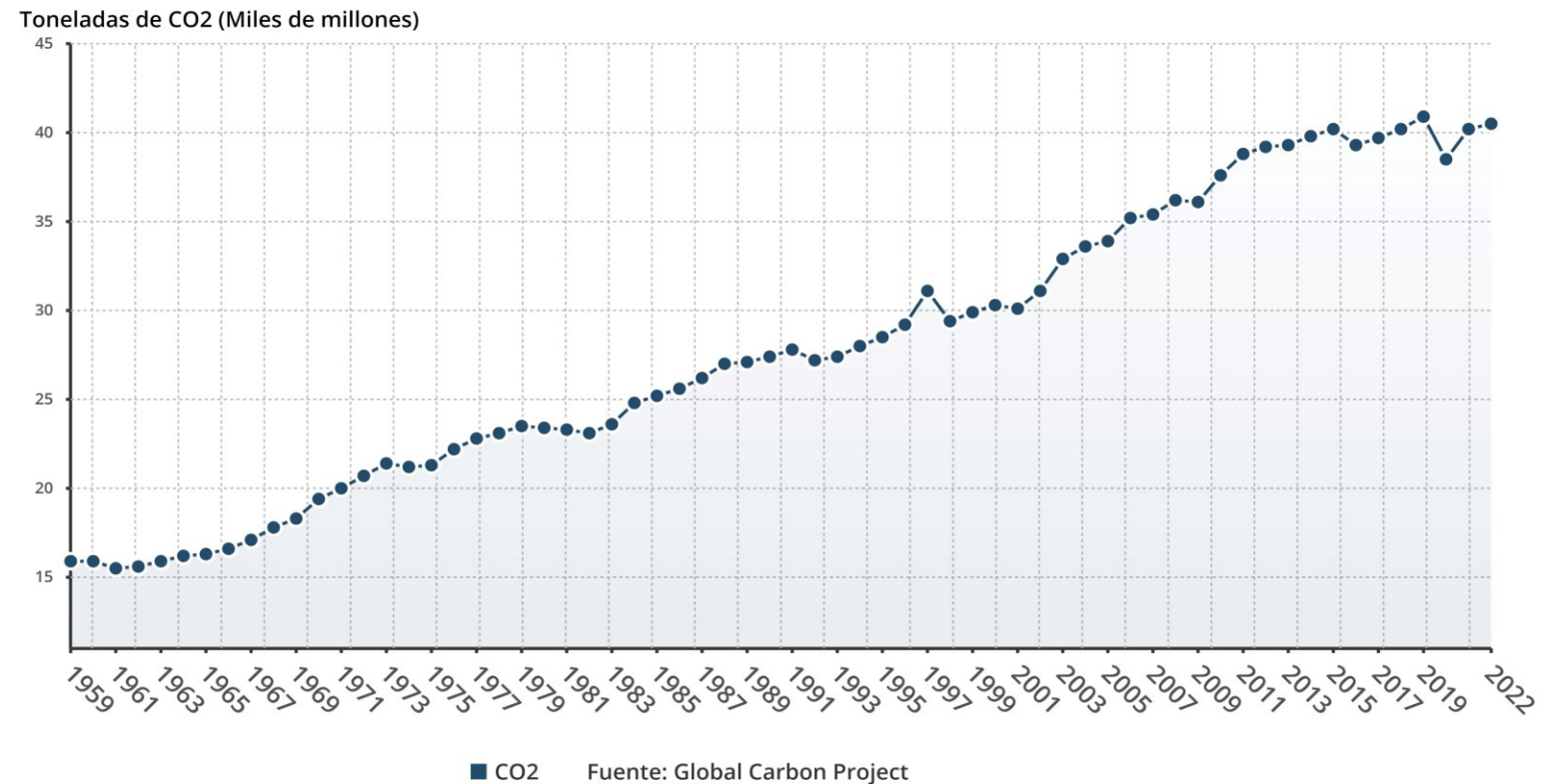
Situación de los GEI
a nivel mundial

Situación de los GEI
en Chile

ERNC en la matriz
energética de Chile

Energía eólica
offshore como
alternativa

FIGURA 1: Evolución de las emisiones de CO2 en el mundo



INTRODUCCIÓN

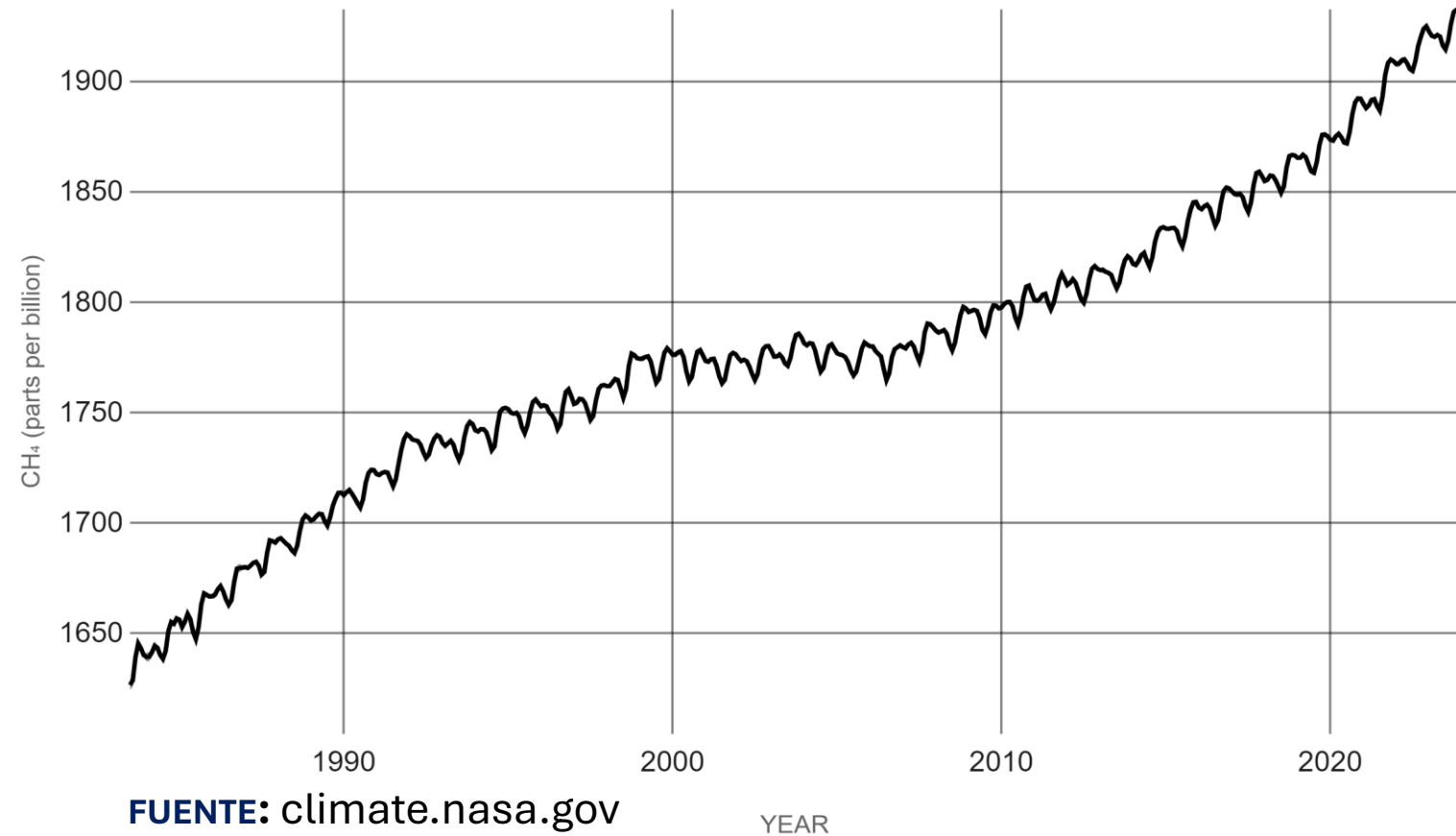
Situación de los GEI
a nivel mundial

Situación de los GEI
en Chile

ERNC en la matriz
energética de Chile

Energía eólica
offshore como
alternativa

FIGURA 2: Concentración de metano en la atmósfera desde 1984



INTRODUCCIÓN

Situación de los GEI
a nivel mundial

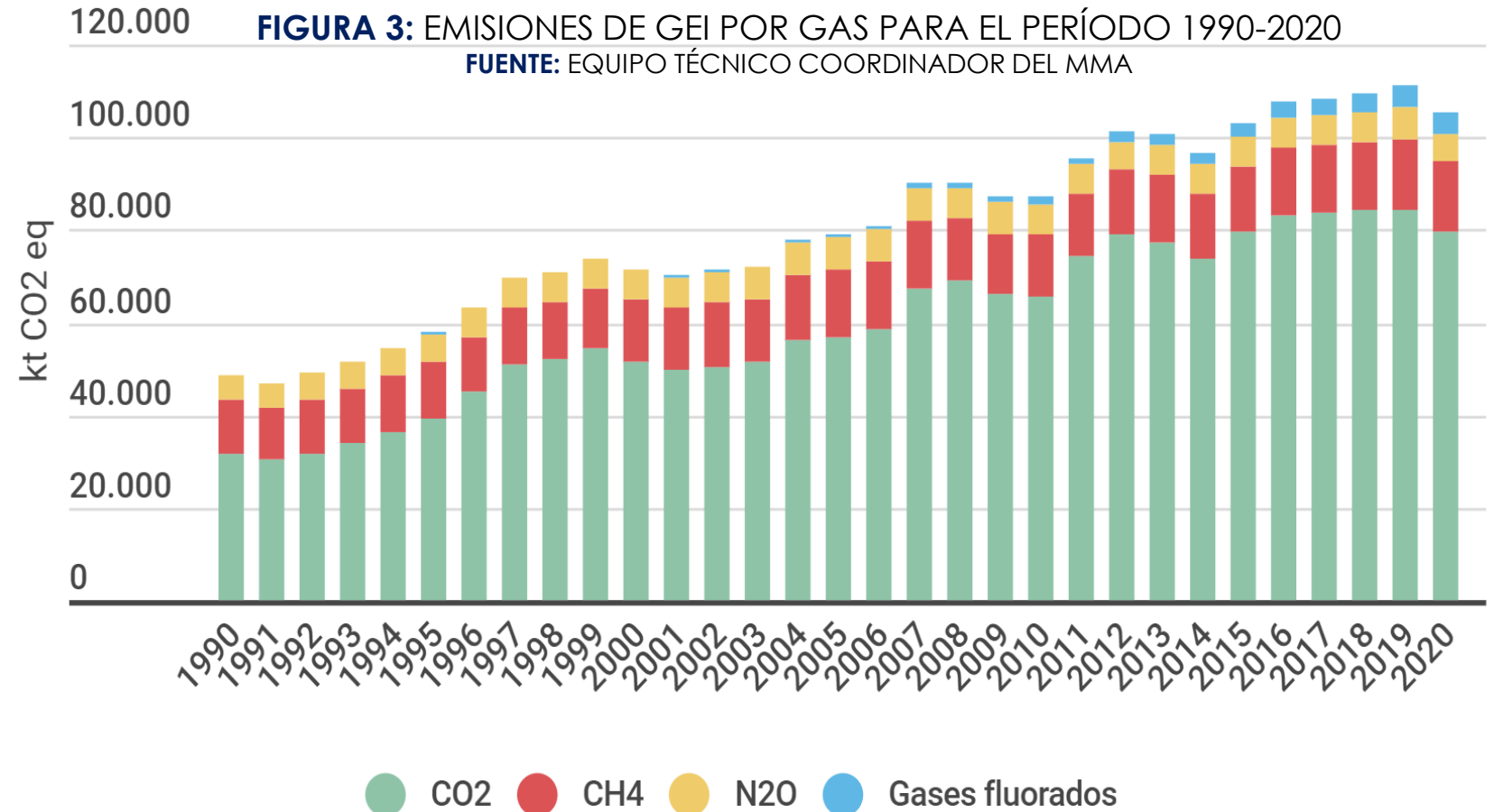
Situación de los GEI
en Chile

ERNC en la matriz
energética de Chile

Energía eólica
offshore como
alternativa

FIGURA 3: EMISIONES DE GEI POR GAS PARA EL PERÍODO 1990-2020

FUENTE: EQUIPO TÉCNICO COORDINADOR DEL MMA



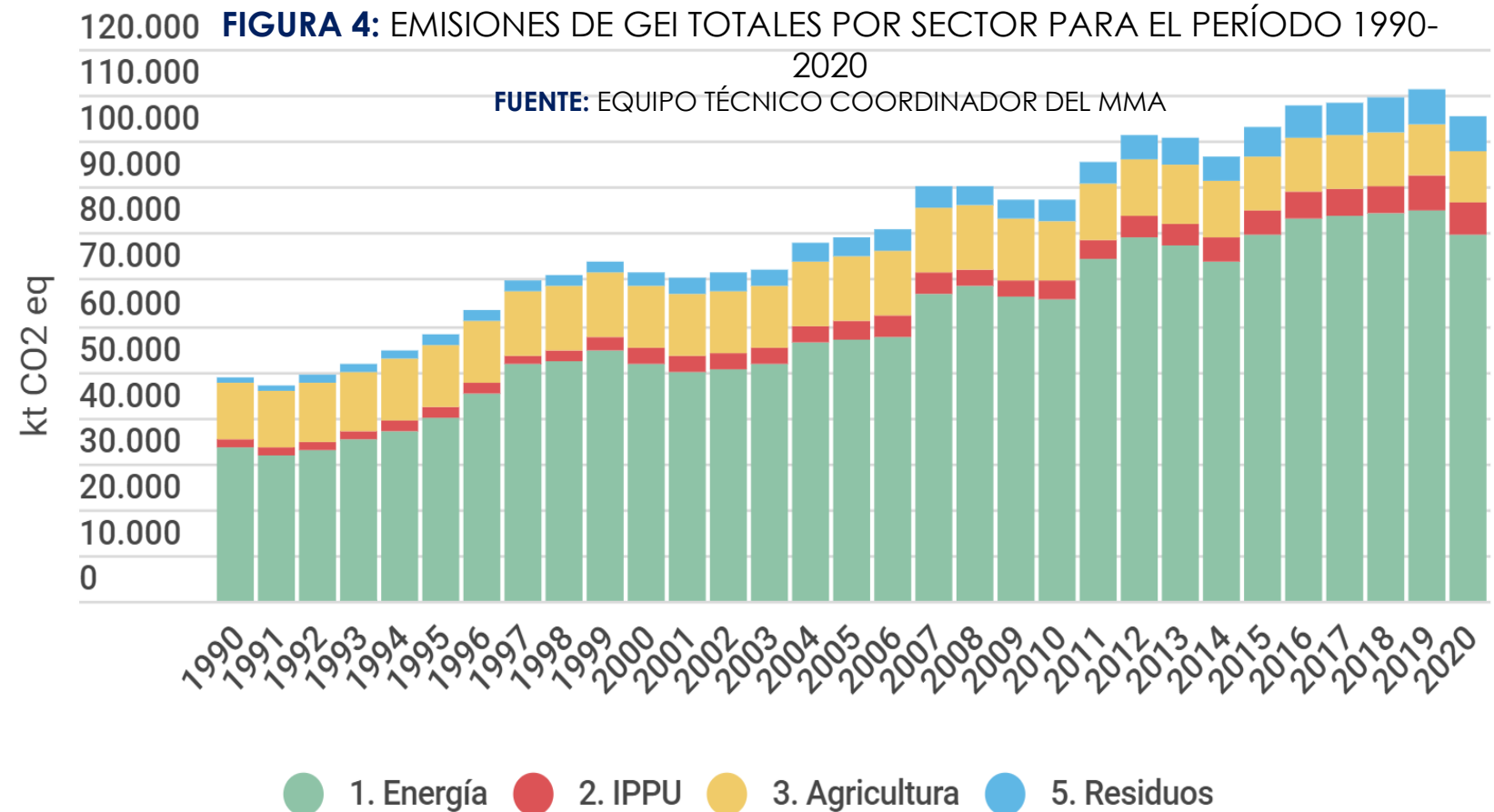
INTRODUCCIÓN

Situación de los GEI
a nivel mundial

Situación de los GEI
en Chile

ERNC en la matriz
energética de Chile

Energía eólica
offshore como
alternativa



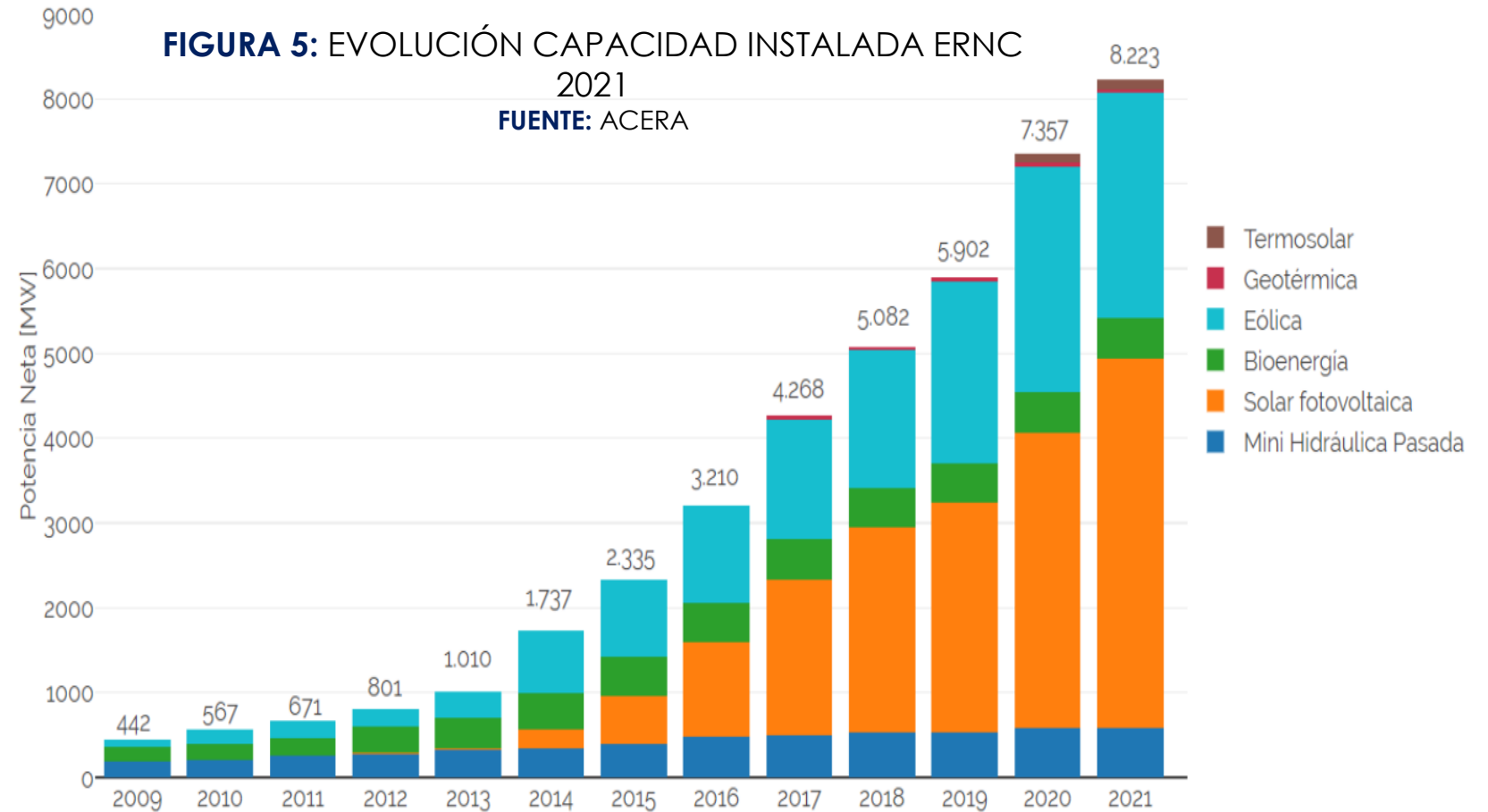
INTRODUCCIÓN

Situación de los GEI
a nivel mundial

Situación de los GEI
en Chile

**ERNC en la matriz
energética de Chile**

Energía eólica
offshore como
alternativa



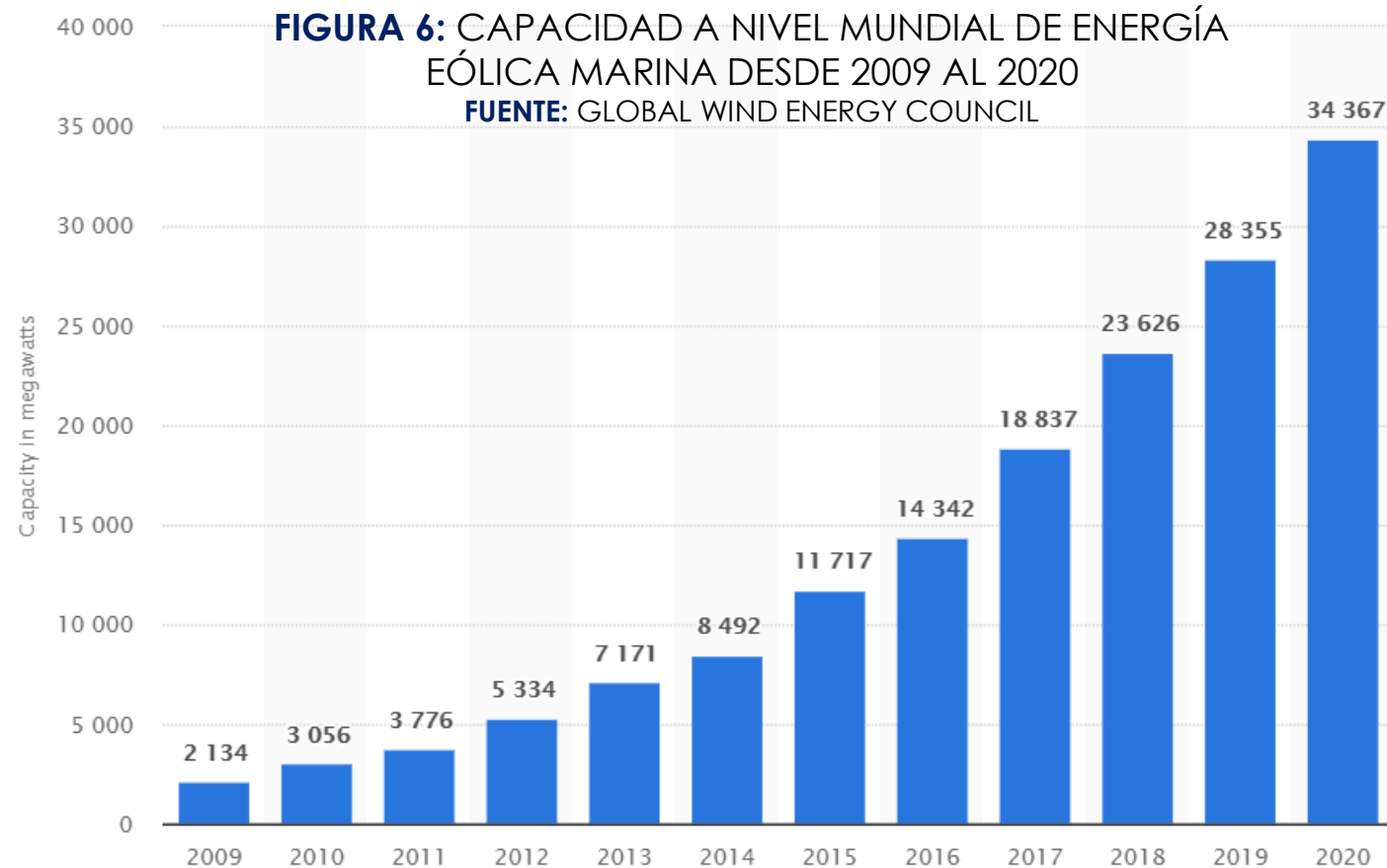
INTRODUCCIÓN

Situación de los GEI
a nivel mundial

Situación de los GEI
en Chile

ERNC en la matriz
energética de Chile

Energía eólica
offshore como
alternativa



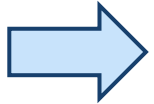
OBJETIVOS

General

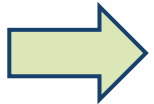


Evaluar la disponibilidad del recurso eólico marino para la generación de energía eléctrica en las cercanías de la bahía de Tongoy

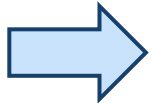
Específicos



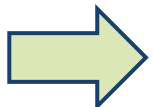
Estimar el potencial del recurso eólico marino disponible en la zona de estudio



Validar el modelo numérico con información satelital e in-situ



Identificar un sector de explotación que presente condiciones comparativamente superiores, cercano a la bahía de Tongoy



Comparar información obtenida del modelo numérico con datos reales de energía de la zona de estudio

MARCO TEÓRICO

► ENERGÍA EÓLICA MARINA U OFFSHORE

¿Qué es?

Corresponde a aquella fuente de energía limpia y renovable que se obtiene al aprovechar la fuerza del viento que se produce en alta mar, donde este alcanza una velocidad mayor y más constante debido a la inexistencia de barreras (Iberdrola, 2018).

**Ventajas de
esta energía**

Mayores velocidades de viento

Mayor estabilidad del viento

Mayor abundancia del recurso eólico

FUENTE: SCHWARTZ & HERNANDEZ, 2014

MARCO TEÓRICO

- Una de las formas de extraer y aprovechar este recurso energético es mediante la instalación de parques eólicos offshore.
- Comúnmente, se ubican en aguas no muy profundas (hasta 60 metros de profundidad).

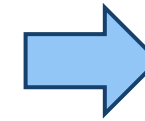


FIGURA 7: Parque eólico offshore Walney Extension ubicado en Reino Unido, con una potencia instalada de 659 [MW].

FUENTE: ROCA, 2018

MARCO TEÓRICO

¿Cómo saber cuánto es la energía que puedo extraer del recurso eólico?

Para calcular la potencia eólica, cuando el viento pasa a través de un área perpendicular a la dirección de este, la fórmula queda:

$$P_e = A \left(\frac{1}{2} \right) \rho V^3$$

Ecuación 1: Fórmula para obtener la potencia eólica

Donde:

- P_e = Potencia eólica, en watts
- $A = \pi r^2$, donde A representa el área barrida por las palas del aerogenerador, que cuenta con una longitud r
- ρ = densidad del aire, la cual a 15°C y a nivel del mar corresponde a $1,225 \text{ kg/m}^3$
- V = velocidad del viento en m/s

MARCO TEÓRICO

- Weather Research and Forecasting model (WRF)

¿Qué es?

Corresponde a un modelo atmosférico diseñado para la investigación y la predicción numérica de la meteorología en dimensiones de mesoescala y microescala.

¿Cuál es la ecuación principal?

El WRF utiliza la ecuación no hidrostática de Euler en tres dimensiones para fluidos compresibles como la ecuación de gobierno para representar la circulación atmosférica.

¿Quiénes han confiado en este modelo?

En el caso particular de Chile, la Universidad de Chile diseñó en el año 2010 el “Explorador eólico”, cuya característica principal es entregar información eólica a lo largo del país, utilizando el WRF como modelo numérico.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

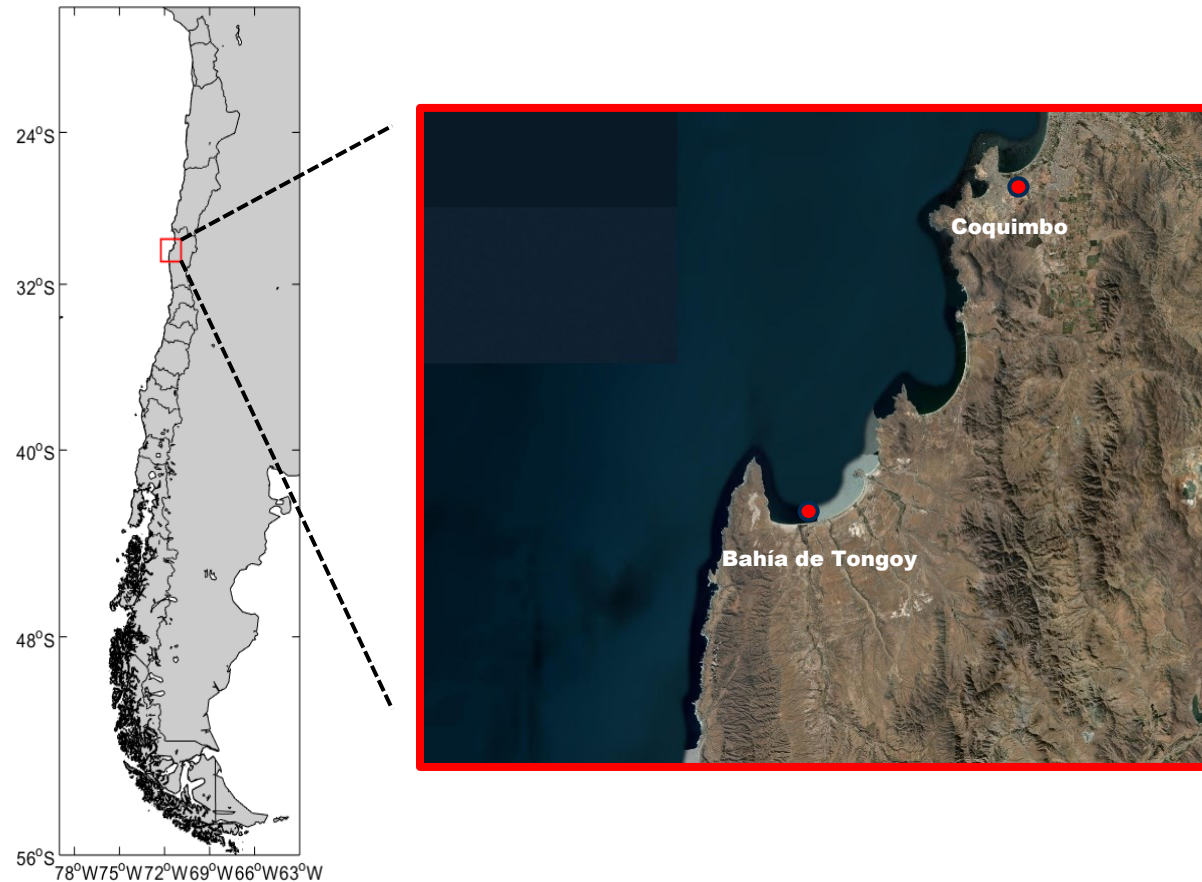


FIGURA 8: ZONA DE ESTUDIO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

METODOLOGÍA

Zona de estudio

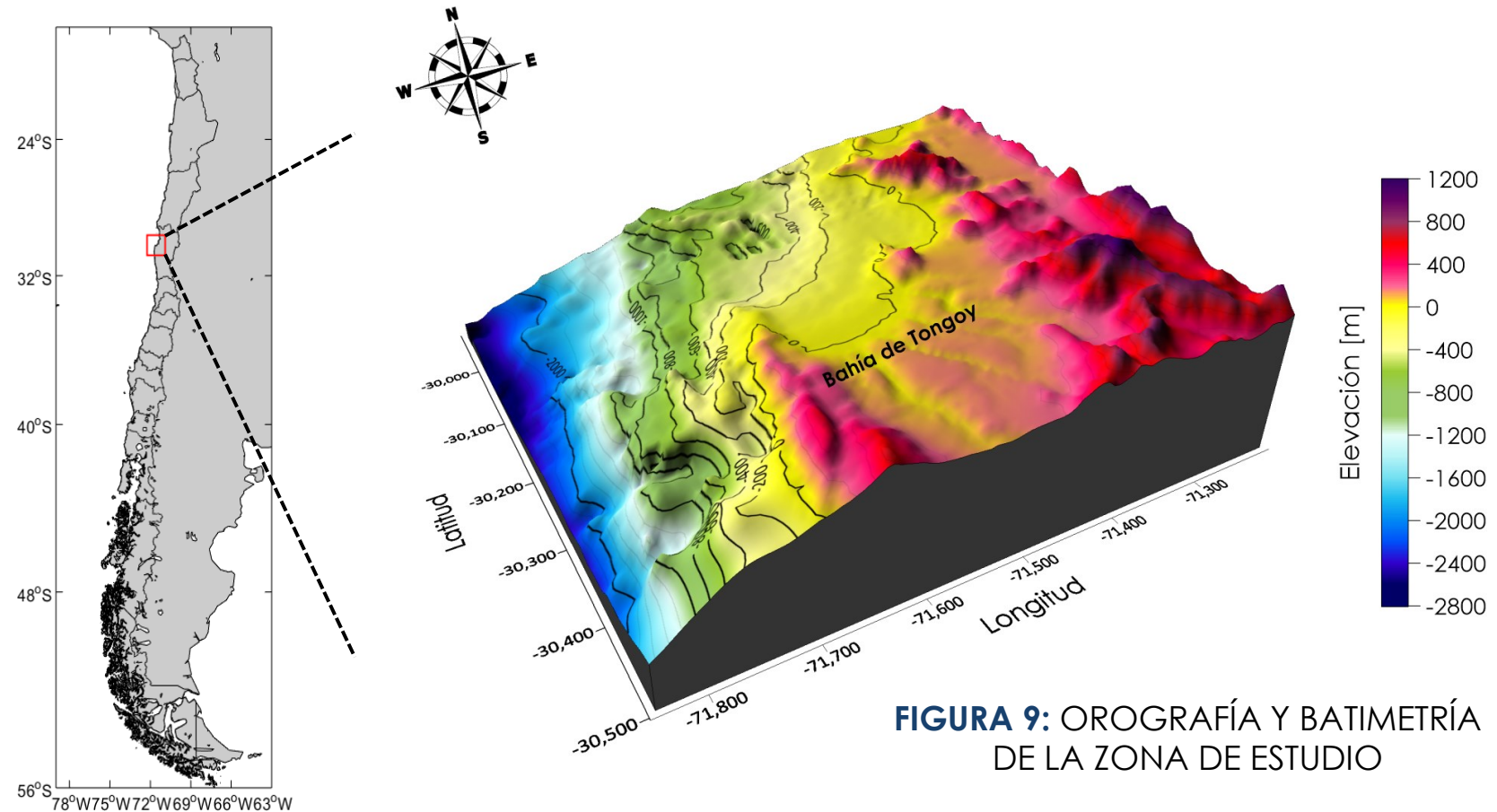


FIGURA 9: OROGRAFÍA Y BATIMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico



FIGURA 10: BALSA TONGOY-CEAZA

FUENTE: CDOM

Balsa Tongoy - CEAZA	
Longitud	-71,562°
Latitud	-30,275°
Rango de velocidad	0 a 50 m/s
Precisión	± 0,5 m/s
Velocidad máxima	60 m/s
Velocidad de inicio	0,5 m/s
Período de observación	01/01/2019 00:00 hasta el 01/01/2020 00:00, datos c/1hr

TABLA 1: INFORMACIÓN SOBRE LA BALSA

FUENTE: CDOM

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

**FIGURA 11: UBICACIÓN BALSA
TONGOY-CEAZA**
FUENTE: CDOM



METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

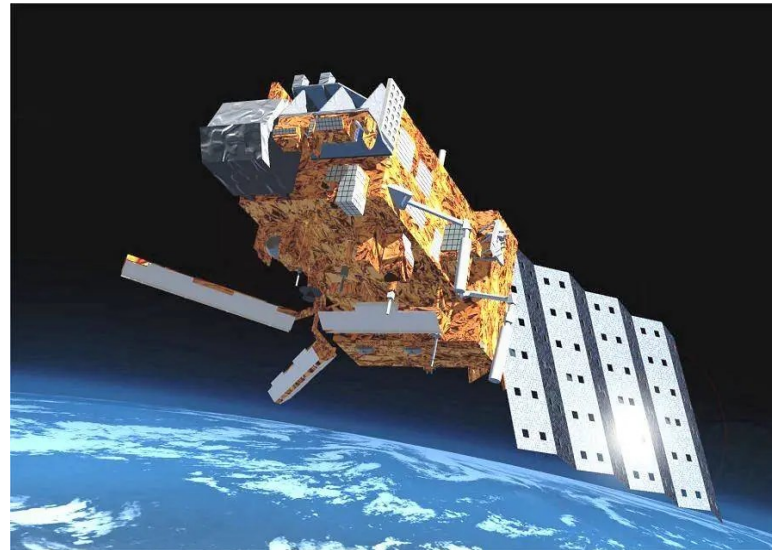


FIGURA 12: SATÉLITE METOP-A
FUENTE: NASA, 2014

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

Satélite Metop – A	
Nombre completo	Meteorological operational satellite - A
Instrumento de obtención de datos de viento	ASCAT (Advanced Scatterometer)
Período de funcionamiento	2006 - 2021
Período de observación	01/01/2019 – 01/01/2020
Resolución espacial	12,5 km x 12,5 km (datos grillados)
Frecuencia de datos	2 c/día (pasada ascendente(2 AM) y descendente(2 PM))
Formato de los datos	NetCDF

TABLA 2: INFORMACIÓN
 SOBRE EL SATÉLITE
FUENTE: WMO

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

Características del aerogenerador	Aerogenerador	
	SIEMENS SG 8.0-167 DD	VESTAS V164/9500
Potencia nominal (MW)	8,0	9,5
Diámetros del rotor (m)	167	164
Altura (m)	90	80
Velocidad de corte inicial (m/s)	3	3,5
Velocidad nominal (m/s)	12	14
Velocidad de corte final (m/s)	25	25

TABLA 3: PROPIEDADES DE LOS
 AEROGENERADORES SIEMENS Y VESTAS
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN
 DE THE WIND POWER, 2023

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

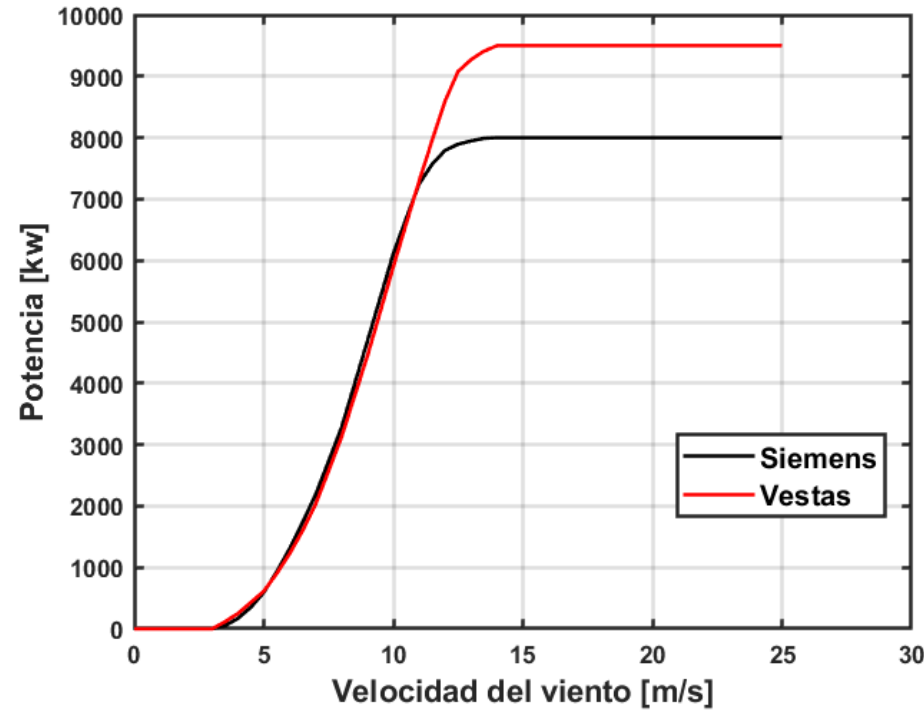


FIGURA 13: CURVAS DE POTENCIA DE LOS AEROGENERADORES SIEMENS Y VESTAS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN THE WIND POWER, 2023

METODOLOGÍA

Materiales

Datos *in-situ*

Datos satelitales

Aerogeneradores

Modelo numérico

Configuración del
modelo numérico WRF

METODOLOGÍA

Configuración del WRF

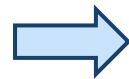
Dominios

Forzante

Simulación



Dominio 1: 765 km en X e Y



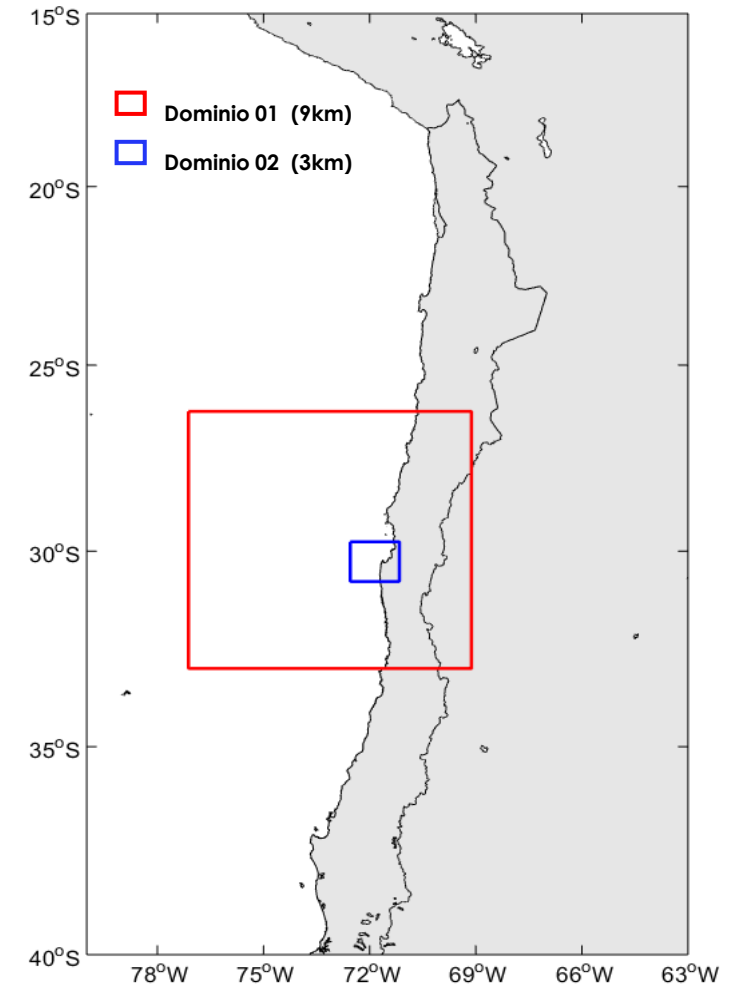
Dominio 2: 138 km en X y 120 km en Y



Resolución vertical de los dominios: 16 niveles

FIGURA 14: DOMINIOS CONFIGURADOS EN WRF

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



METODOLOGÍA

Configuración del WRF

Dominios

Forzante

Simulación



Modelo climático de
pronóstico que pertenece al
NCEP



La resolución horizontal de la
data descargada es de $1^\circ \times 1^\circ$



Datos descargados desde
01/01/2019 hasta 01/01/2020,
con datos cada 6 hrs

METODOLOGÍA

Configuración del WRF



Cambio en variable GFS
num_metgrid_levels: 32 a 34



Cantidad de archivos GRIB
que genera el WRF

Dominios

Forzante

Simulación

Simulación	Fecha		num_metgrid_levels
	Inicio	Término	
1	01/01/2019 00:00:00	12/06/2019 06:00:00	32
2	12/06/2019 06:00:00	30/06/2019 18:00:00	34
3	30/06/2019 18:00:00	01/01/2020 00:00:00	34

TABLA 4: SIMULACIONES NUMÉRICAS
 REALIZADAS EN WRF
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

METODOLOGÍA

Análisis estadístico

Sesgo (BIAS)

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$$

Ecuación 2: Fórmula para obtener el sesgo

Error Cuadrático Medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Ecuación 3: Fórmula para obtener el RMSE

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{Cov(O, P)^2}{S_o^2 S_p^2}$$

Ecuación 4: Fórmula para obtener el R^2

RESULTADOS

Validación del WRF

Información satelital

Anuales

$$\textit{Magnitud del viento} = \sqrt{(u)^2 + (v)^2}$$

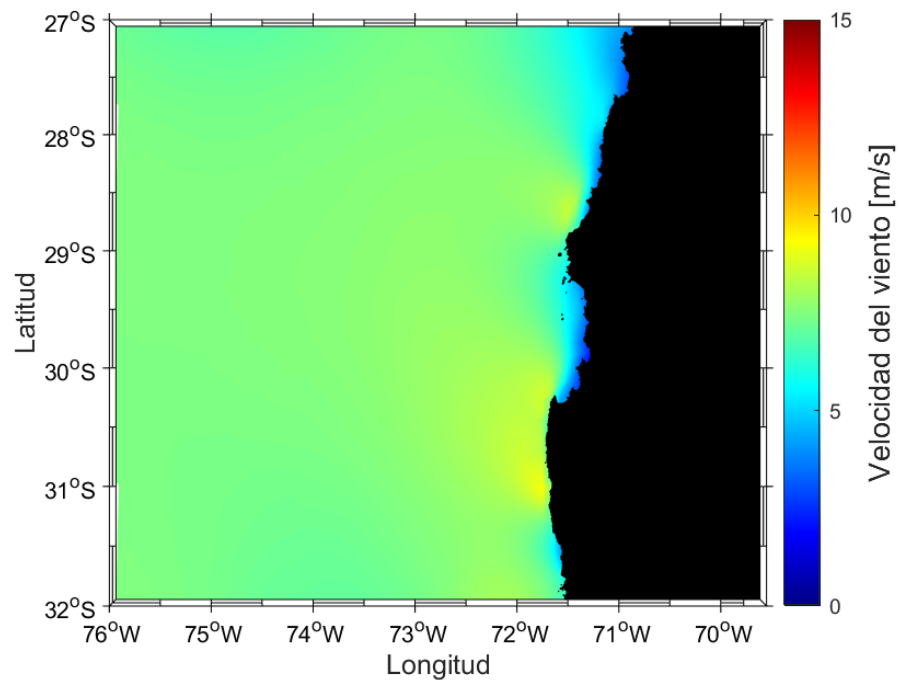
Ecuación 5: Fórmula para obtener la magnitud del viento

RESULTADOS

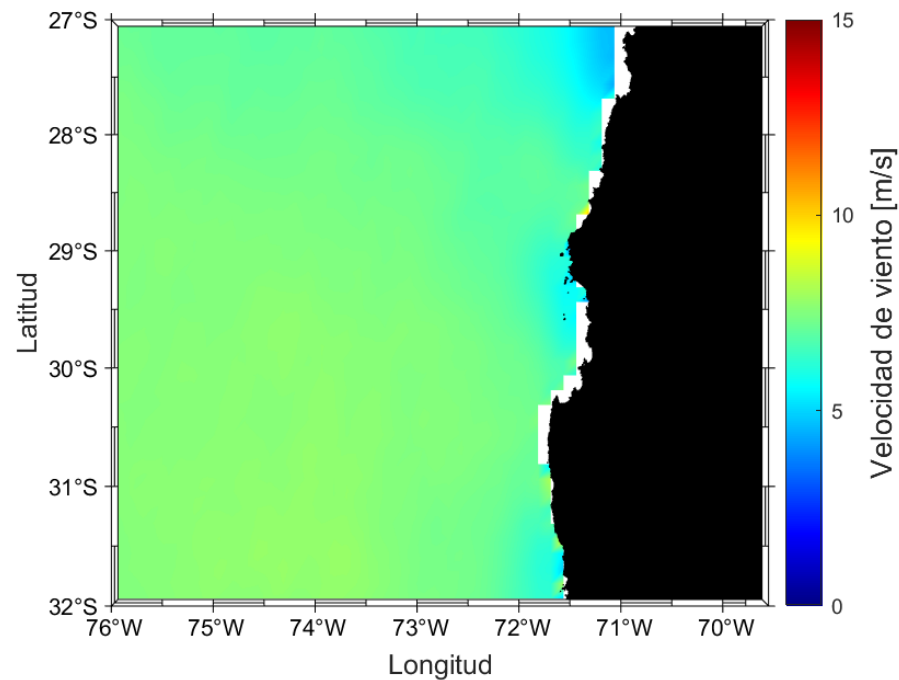
Validación del WRF

Información satelital

Anuales



A)



B)

FIGURA 15: A) CAMPO DE VIENTO ANUAL A 10 METROS DEL WRF. B) CAMPO DE VIENTO ANUAL A 10 METROS DEL SATÉLITE.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información satelital

Estadísticos

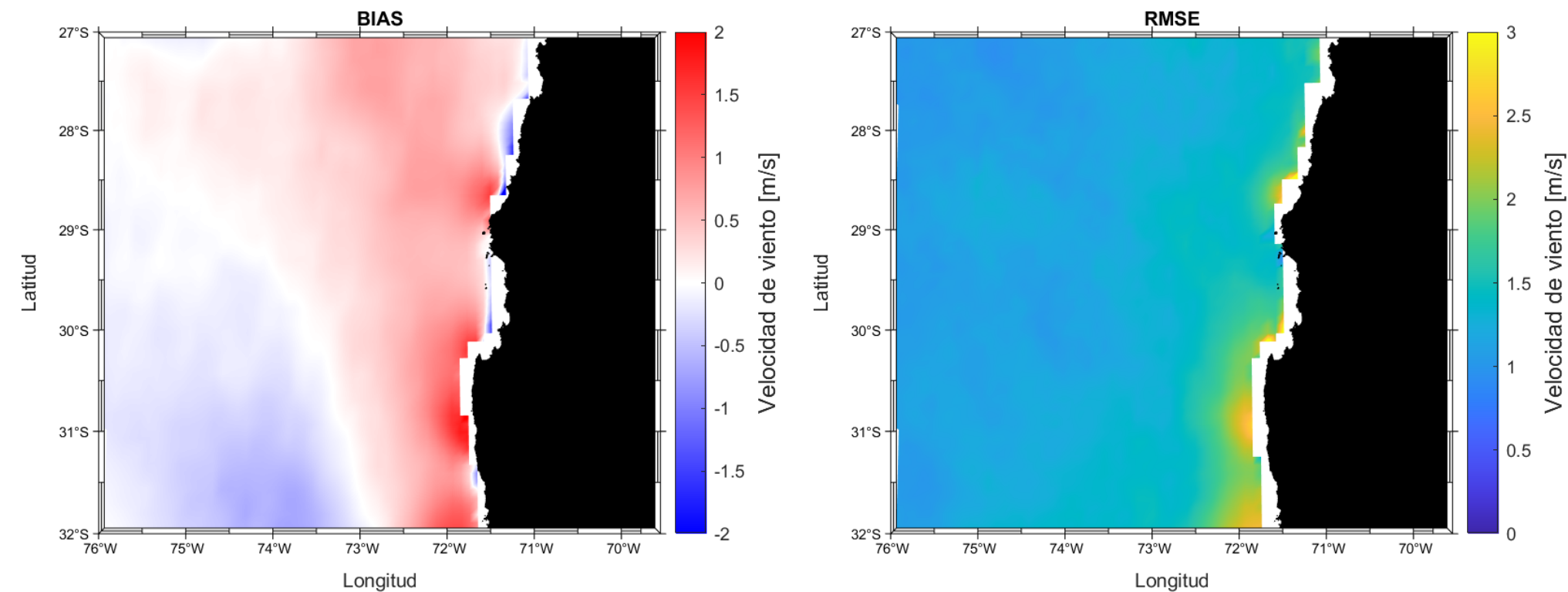


FIGURA 16: GRÁFICOS DE
SESGO Y ERROR
CUADRÁTICO MEDIO
ANUALES ENTRE WRF Y
SATÉLITE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información satelital

Estadísticos

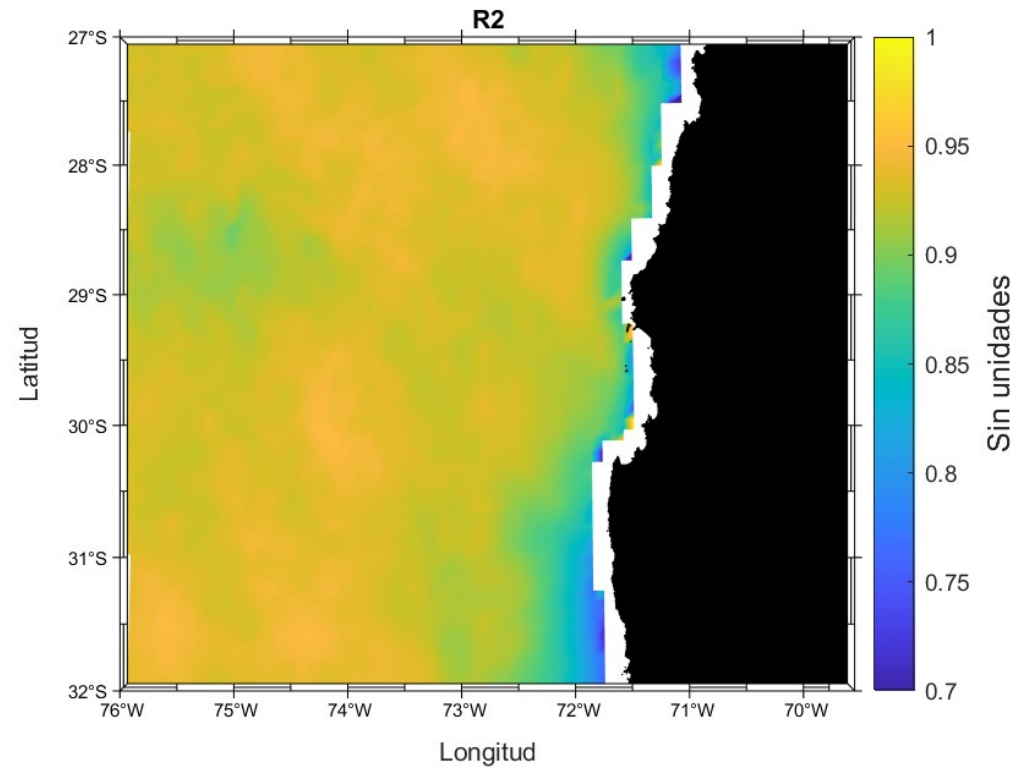


FIGURA 17: GRÁFICO DE R^2
ANUAL ENTRE WRF Y SATÉLITE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información satelital

Estadísticos

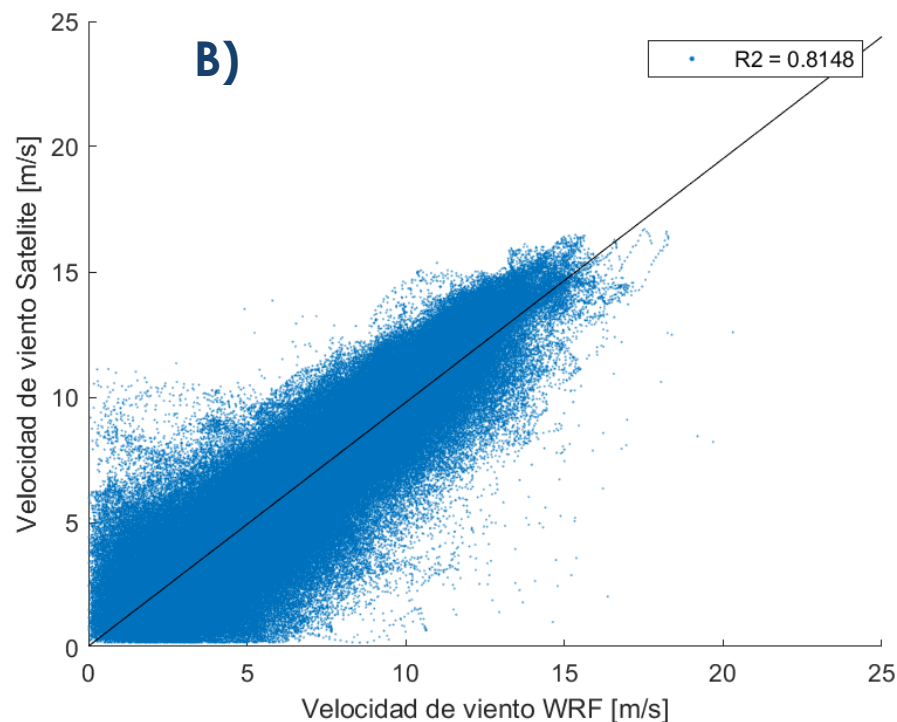
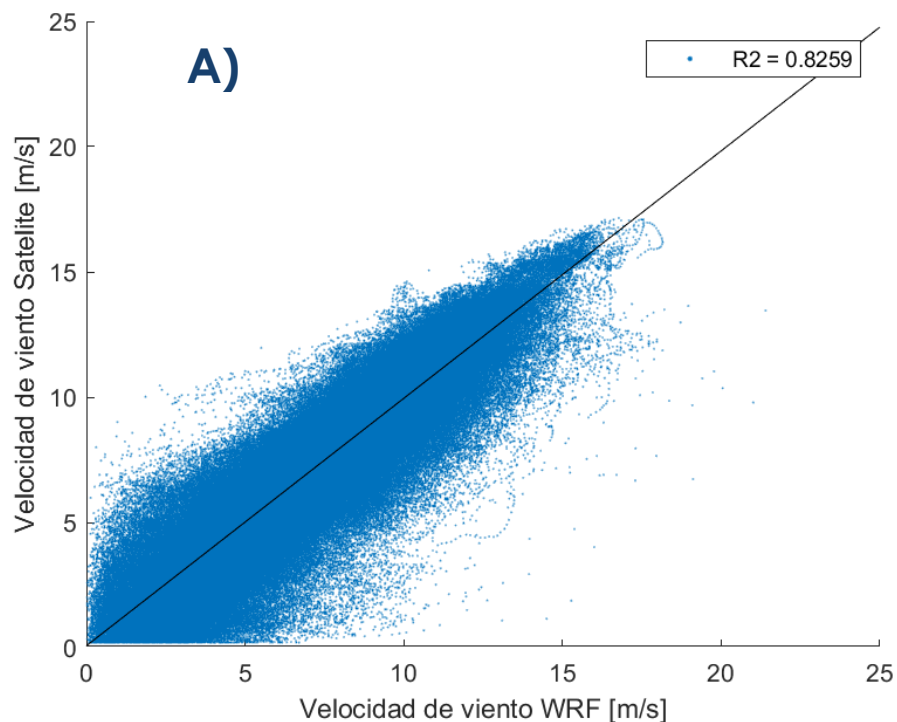


FIGURA 18: GRÁFICOS DE DISPERSIÓN ANUAL ENTRE WRF Y SATÉLITE A) PASADA ASCENDENTE DEL SATÉLITE. B) PASADA DESCENDENTE DEL SATÉLITE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información in-situ

Extracción de la información

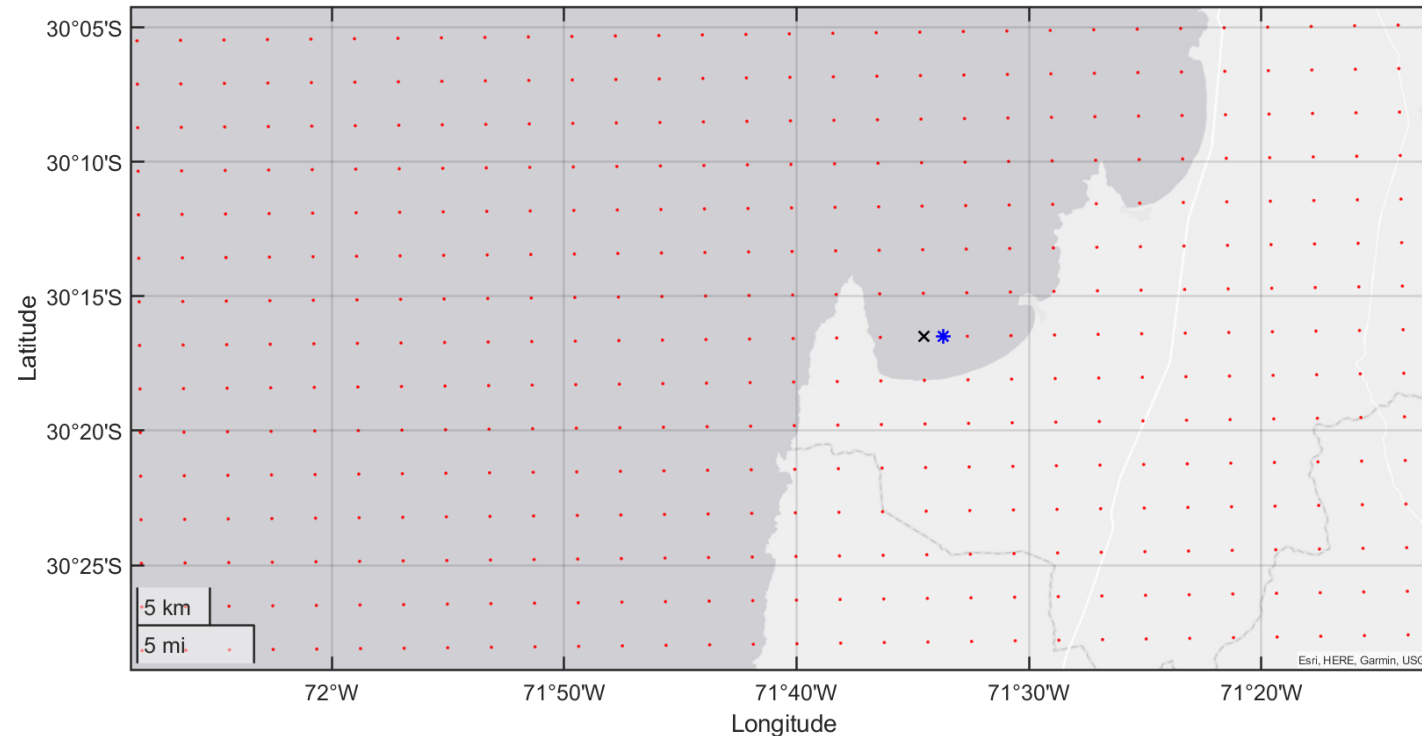


FIGURA 19: UBICACIÓN DESDE DONDE SE EXTRAE LA INFORMACIÓN DEL WRF, DONDE EL ASTERISCO AZUL REPRESENTA LA Balsa DE TONGOY Y LA EQUIS NEGRA REPRESENTA EL PÍXEL DESDE DONDE SE OBTIENE LA INFORMACIÓN DEL WRF

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información in-situ

Series de Tiempo

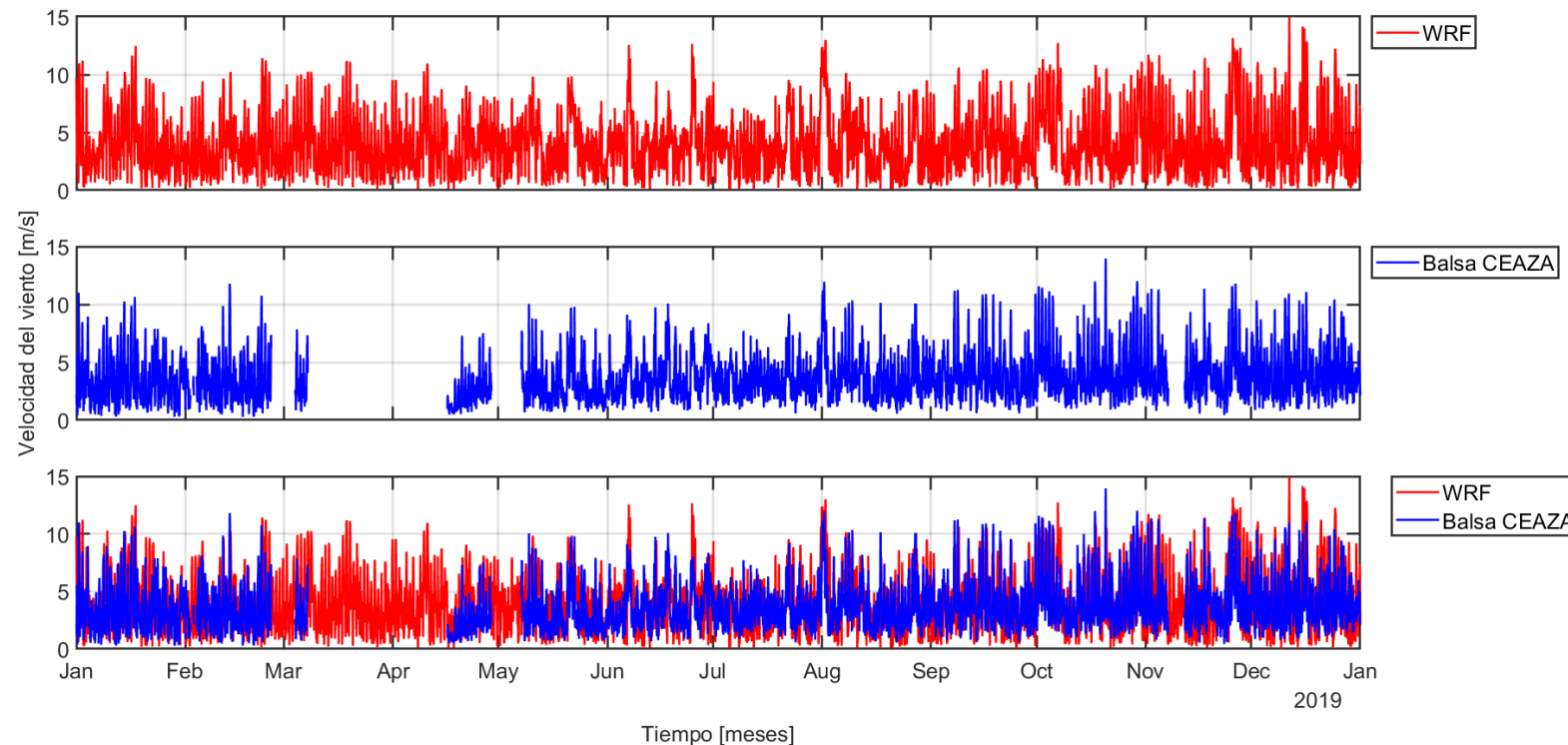


FIGURA 20: SERIES DE TIEMPO ANUAL DE VELOCIDAD PARA EL AÑO 2019 DEL MODELO WRF, BALSA TONGOY Y COMPARACIÓN ENTRE AMBAS FUENTES DE DATOS, RESPECTIVAMENTE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información in-situ

Gráfico de
dispersión

Pero ¿representa de buena forma el WRF los datos de la balsa de Tongoy?

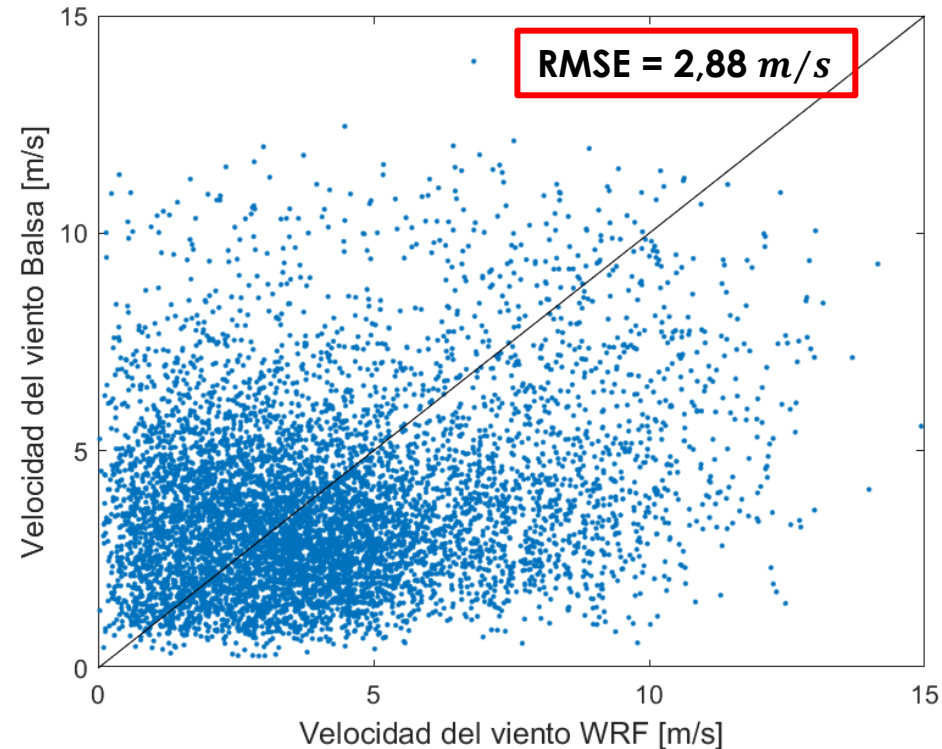


FIGURA 21: GRÁFICO DE DISPERSIÓN
PARA EL AÑO 2019 ENTRE EL WRF Y
LA BALSA

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Validación del WRF

Información in.situ

Artículos

2 problemas locales:
Circulación de brisas y
la orografía



Revista Cubana de Meteorología Revista Cubana de Meteorología, Vol.22, No.2, pp.164-187, 2016, ISSN: 0864-151X

Artículo Original

Pronóstico de viento a corto plazo utilizando el modelo WRF en tres regiones de interés para el Programa Eólico Cubano

Short-term wind forecast using the WRF model in three regions of interest for the Cuban Wind Program

Lic. Alfredo Roque Rodríguez✉, Lic. Adrian Ferrer Hernández, Lic. Israel Borrajero Montejo, MSc. Maibys Sierra Lorenzo, Lic. Alfredo Valdés Verde

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

RESULTADOS

Validación del WRF

Información in.situ

Artículos

VARIABILIDAD Y PREDICTIBILIDAD DEL VIENTO A ESCALA REGIONAL: MODELOS DINÁMICO Y ESTADÍSTICO SOBRE TERRENO COMPLEJO

El principal problema que se menciona es la orografía del sector, que además sugiere que tener una mayor resolución horizontal no garantiza mejores resultados

A. Hidalgo ⁽³⁾, P.A. Jiménez ^(1,2), E. García-Bustamante ^(1,2), E.E. Lucio-Eceiza ⁽¹⁾,
J. Navarro ⁽²⁾, J.P Montávez ⁽⁴⁾, J.F. González-Rouco ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo PalMA. Dpto. de Astrofísica y CC. de la Atmósfera. 28040, Madrid, España.
fidelgr@fis.ucm.es, pedro.jimenez@fis.ucm.es, elena.garcia@fis.ucm.es, eelucio@fis.ucm.es

⁽²⁾ División de Energías Renovables, CIEMAT. 28040, Madrid, España. jorge.navarro@ciemat.es

⁽³⁾ Global Forecasters S.L., 28806, Alcalá de Henares, Madrid, España. angela.hidalgo@gfcasters.es

⁽⁴⁾ Departamento de Física. Universidad de Murcia, 30071, Murcia, España. montavez@um.es

RESULTADOS

Estimación del potencial
eólico offshore

Espacial con
aerogeneradores

Anuales

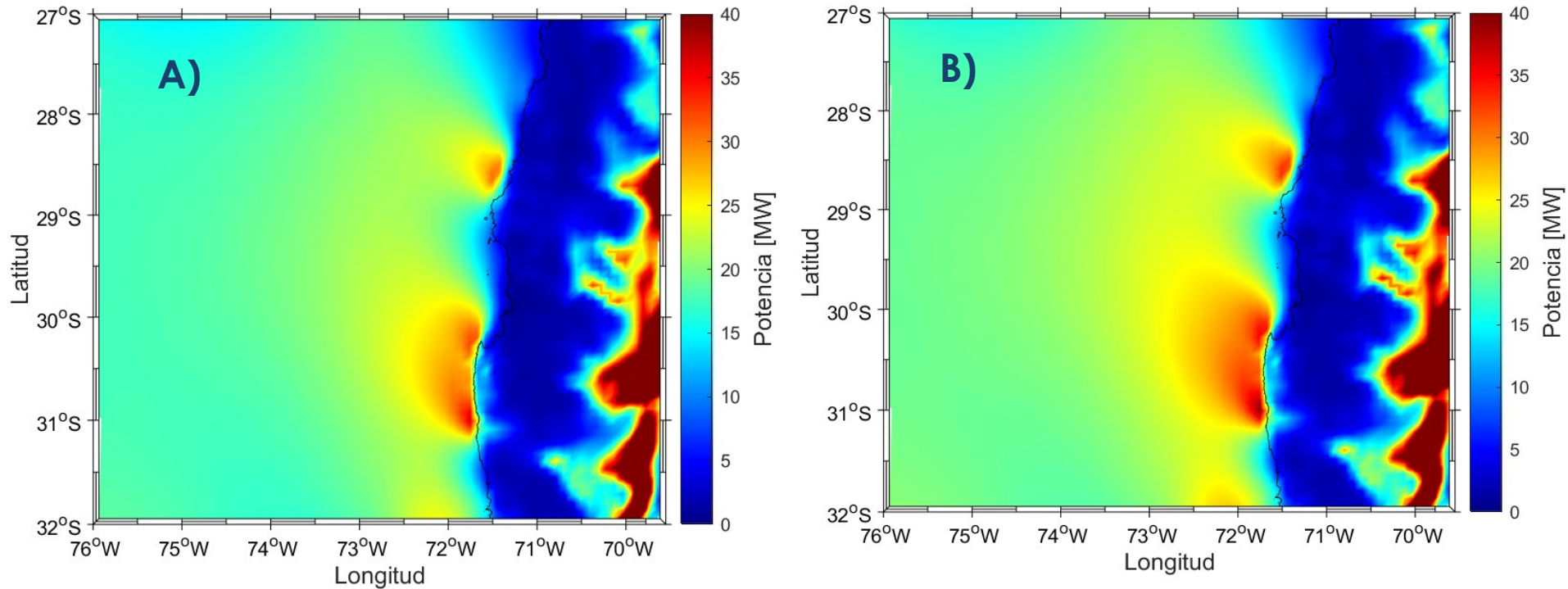


FIGURA 22: CAMPOS DE POTENCIA EÓLICA OFFSHORE ANUALES CON AEROGENERADOR A) VESTAS A 80 METROS B) SIEMENS A 90 METROS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Estimación del potencial eólico offshore

Espacial con aerogeneradores

Mensuales

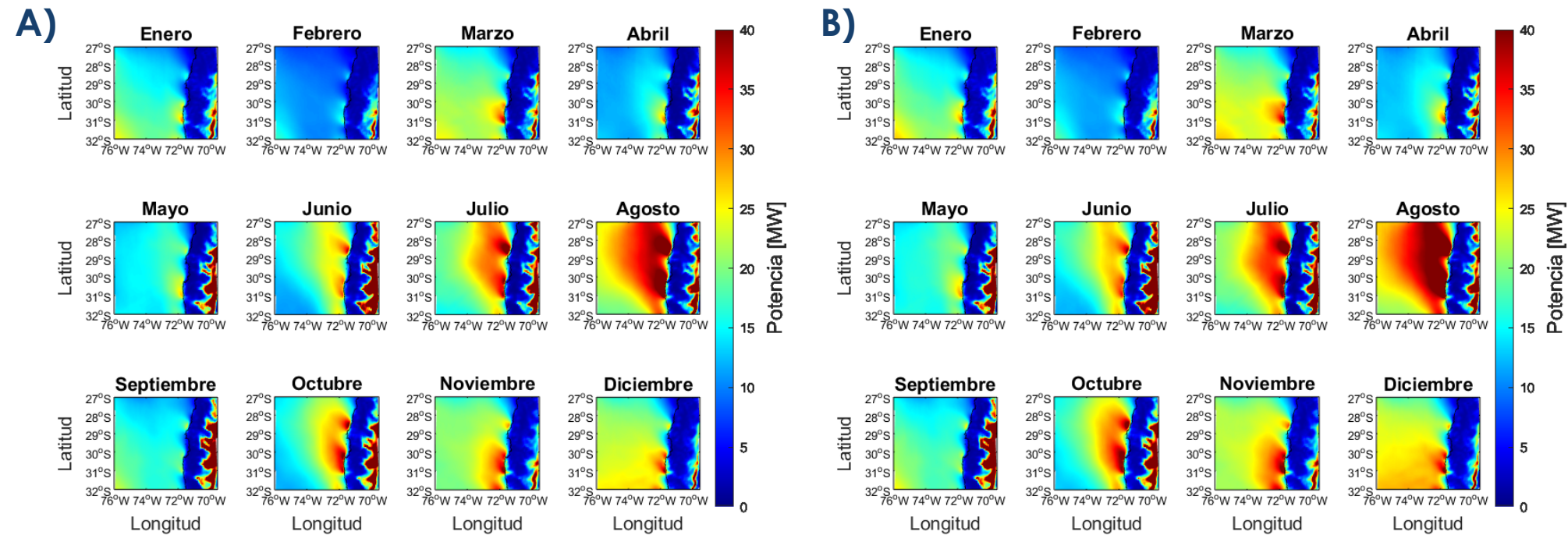


FIGURA 23: CAMPOS DE POTENCIA EÓLICA OFFSHORE MENSUALES CON AEROGENERADOR A) VESTAS A 80 METROS B) SIEMENS A 90 METROS

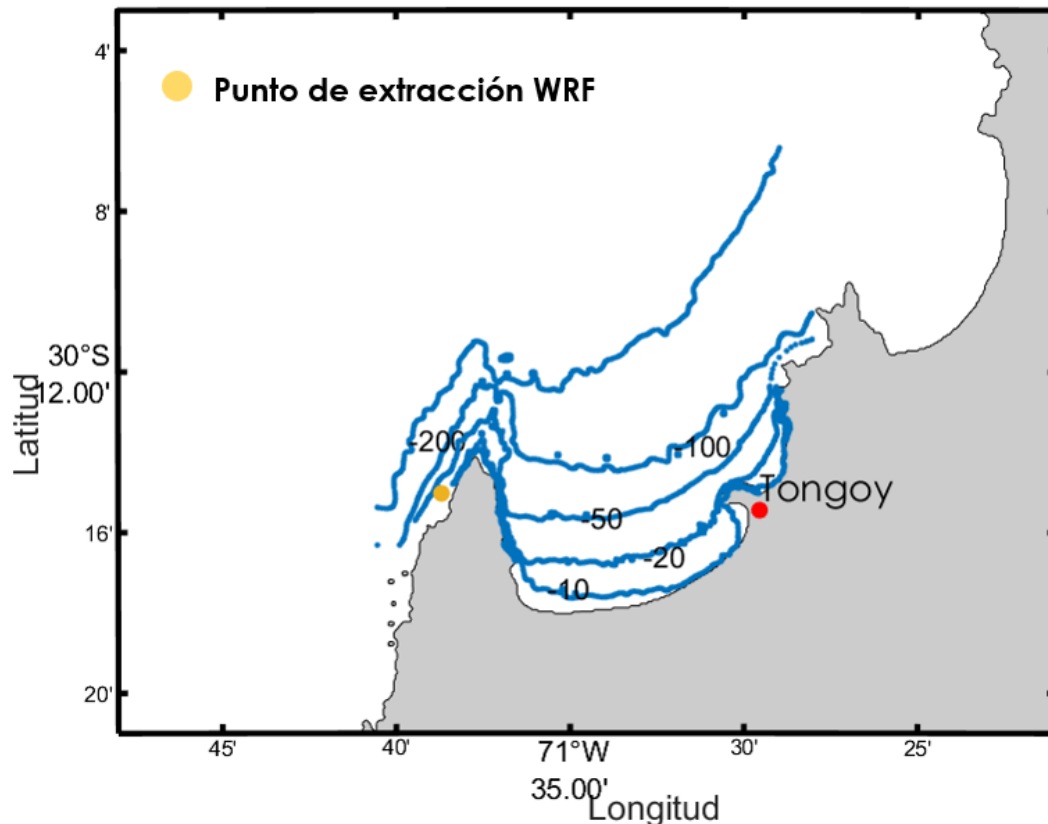
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Estimación del potencial eólico offshore

Puntuales

Punto de extracción
información WRF



El punto de extracción debe
cumplir con dos requisitos:

- ✓ Profundidad no debe superar los 60 [m]
- ✓ Zona debe poseer un alto potencial energético

FIGURA 24: LUGAR DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE POTENCIA EÓLICA

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

RESULTADOS

Estimación del potencial
eólico offshore

Puntual con
aerogeneradores

Serie de tiempo

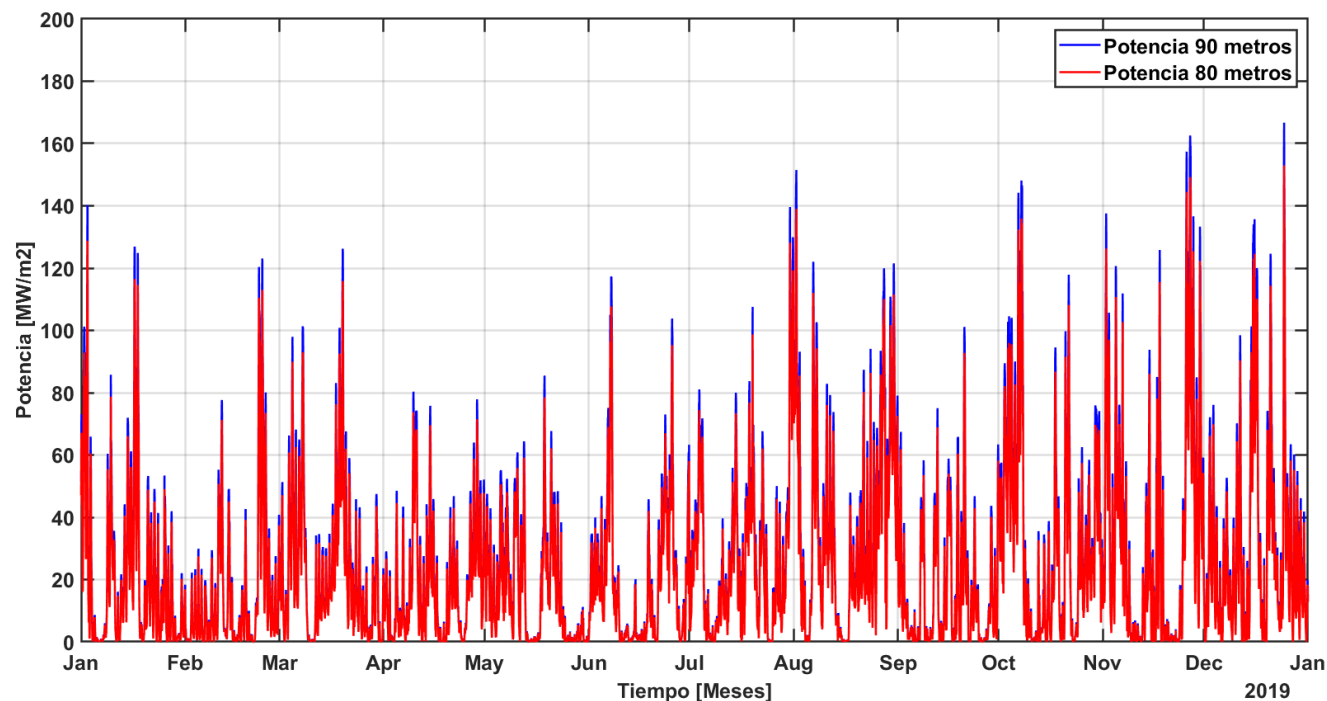


FIGURA 25: SERIES DE TIEMPO DE POTENCIA EÓLICA OFFSHORE CON LOS AEROGENERADORES VESTAS(ROJO) Y SIEMENS(AZUL)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Comparación con
Parque Eólico en
tierra

Consumo energético de
Tongoy



FIGURA 26: UBICACIÓN DEL
PARQUE EÓLICO PUNTA
SIERRA SITUADO EN TIERRA

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN
BASE DE GOOGLE EARTH

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Comparación con Parque Eólico en tierra



Este parque eólico cuenta con 32 aerogeneradores marca Goldwind, cuyo modelo es el GW 121-2500.



La capacidad nominal de estas turbinas es de 2,5 MW, por lo que el parque cuenta con una capacidad instalada de 80 MW; poseen una altura de 90 metros, y un diámetro de rotor de 121 metros. (The Wind Power, 2023).

Consumo energético de Tongoy



Para el año 2019, la generación de energía fue de 271,7 GWh; por lo que se deduce que cada aerogenerador en teoría produce 8,5 GWh anual (Coordinador Eléctrico Nacional).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Comparación con Parque Eólico en tierra



Considerando los datos de vientos entregados por WRF en el área de estudio, y si se evalúan con los aerogeneradores Goldwind del PEPS se obtiene que una sola turbina genera 13,3 GWh en teoría.



Es decir, que solo se necesitarían 20 aerogeneradores GW 121-2500 para generar la misma cantidad de energía que el PEPS produjo en el año 2019, en comparación con las 32 que este parque cuenta, lo que habla del alto potencial energético del recurso eólico marino en el sector.

Consumo energético de Tongoy



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Comparación con
Parque Eólico en tierra

Consumo energético
de Tongoy

✓ Según el último Censo el año 2017, la comuna de Tongoy cuenta con 2600 viviendas (INE,2019) y cuyo consumo energético residencial por cliente en promedio es de 140 KWh/mes (Region,s.f.).

✓ Se deduce que el consumo eléctrico de la ciudad es de 4,36 GWh al año; y una sola turbina del PEPS genera aproximadamente el triple de dicho consumo.

✓ Mientras que, si se evalúa con el aerogenerador Siemens, solo uno de estos genera 36,6 GWh en un año, lo que significa que es casi 9 veces el consumo energético de Tongoy.

✓ Se infiere, que con los datos obtenidos del WRF, no es necesario un aerogenerador tan potente y costoso económicamente (Blewett,2023), ya que con una turbina de similares características al modelo Goldwind es suficiente para abastecer a esta comuna.

CONCLUSIONES



Existencia de un alto potencial energético del recurso eólico marino por sobre el recurso existente en tierra, con un promedio anual aproximado de 25 MW en la zona de explotación, donde en invierno y primavera se obtuvieron los mayores promedios de energía, 32,5 y 27,8 MW respectivamente.



El modelo WRF presenta complicaciones a la hora de representar, en este caso, la variable asociada a la velocidad del viento, debido principalmente a la orografía del lugar y a la ubicación de la balsa Tongoy.



No es necesario un aerogenerador con características tan avanzadas, y por ende más costoso económicamente, para abastecer de energía a la comuna de Tongoy, ya que con uno de especificaciones similares a las del Parque Eólico Punta Sierra es suficiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACERA. (2022). Memoria 2021. Obtenido de <https://www.acera.cl/wp-content/uploads/2023/07/Memoria-Acera-2021.pdf>
2. CDOM. (s.f.). Equipamiento. Obtenido de <http://www.cdom.cl/equipamiento.php>
3. IBERDROLA. (2018). ¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos marinos? Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funciona-la-energia-eolica-marina#:~:text=Parques%20eólicos%20marinos%3A%20los%20colosos,a%20la%20inexistencia%20de%20barreras>
4. NASA. (s.f.). NASA. Obtenido de Climate Nasa: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=111>
5. Paola Ferrada, R. M. (2014). Sistema de pronóstico del tiempo en base a modelo atmosférico WRF implementado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción mediante dispositivos móviles para la Región del Biobío. Obtenido de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/802/1/Torres_Ferrada_Paola.pdf
6. power, T. w. (2023). The wind power. Obtenido de https://www.thewindpower.net/turbine_es_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd.php
7. Project G. C. (2022). Global Carbon Budget. Obtenido de https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2022/GCP_CarbonBudget_2022.pdf
8. Roca, J. A. (2018). Los 10 mayores parques eólicos marinos del mundo: Walney Extension da un vuelco a la clasificación. Obtenido de <https://elperiodicodelaenergia.com/los-10-mayores-parques-eolicos-marinos-del-mundo/>
9. Schwartz Javier, H. C. (2014). Aprovechamiento Energías Renovables Offshore: Eólica y Undimotriz. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/202/Aprovechamiento+Energias+Renovables+Offshore:+Eolica+y+Undimotriz.pdf;jsessionid=E9D5B9D2D52C3E86E221E88B32C2EFBC?sequence=1>
- 10.WMO. (s.f.). OSCAR. Obtenido de https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/metop_a

Presentación del Proyecto para optar al título de Ingeniero civil oceánico

EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO EÓLICO MARINO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA BAHÍA DE TONGOY EN BASE AL MODELO NUMÉRICO WRF

ERICK WLADIMIR SOTO ROMÁN

NOVIEMBRE 2024