



High-resolution wind speed data and its influence on wind energy aspects in Mexico

Presenta

M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Asesor:

Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández

Comité tutorial:

Dr. Eduardo Ramos Mora

Dra. Vanesa Magar Brunner

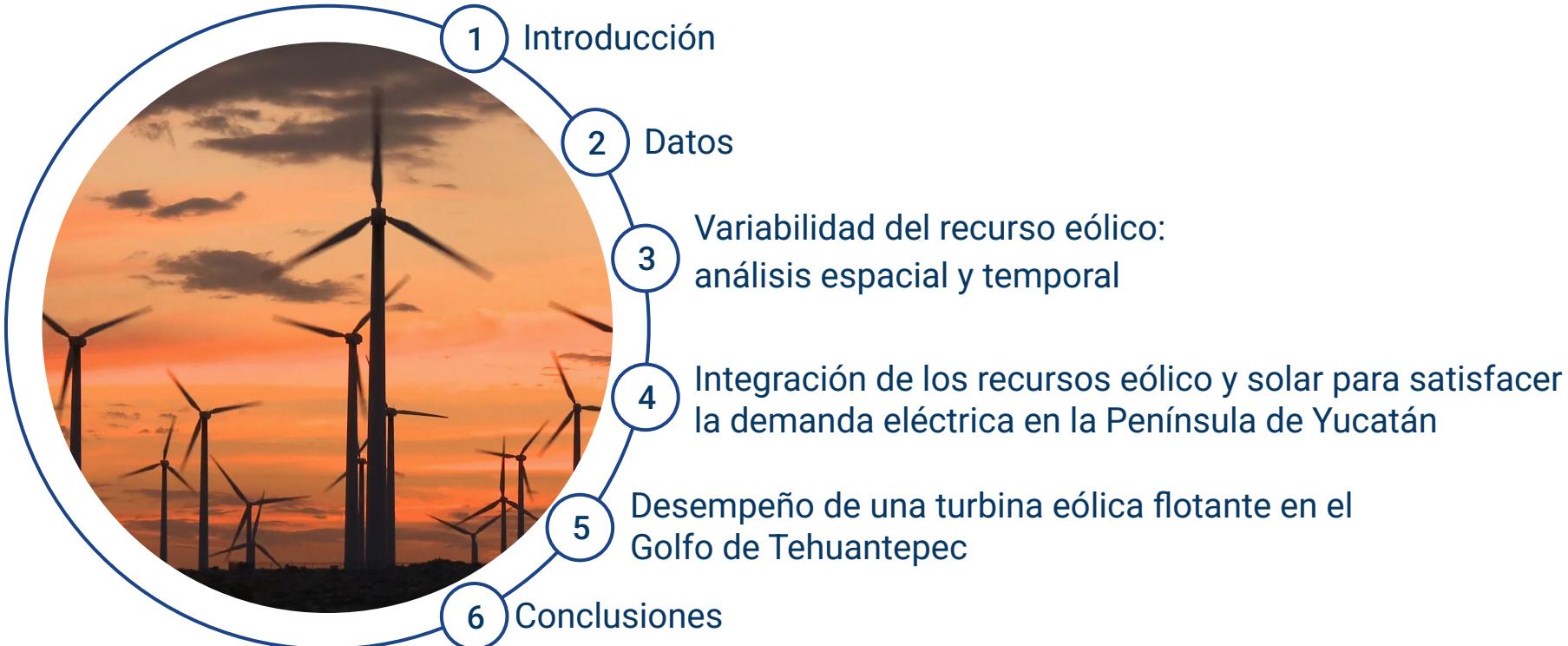
Dr. Óscar Martínez Alvarado

Dr. Antonio Jarquin Laguna



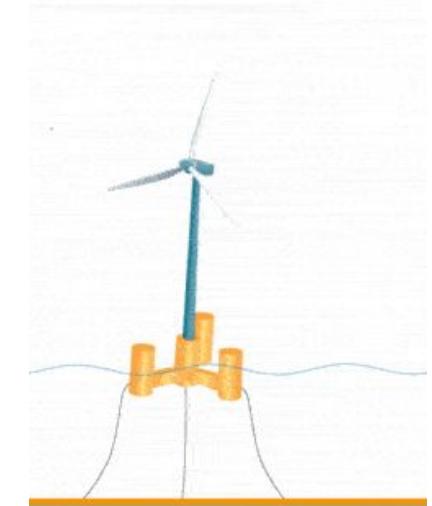
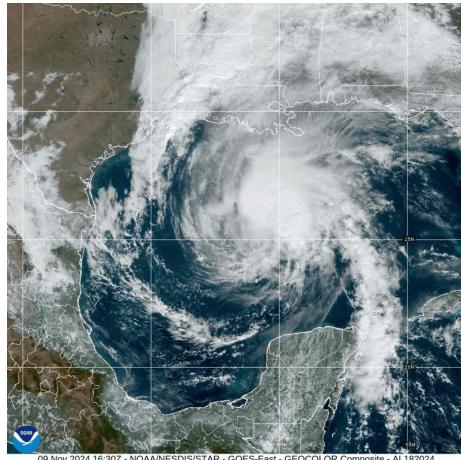
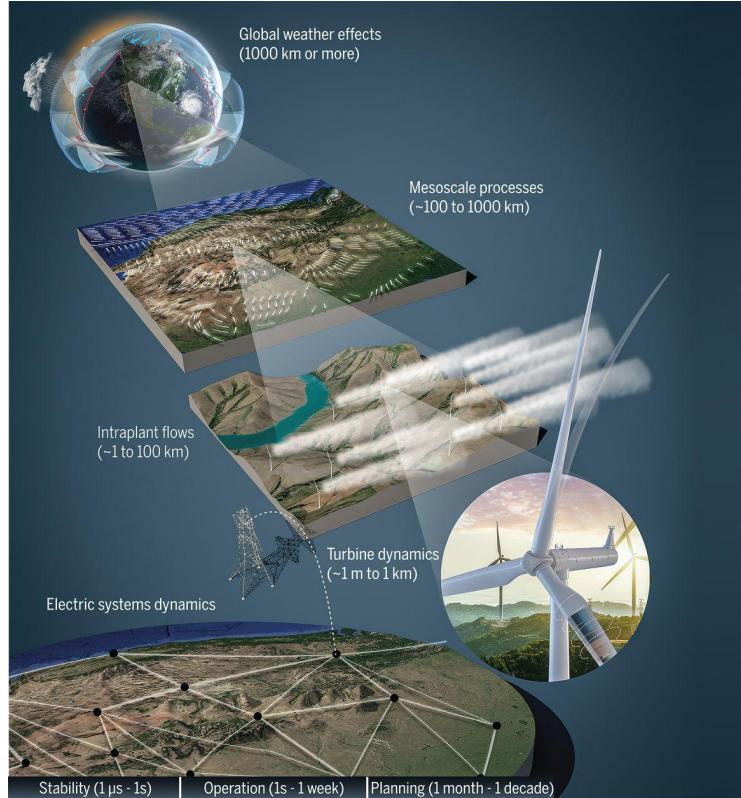
13 de mayo de 2025

Contenido



Introducción

Paul Veers et al., Grand challenges in the science of wind energy. *Science* 366, eaau2027 (2019). DOI:10.1126/science.aau2027



Obtenido de:

<https://www.pbs.org/newshour/world/live-map-track-the-path-of-hurricane-rafael>

Obtenido de:

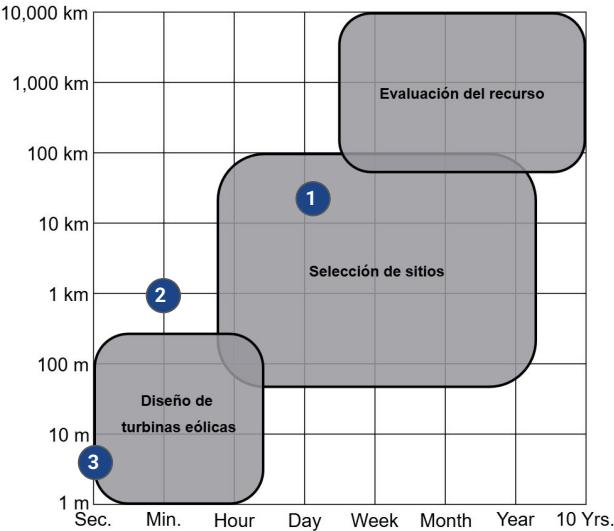
<https://www.naval-group.com/en/nropelling-digital-era>

High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Objetivos

Evaluar cómo las diferentes resoluciones temporales de las velocidades del viento influyen en el entendimiento de los retos en energía eólica en México.

1. Evaluar la complementariedad de los recursos eólico y solar en la Península de Yucatán y su potencial para satisfacer la demanda eléctrica regional.
2. Analizar la variabilidad espacial y temporal de las velocidades de viento observadas en diferentes regiones del país.
3. Analizar el desempeño y factibilidad técnica de una turbina eólica flotante localizada en el Golfo de Tehuantepec.



Escala temporal

Anual a diaria	Horaria a minutos	Anual a milisegundos
----------------	-------------------	----------------------

Zona de estudio

Península de Yucatán	Regiones a lo largo del país	Golfo de Tehuantepec
----------------------	------------------------------	----------------------

Variables de ERA5:
(Resolución horaria)
Componentes de la velocidad del viento

Temperatura Radiación solar		Altura significativa de la ola Dirección de la ola Periodo de la ola
--------------------------------	--	--

Variables de otras fuentes

Demandas eléctricas, CENACE <i>(Resolución horaria)</i>	Velocidades de viento del AEM <i>(10 minutos)</i>	Campos de velocidad de viento, TurbSim (<i>50 ms</i>)
--	--	--

Evaluación del recurso eólico

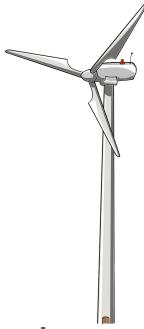
Características del sitio



Series temporales

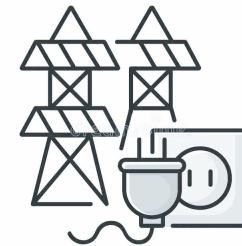
AEM
ERA5

Tecnología

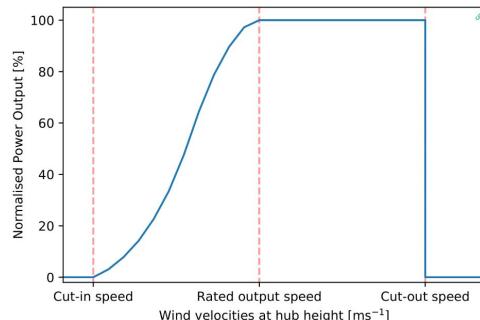


=

Energía generada



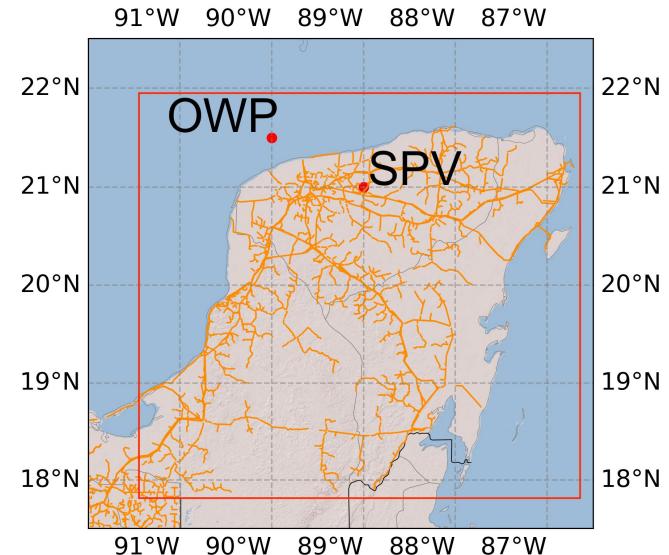
Curva de potencia



$$AEP = \sum_{t=1}^N P(U_t) \Delta t$$

$$CF = \frac{AEP}{P_{\text{rated}} \cdot \text{Time}}$$

Integración de los recursos eólico y solar para satisfacer la demanda eléctrica en la Península de Yucatán



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Integración de los recursos eólico y solar para satisfacer la demanda eléctrica en la Península de Yucatán

Variables meteorológicas:

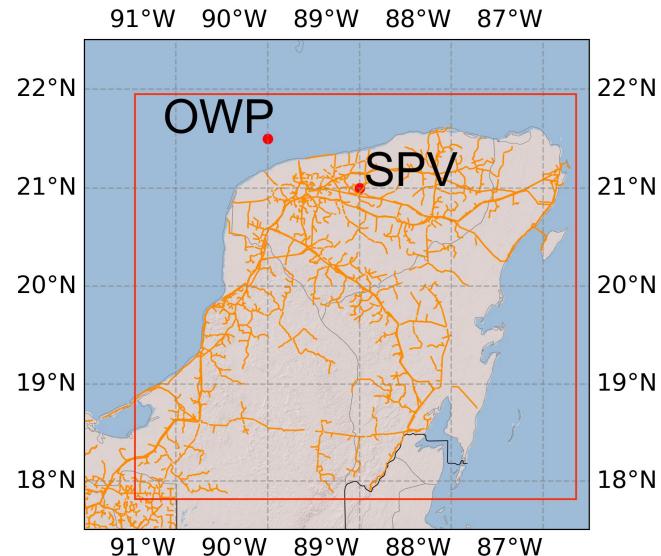
- ERA5, resolución horaria, 1979-2020
 - Velocidades de viento
 - Temperatura
 - Radiación

Demanda eléctrica:

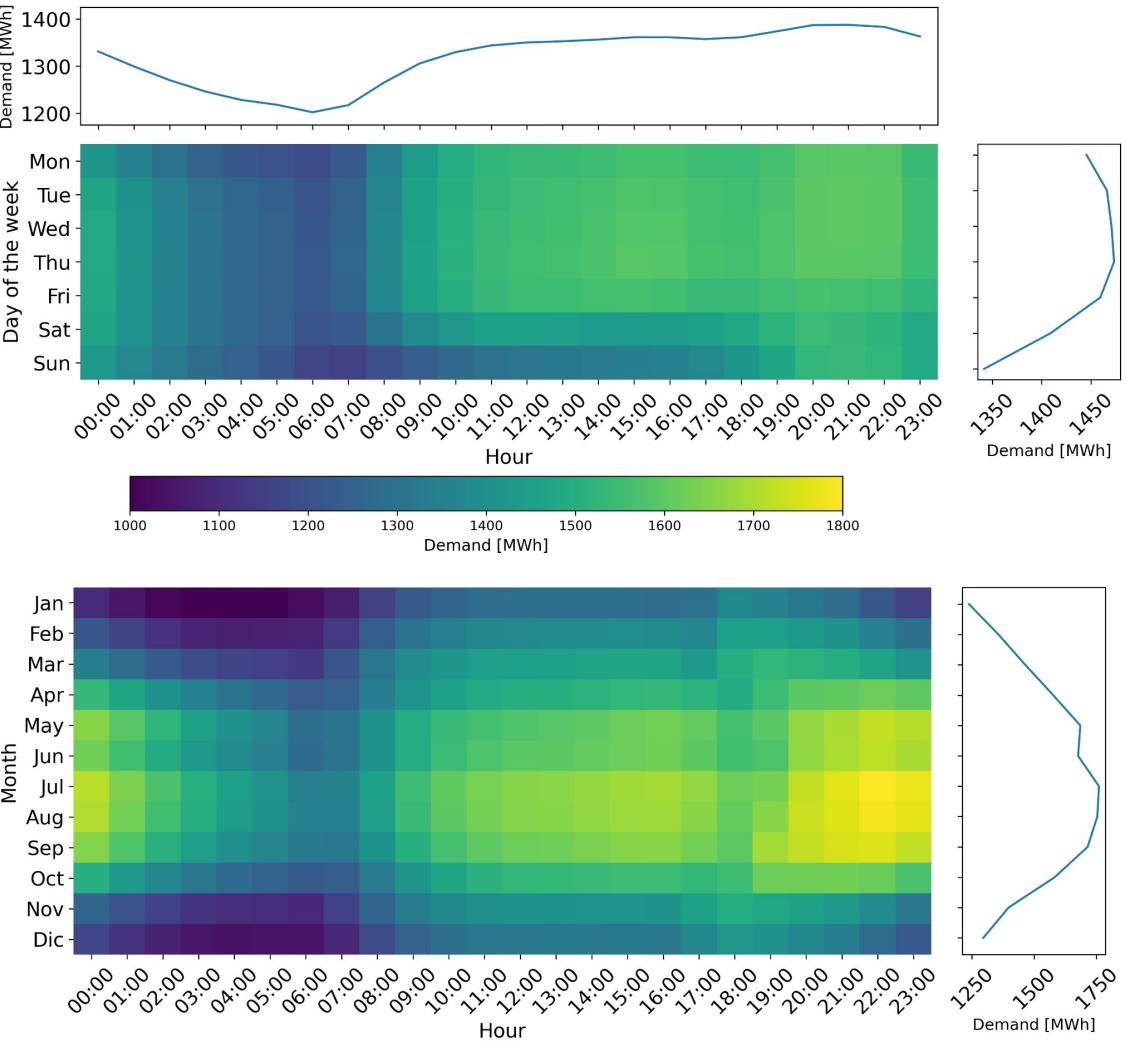
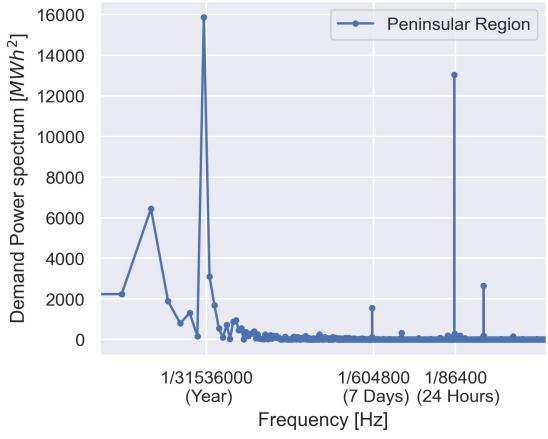
- CENACE, resolución horaria, 2016-2020

Tecnología:

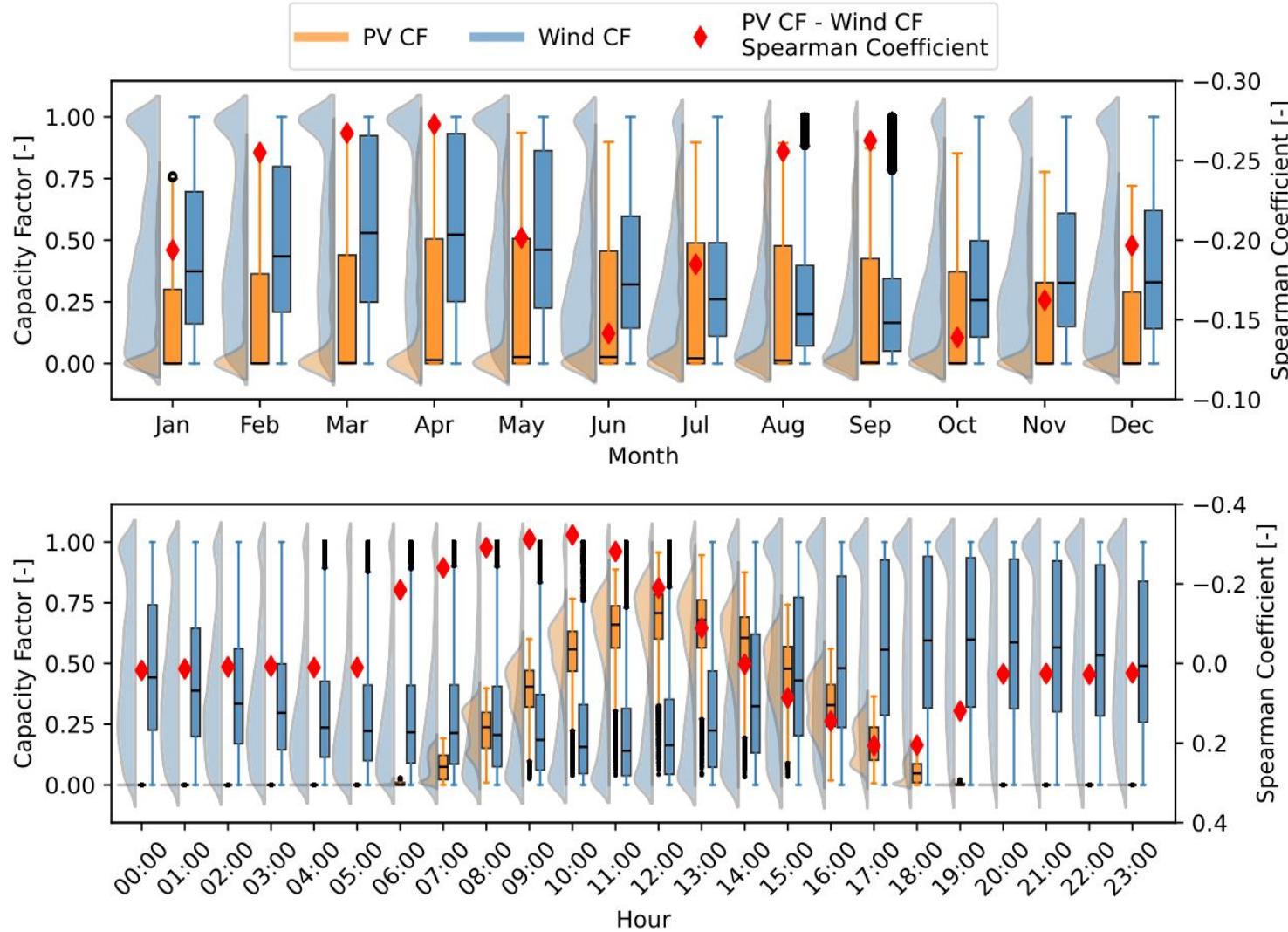
- Turbina de referencia de 10 MW, DTU
- Panel fotovoltaico de referencia de 190 W



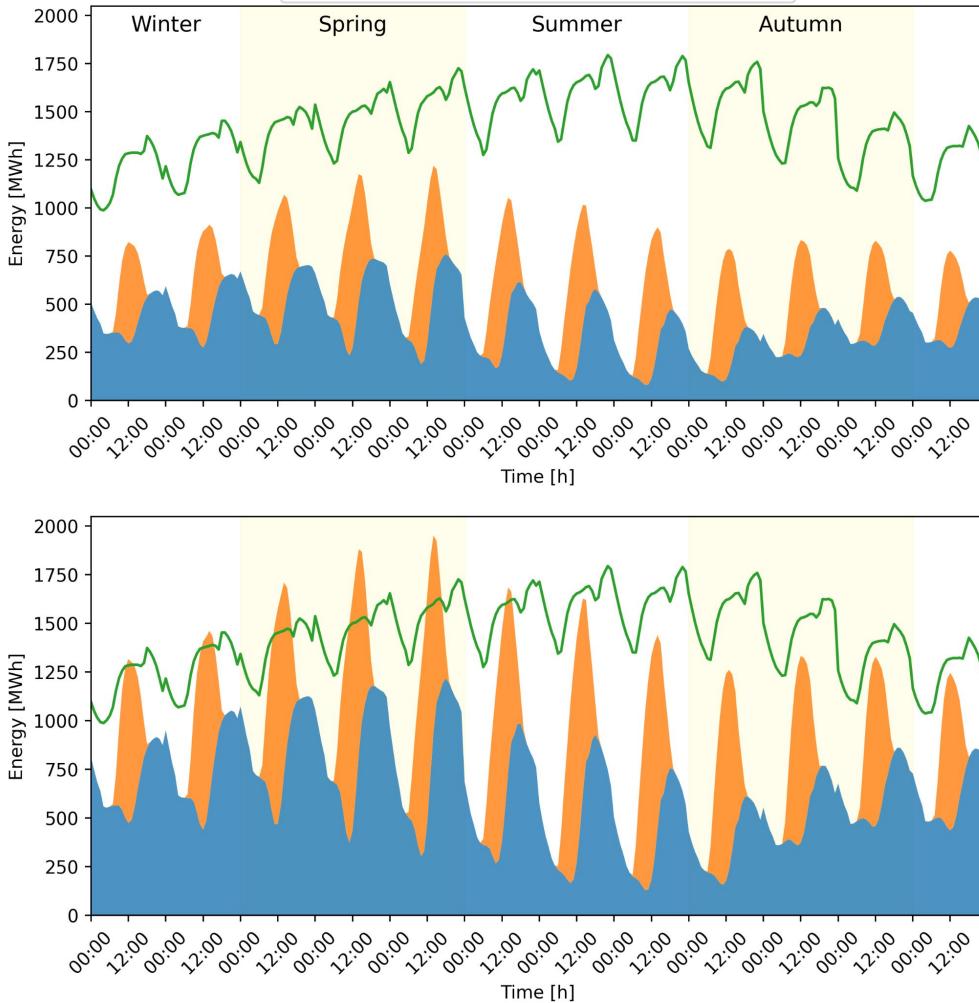
Análisis de la demanda



Análisis de los recursos



Propuesta de integración



Capacidad instalada requerida

	50%	80%
FV	950.2 MW	1520.3 MW
Eólico	966.1 MW	1545.7 MW

Contribuciones y limitaciones

- Se identificaron patrones de consumo eléctrico a escala diaria, semanal y mensual a partir de datos horarios regionales.
- Se estimó el potencial solar fotovoltaico y eólico marino usando datos ERA5.
- Se evaluó la complementariedad entre recursos renovables y su correlación con la demanda eléctrica en escalas diaria y mensual.
- Se desarrollaron dos escenarios de capacidad instalada para cubrir el 50% y el 80% de la demanda eléctrica regional.
- ERA5 tiende a subestimar los valores de velocidades de viento utilizados para evaluar el potencial eólico, por lo que los escenarios de capacidad instalada también puede estar subestimados.
- A partir de la estimación de la capacidad instalada, pueden diversificarse las zonas potenciales para la instalación de las tecnologías.

Variabilidad del recurso eólico: análisis espacial y temporal



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Variabilidad del recurso eólico: análisis espacial y temporal

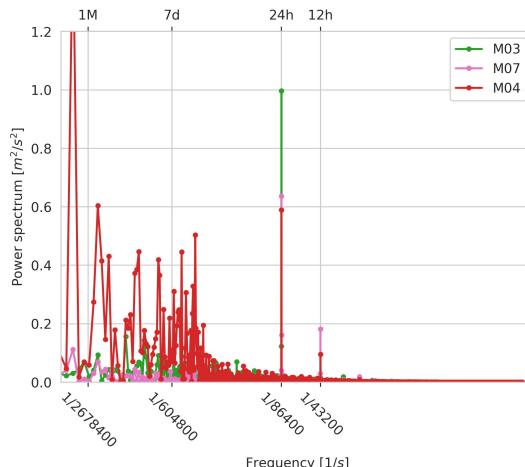
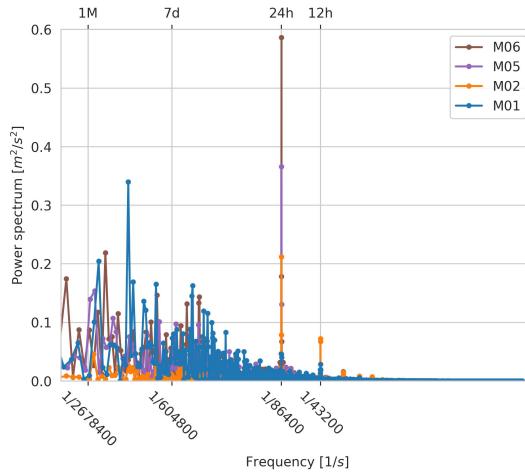
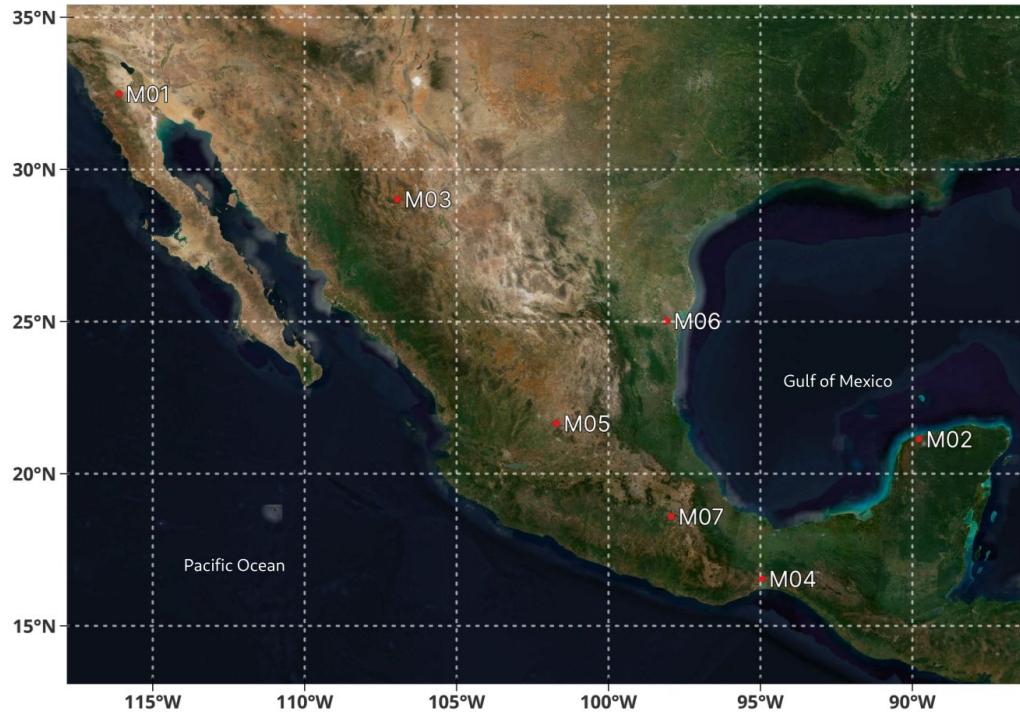


High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Velocidades de viento:

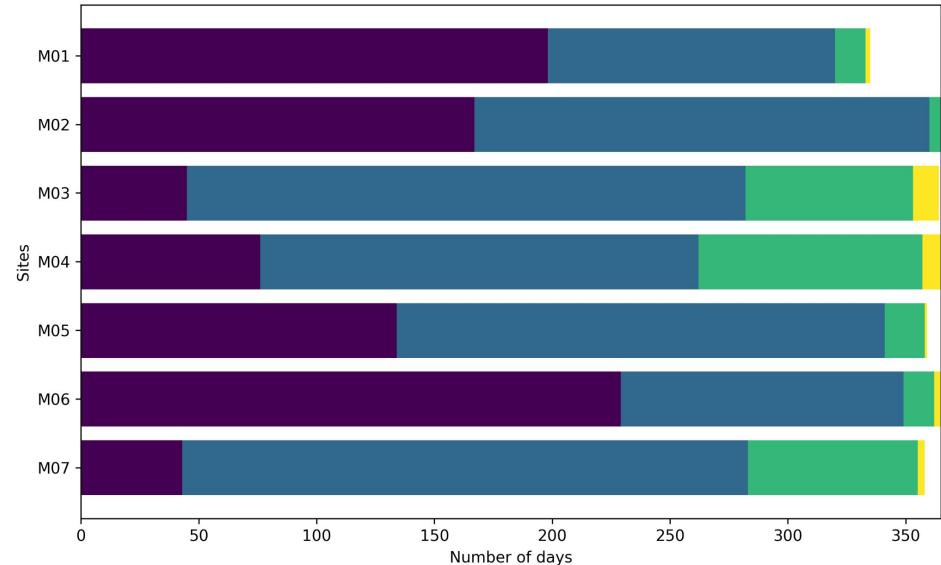
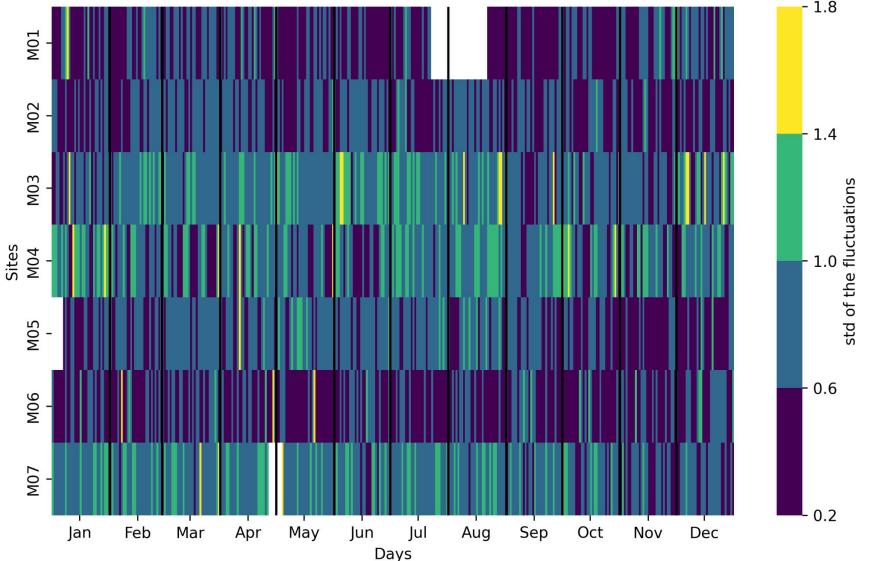
- ERA5, resolución horaria
 - Interpolado a los puntos del AEM
- AEM, resolución 10 min

Variabilidad temporal

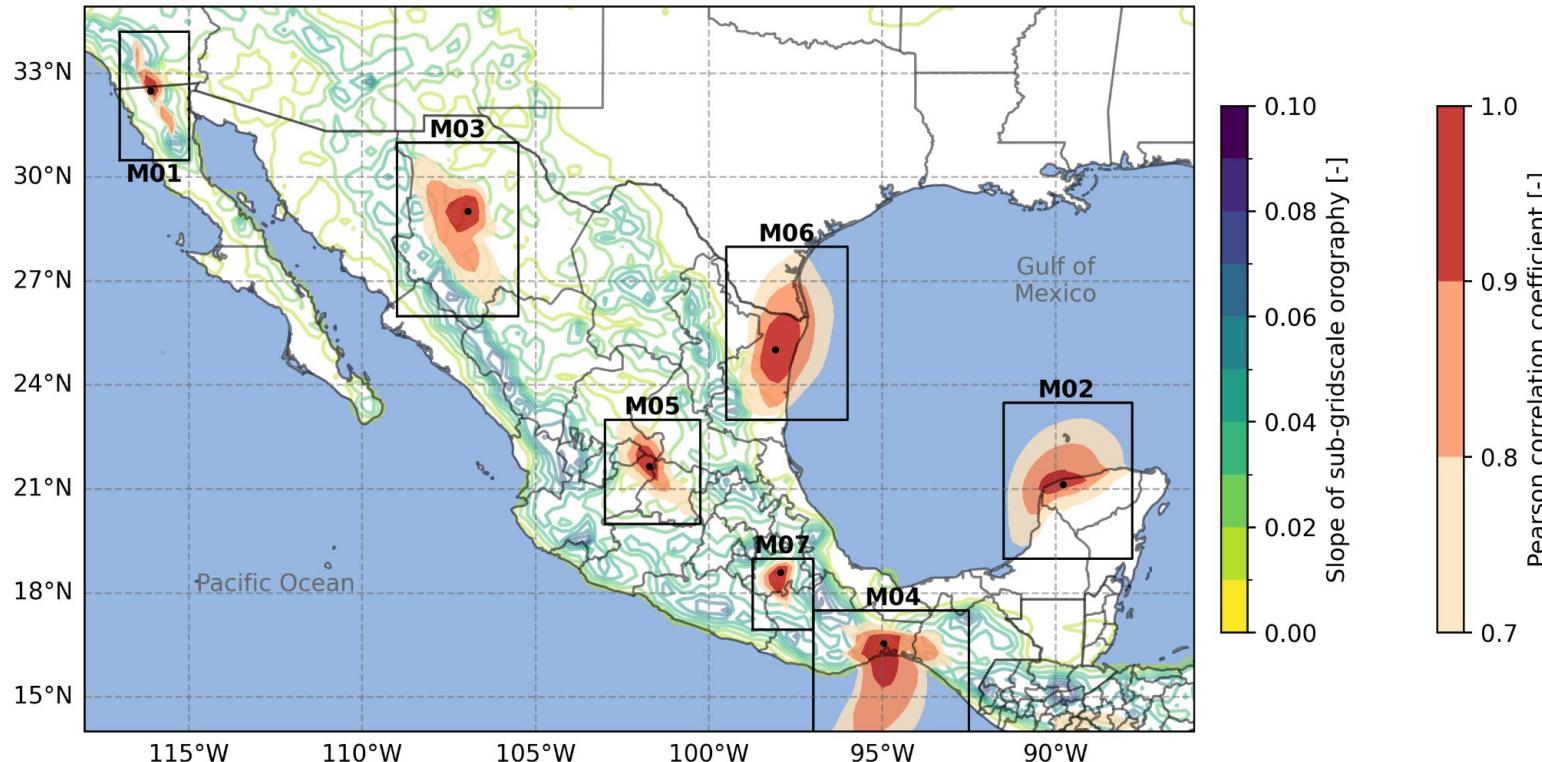


Variabilidad temporal

$$u'_{obs} = u_{obs} - \bar{u}_{obs}$$

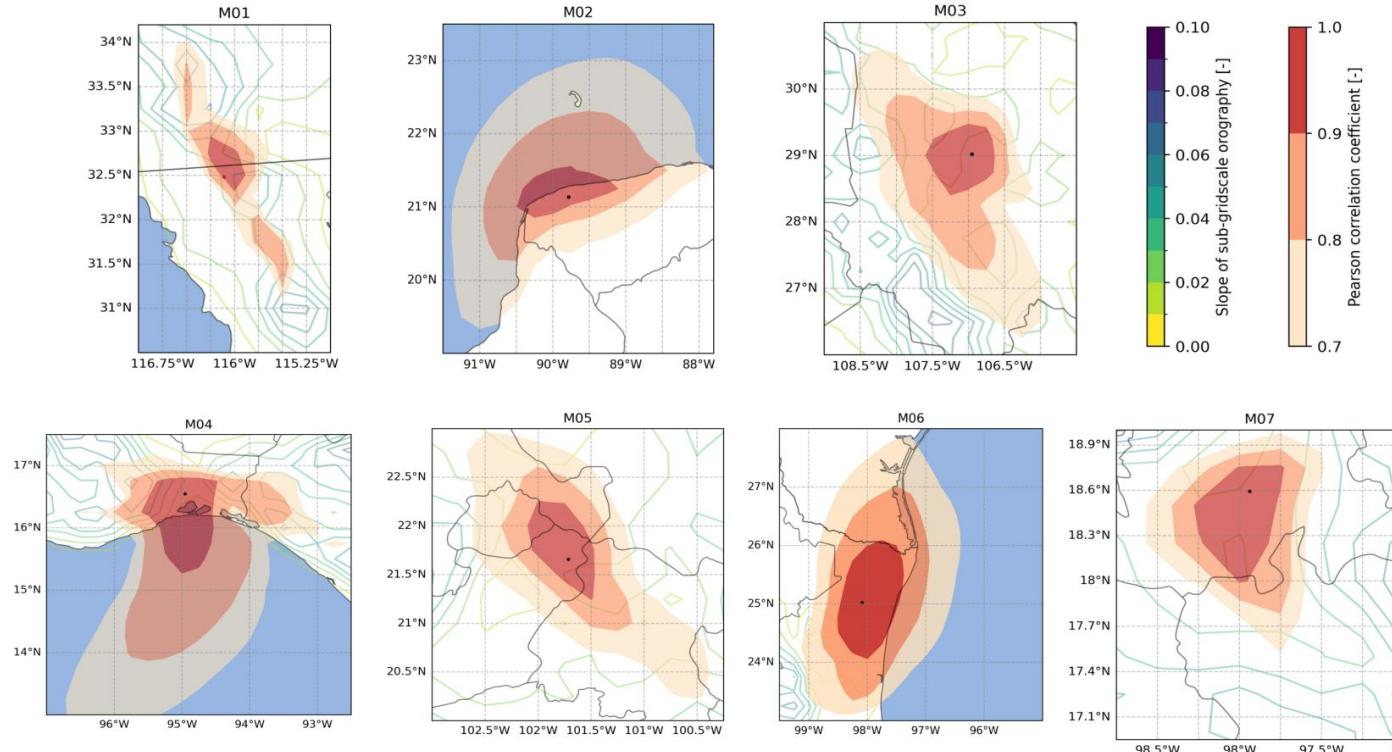


Variabilidad espacial



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Variabilidad espacial



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

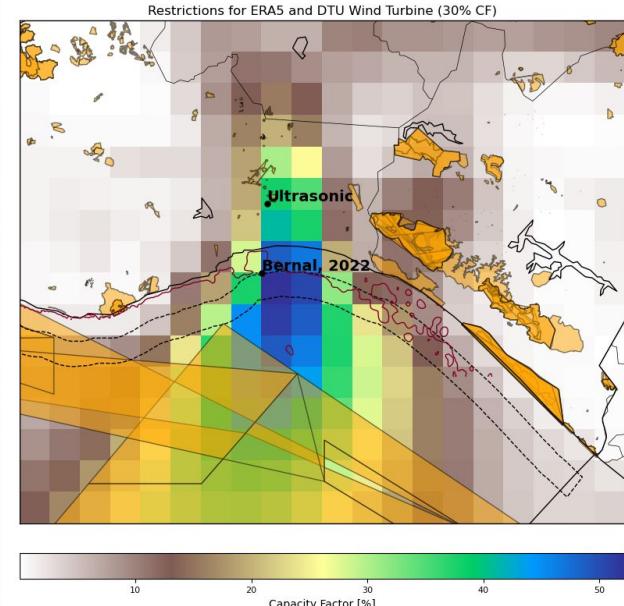
Contribuciones y limitaciones

- Se identificó el ciclo diurno como la frecuencia dominante en las fluctuaciones del viento en 7 sitios distribuidos en México.
- Se clasificaron los sitios en dos grupos: alta y baja variabilidad, con base en el espectro de potencia del viento.
- Se utilizó la desviación estándar de las fluctuaciones turbulentas para caracterizar la variabilidad temporal.
- La variabilidad espacial fue analizada con los datos de ERA5 mediante un análisis de correlación espacial.
- Se observó que la orografía influye en la homogeneidad del recurso: terrenos complejos presentan menor extensión de zonas homogéneas.
- El análisis de la variabilidad está sujeta a la información disponible de los datos observados del AEM.

Desempeño de una turbina eólica flotante en el Golfo de Tehuantepec



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes



Desempeño de una turbina eólica flotante en el Golfo de Tehuantepec

Variables meteorológicas:

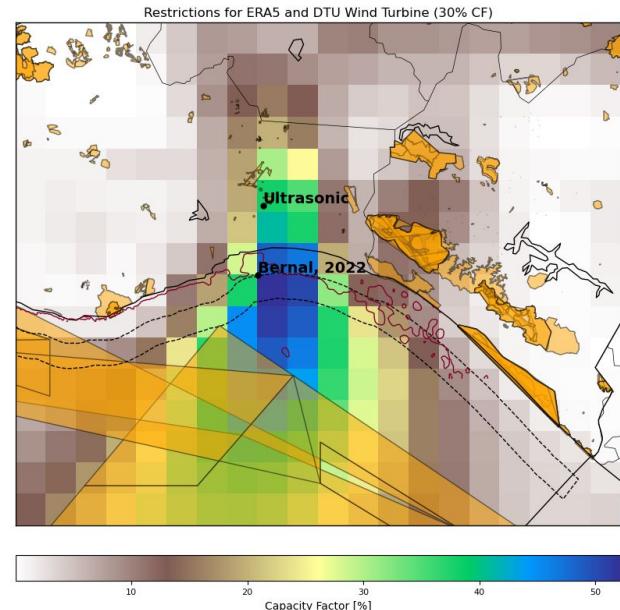
- ERA5, resolución horaria, 1996-2020
 - Velocidades de viento
 - Altura significativa de la ola
 - Periodo de la ola
 - Dirección de la ola

Campos de velocidades de viento:

- Turbsim, resolución 50 ms

Tecnología:

- Turbina de referencia 15 MW, IEA



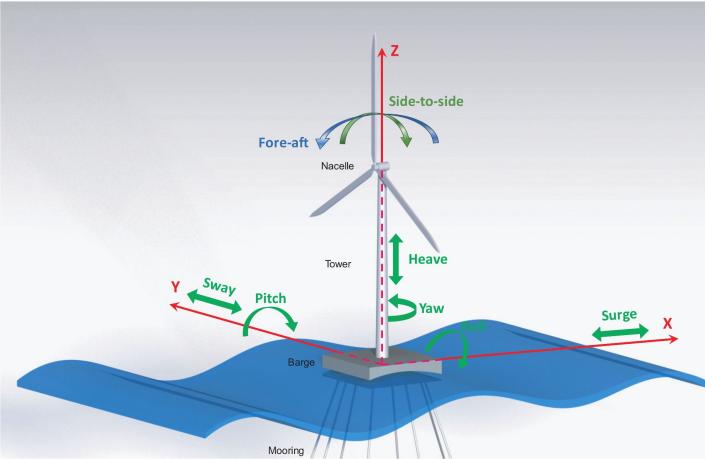
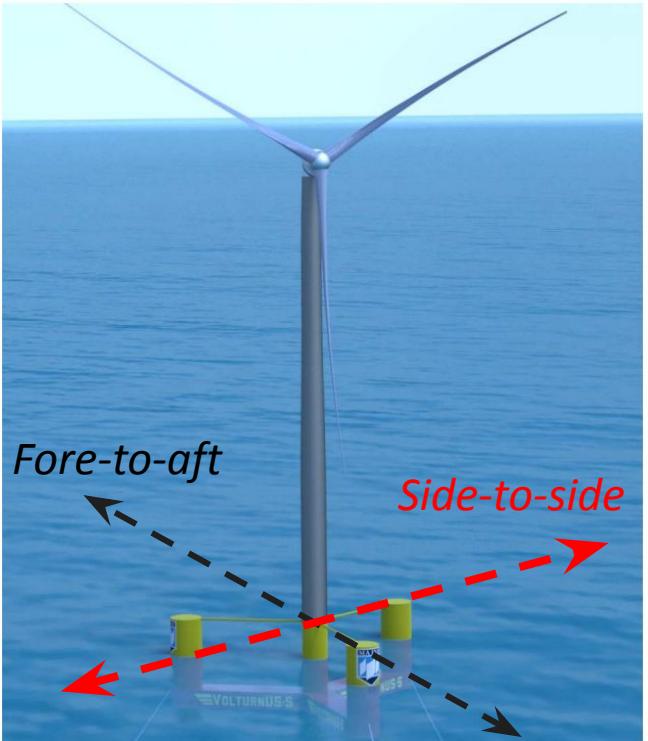
Tecnología

Allen, Christopher, Anthony Viselli, Habib Dagher, Andrew Gougee, Evan Gaertner, Nikhar Abbas, Matthew Hall, and Garrett Barter. Definition of the UMaine VolturnUS Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-7673.
<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/7673.pdf>



Parámetro	Valor
Potencia Nominal	15 MW
Altura del rotor	150 m
Diámetro del rotor	240 m
Velocidad de arranque	3 m/s
Velocidad nominal	10.59 m/s
Velocidad de corte	25 m/s
Tipo de plataforma	Semisubmersible

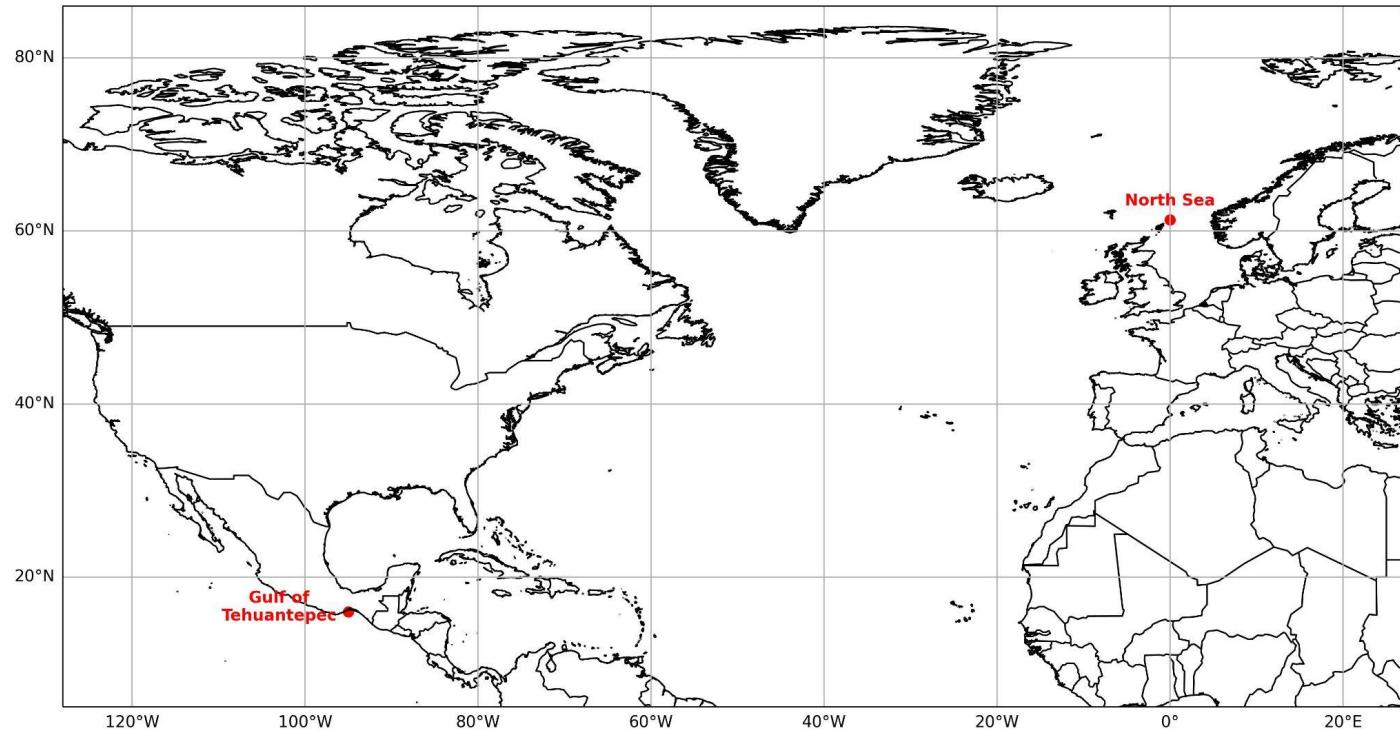
Tecnología



Variables analizadas:

- Side-to-side (TwrBsMxt)
- Fore-to-aft (TwrBsMyt)

Sitio de referencia



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

IEC 61400

Table 1 – Design Load Cases

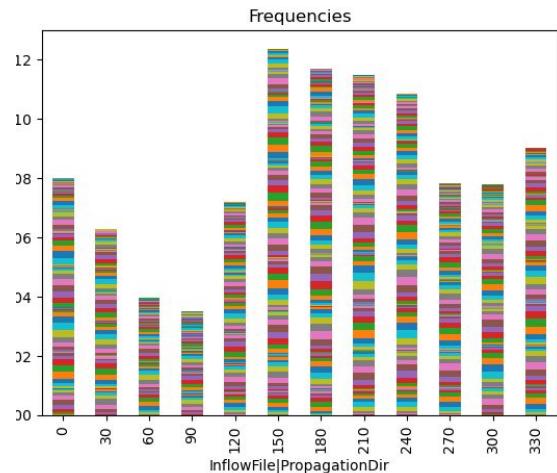
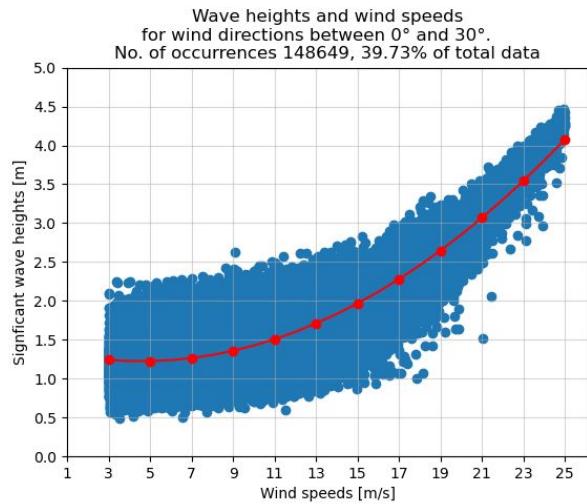
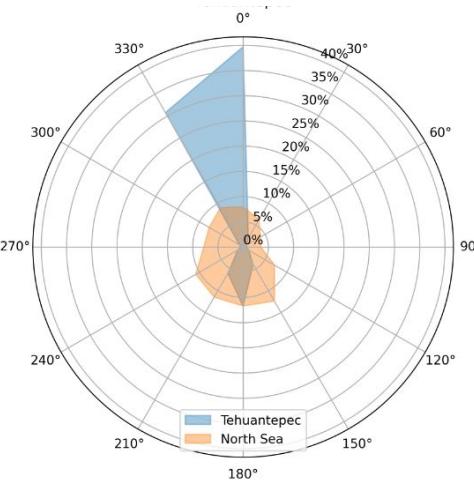
Design situation	DLC	Wind condition	Waves	Wind and wave directionality	Sea currents	Water level	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factor
1.x Power production	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ RNA	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	For extrapolation of extreme loads on the RNA	U	N (1.25)
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL	No currents	NWLR or \geq MSL		F	*
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}, V_r, V_r + 2 \text{ m/s}$	NSS (or NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	MIS, wind direction change	NCM	MSL		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (or NWH) $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL		U	N
	1.6a	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	COD, UNI	NCM	NWLR		U	N
	1.6b	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SWH $H = H_{SWH}$	COD, UNI	NCM	NWLR		U	N

Definición de casos

1. Dividir las direcciones de viento en intervalos de 30° (0° - 30° , 30° - 60° , ..., 330° - 360°).
2. Para los datos entre dichos intervalos, ajustar un polinomio entre las velocidades de viento durante la operación de la turbina (3, 5, 7, ..., 23, 25 m/s) y las alturas de ola, de tal forma que se puede obtener una “altura representativa” para cada velocidad de viento.
3. Se obtienen las frecuencias del periodo de cada ola y su dirección para los intervalos de velocidad (3-5 m/s, 5-7 m/s, ..., 23-25 m/s)
4. Cada caso se define como una combinación única de periodo de la ola con una altura representativa y dirección para cada intervalo de velocidades y cada intervalo de direcciones del viento.

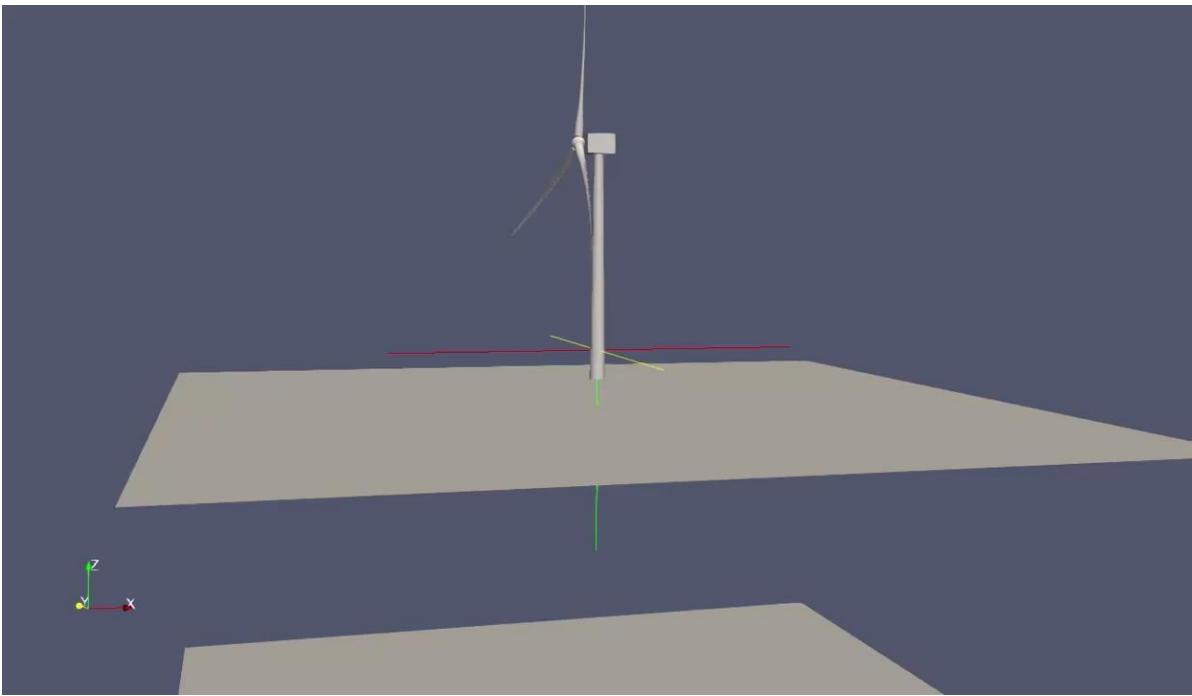
Definición de casos

<u>_name_</u>	Tmax	Tstart	InflowFile Filename_BTS	HydroFile WaveDir	HydroFile WaveHs	HydroFile WaveTp	InflowFile PropagationDir
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	3	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	5	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	7	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	9	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	11	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	13	0
case_nortl	1000	400	/home/dacr/turbines_openfast_wf_tower/data/wind/turbsim_003.bts	-150	1.678137207	15	0



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

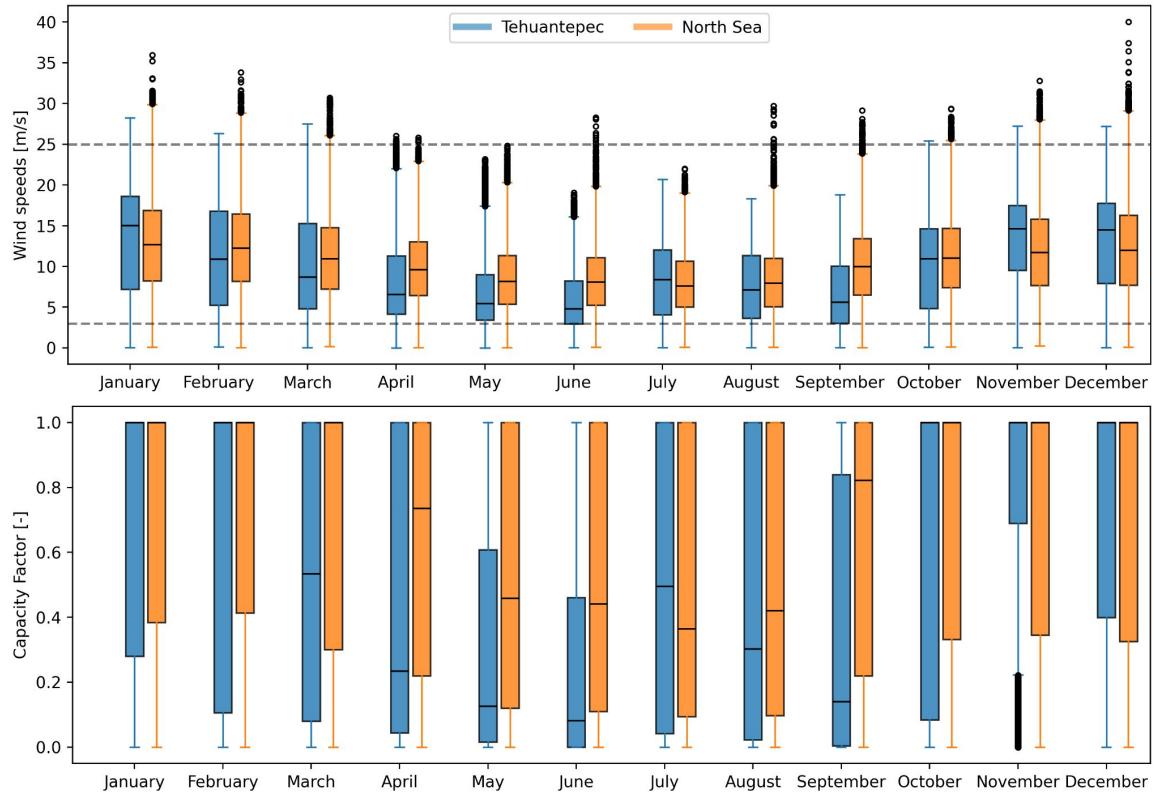
Simulaciones: OpenFAST



Las simulaciones tuvieron una duración de 10 minutos.

Para el periodo de 25 años, se identificaron 186,360 eventos distribuidos en 1,772 simulaciones únicas en Tehuantepec. Para el Mar del Norte fueron 204,102 eventos distribuidos en 5,321 simulaciones.

Recurso eólico y producción de energía

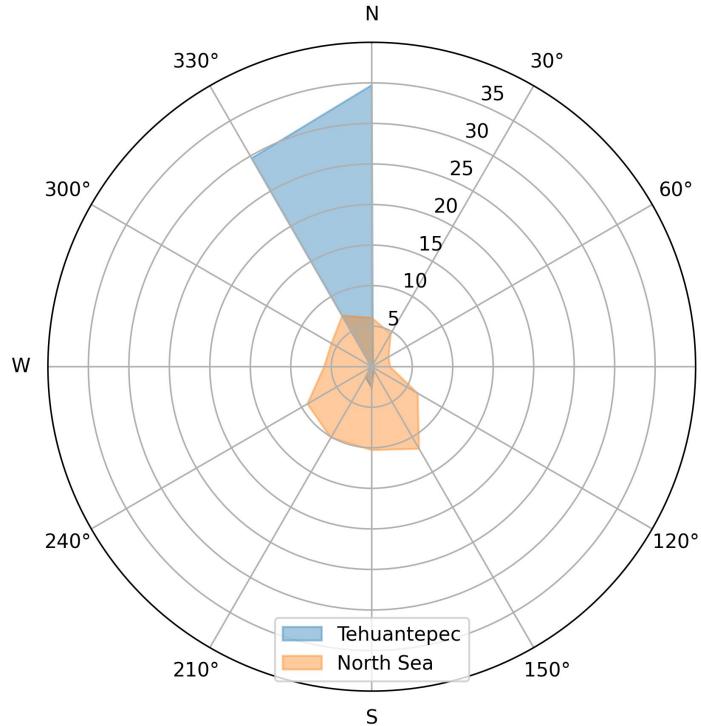


Valores anualizados del CF:

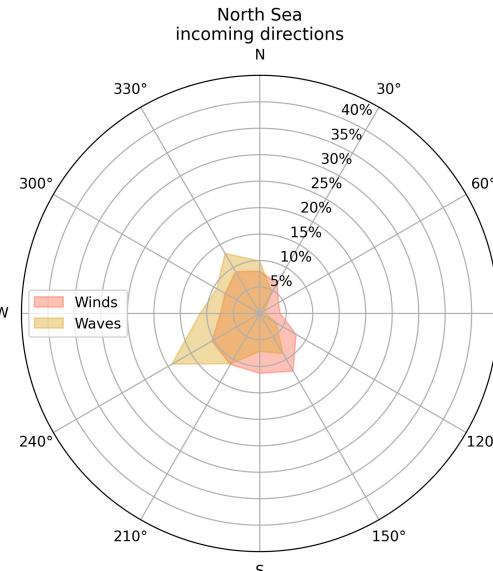
- Tehuantepec, 0.54
- Mar del Norte, 0.63

Direcciones de viento y olas

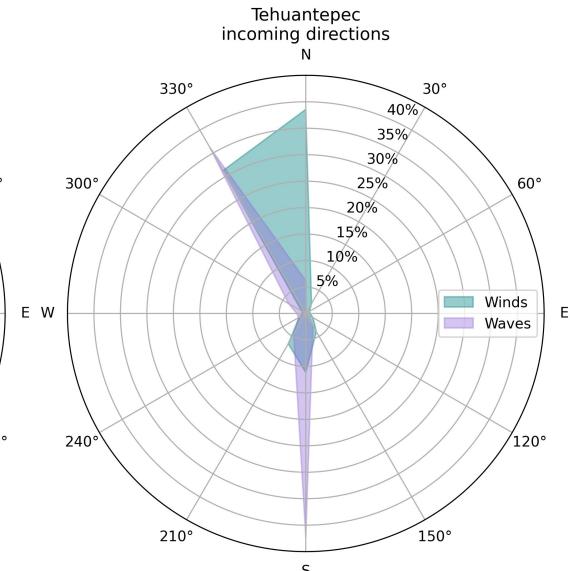
Annualized energy generated [GWh]



North Sea
incoming directions

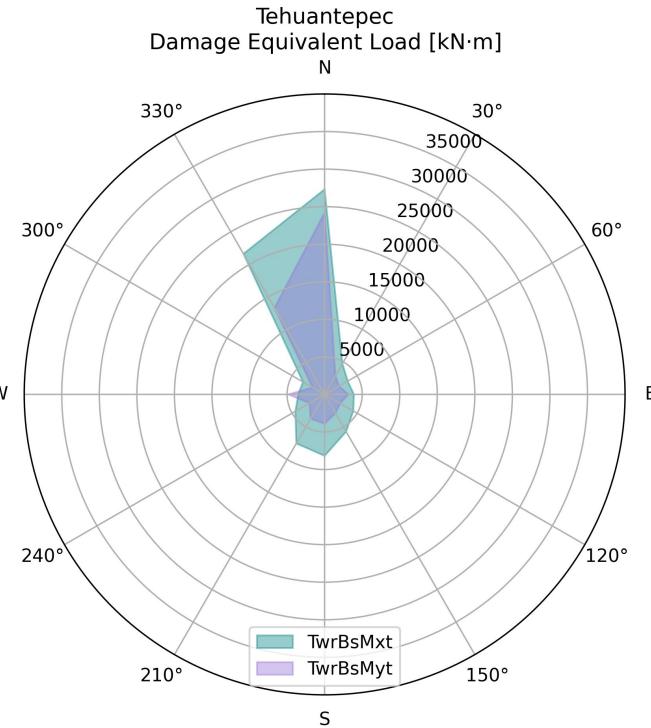
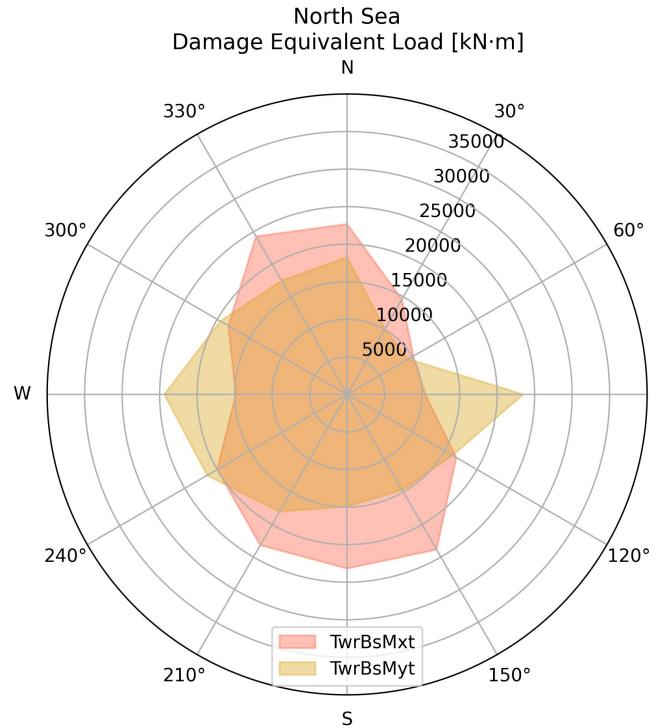


Tehuantepec
incoming directions

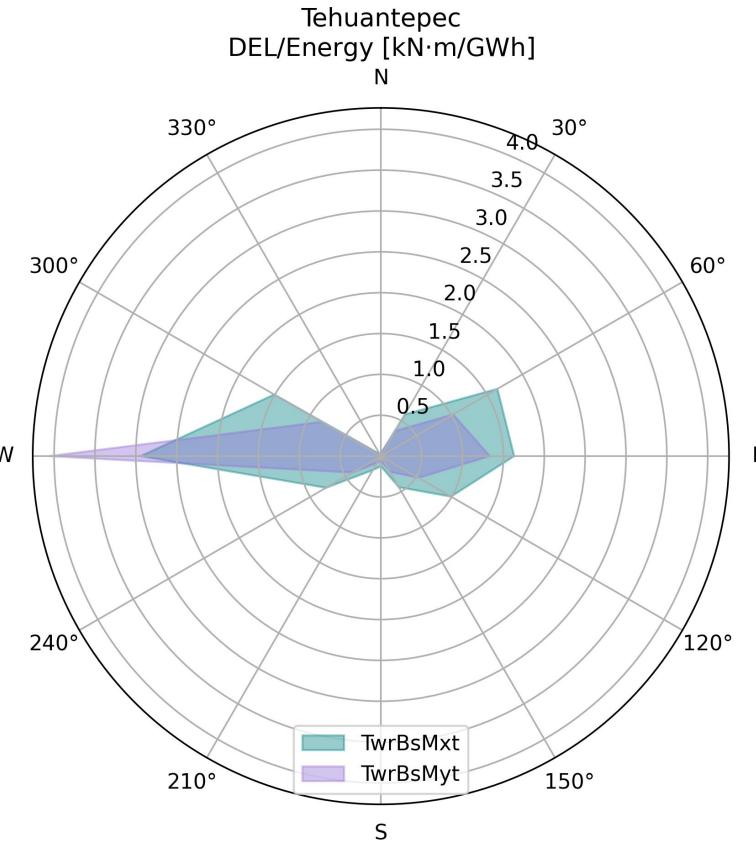
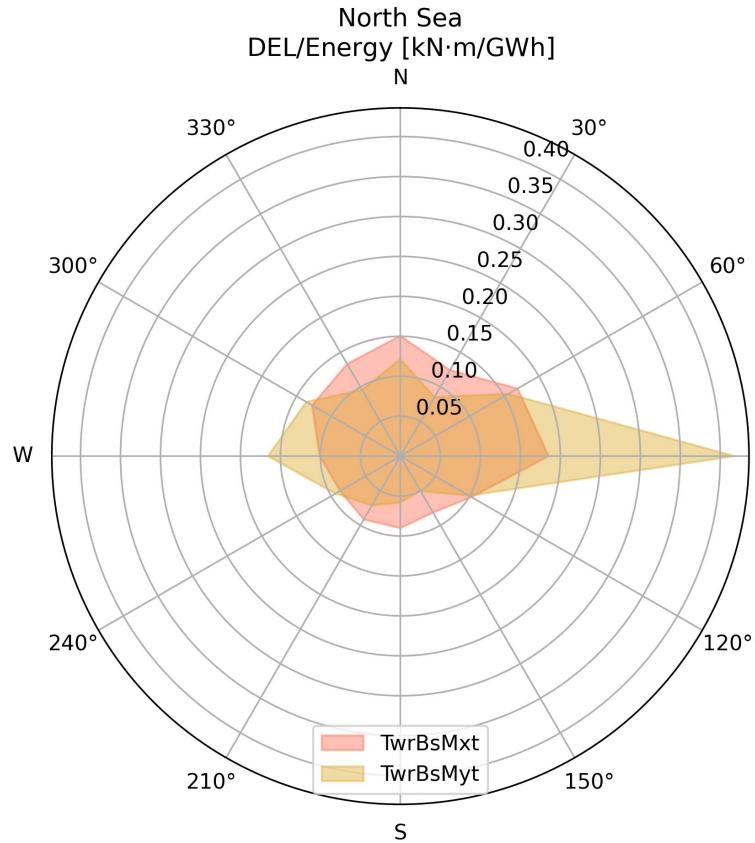


Damage Equivalent Loads

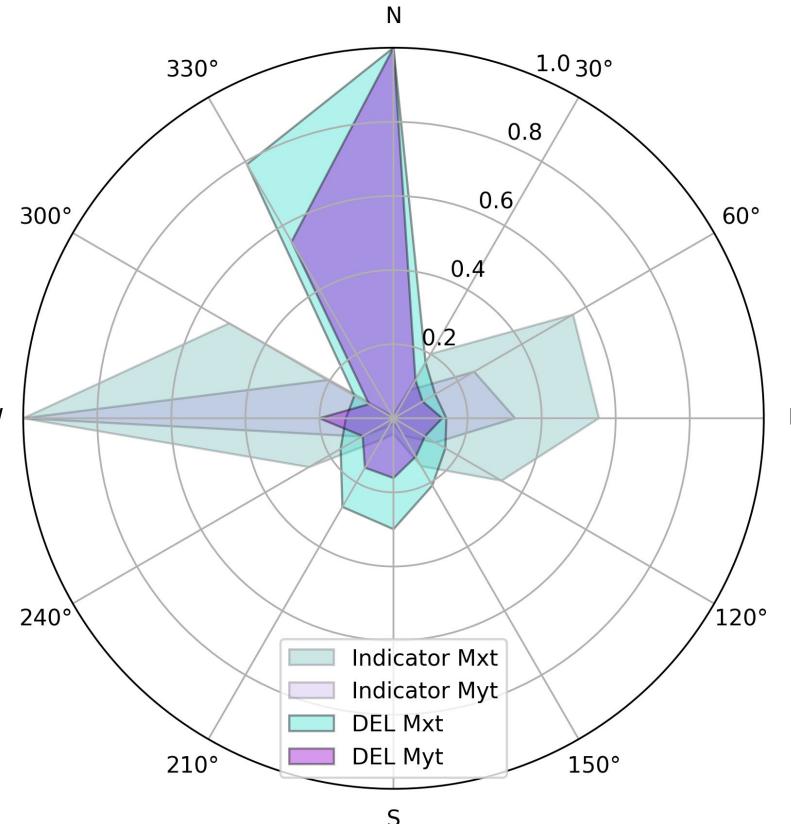
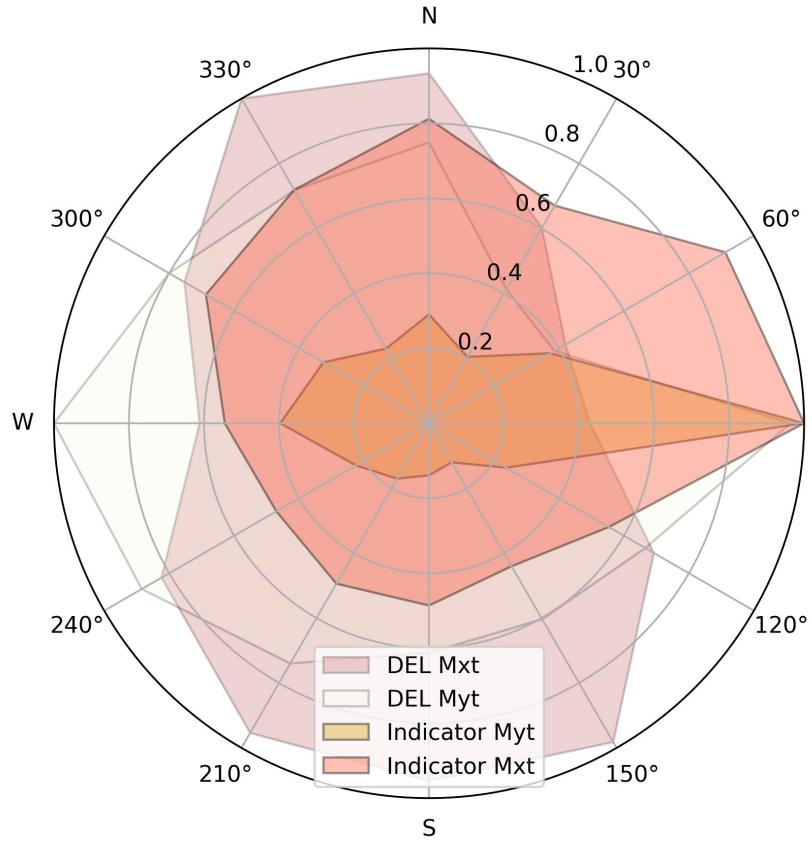
$$\text{DEL}_{M_{dirp}} = \left(\sum_r P_r \left(\sum_i \frac{n_i M_i^k}{T_{sim}} \right) \right)^{1/k}$$



DEL/Energy



DEL/Energy



Contribuciones y limitaciones

- Se caracterizaron las condiciones meteorológicas y oceánicas del Golfo de Tehuantepec y del Mar del Norte utilizando 25 años de datos ERA5.
- A partir de estas caracterizaciones, se estimaron las cargas de fatiga de una turbina eólica flotante de 15 MW bajo condiciones operativas reales.
- Las simulaciones se realizaron con OpenFAST, con resolución temporal de 50 ms y duración de 10 minutos cada una.
- El Golfo de Tehuantepec presentó recursos eólicos intensos desde el norte y noreste, pero también mayores cargas de fatiga en esas direcciones.
- Los resultados deben considerarse recomendaciones preliminares, ya que las simulaciones teóricas simplifican fenómenos físicos complejos.
- Se sugiere realizar pruebas experimentales con prototipos en zonas estratégicas antes de avanzar hacia su implementación.

Resolución de ERA5
Horaria

Resolución de otras fuentes

Demanda eléctrica:
Horaria

Observaciones del AEM:
10 minutos

Campos de velocidad de viento:
50 ms



Conclusiones

El viento es un fenómeno complejo y dinámico, y su entendimiento requiere herramientas acorde a cada caso de estudio. Esta tesis abordó tres desafíos relacionados con la integración de energía eólica en México, mediante distintos análisis realizados a diferentes escalas de la velocidad del viento.

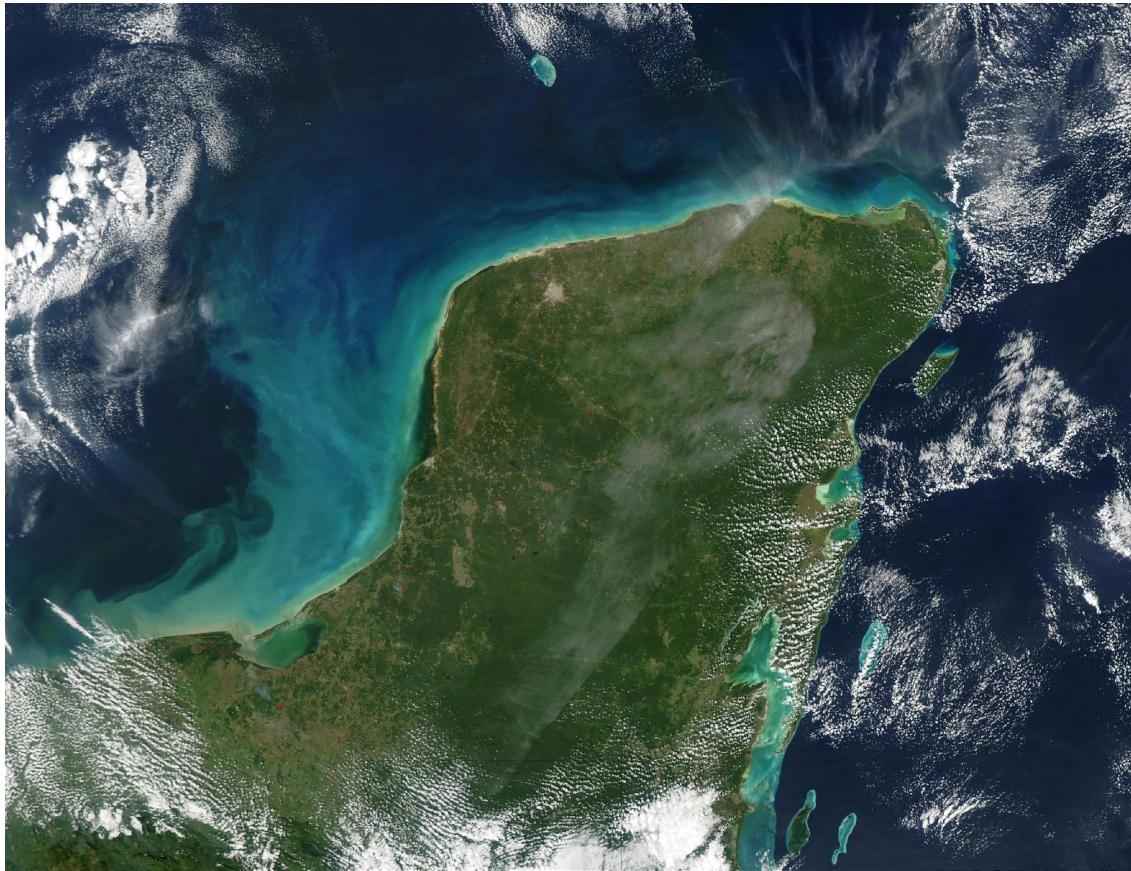
El reanálisis ERA5 fue la herramienta principal de los tres estudios, en conjunto con otras fuentes de información como datos de la demanda eléctrica, observaciones meteorológicas y otras herramientas de simulación, permitiendo:

- Evaluar el potencial de los recursos renovables eólico y solar y hacer una propuesta para satisfacer la demanda regional.
- Analizar la variabilidad regional, espacial y temporal del recurso eólico en distintas partes del país.
- Comparar el desempeño de una turbina eólica flotante, mediante la caracterización de las condiciones meteorológicas y oceánicas en dos sitios de interés.

Conclusiones

Este trabajo representa un paso firme hacia una planificación energética más robusta, informada y adaptada a las particularidades del recurso eólico en México. En un país con una geografía compleja y desafíos técnicos diversos, contar con datos confiables y herramientas especializadas es indispensable para reducir la incertidumbre y avanzar hacia un sistema energético más sostenible.

Los marcos metodológicos desarrollados en esta tesis no sólo enriquecen el entendimiento del recurso eólico, sino que también ofrecen soluciones concretas a retos actuales de la planeación energética nacional: desde estimaciones más realistas en regiones con escasa información, hasta la evaluación rigurosa de tecnologías emergentes en el país.



Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC

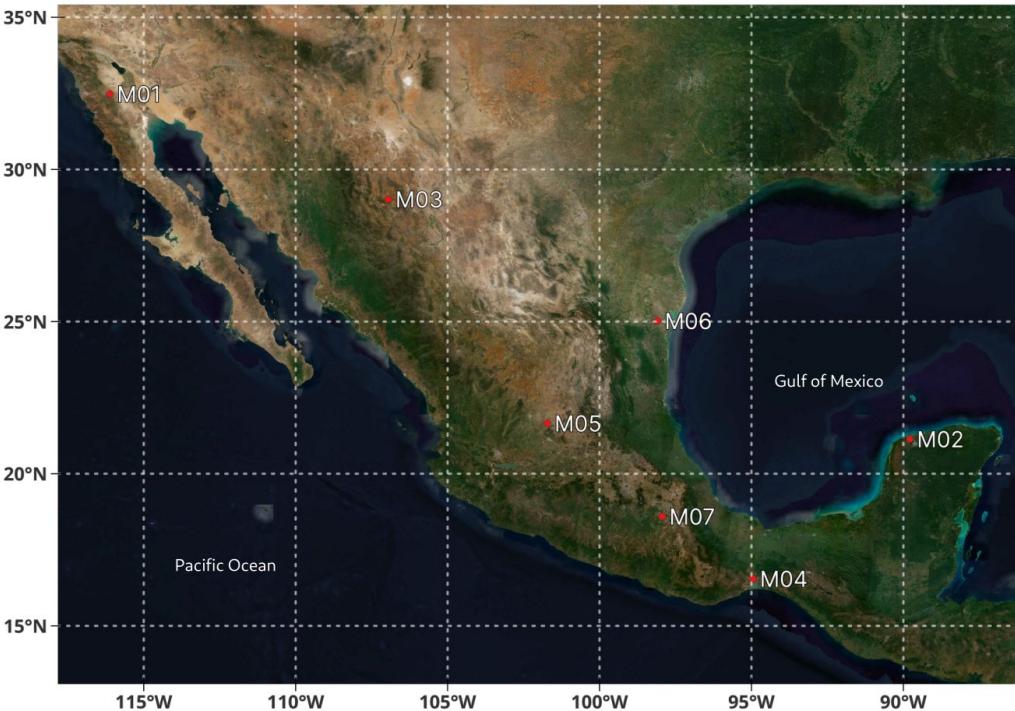
High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

¡Gracias por su
atención!

Acceso a la tesis:

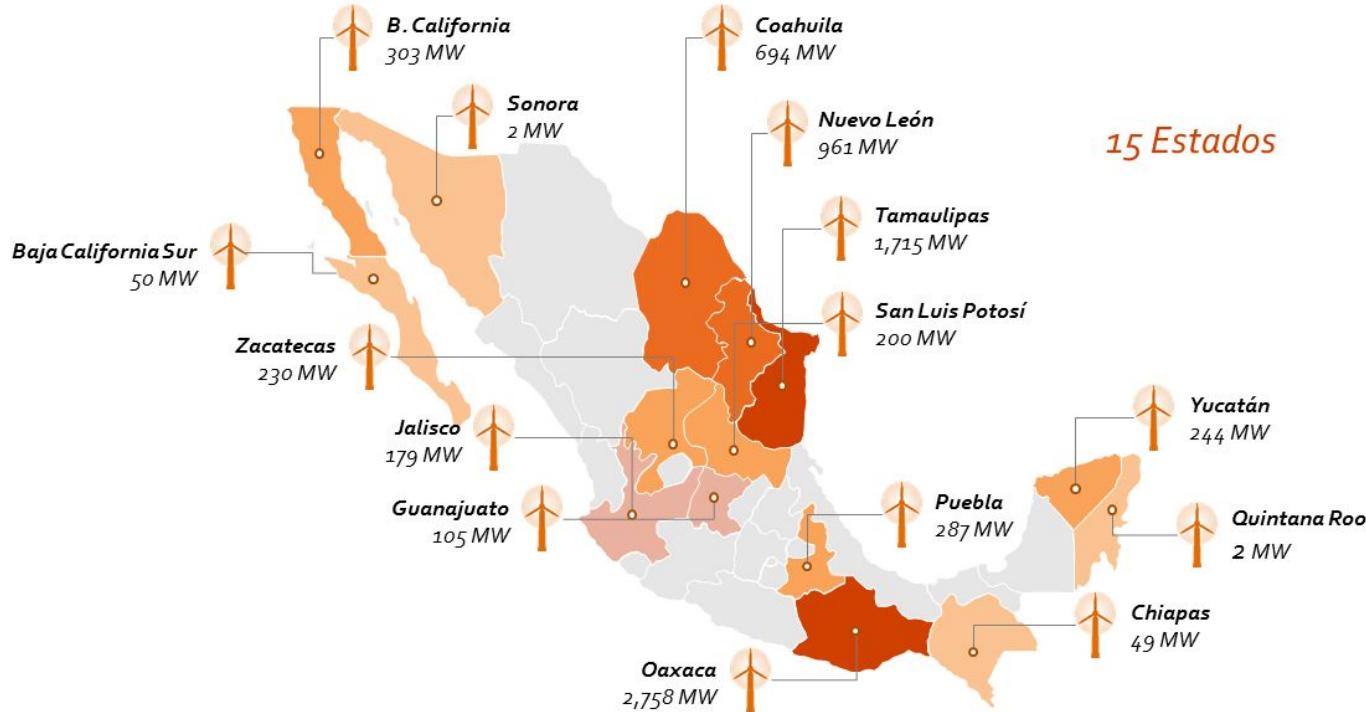


Ubicación de las torres del AEM



Site	Location	Longitude	Latitude	Time Zone
M01	La Rumorosa, B. C.	-116.11	32.48	UTC-08:00
M02	Merida, Yuc.	-89.78	21.14	UTC-06:00
M03	Cd. Cuauhtémoc, Chih.	-106.95	29.02	UTC-06:00
M04	CERTE, La Ventosa, Oax.	-94.95	16.55	UTC-06:00
M05	Ojuelos, Jal.	-101.71	21.67	UTC-06:00
M06	San Fernando, Tamps.	-98.09	25.02	UTC-06:00
M07	Tepexi, Pue.	-97.94	18.59	UTC-06:00

Energía eólica en México



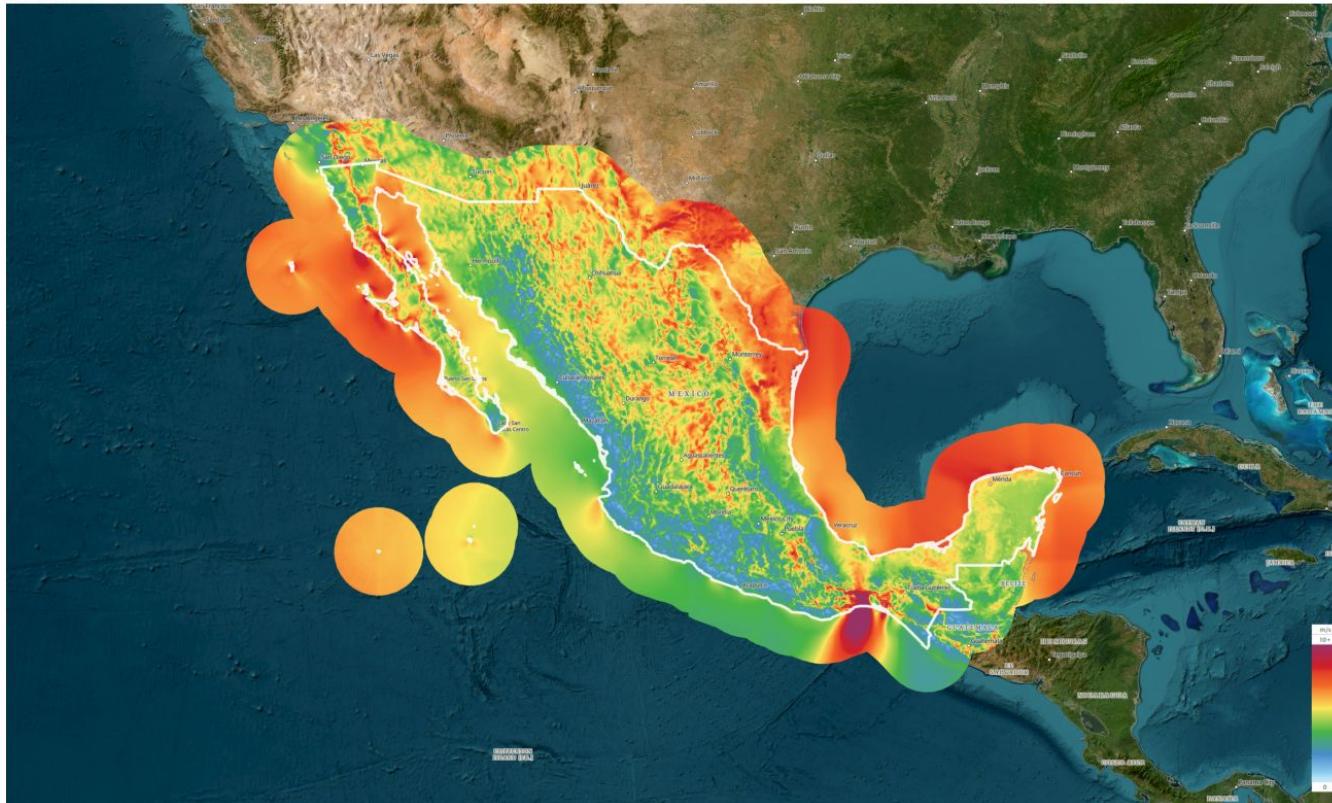
High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Energía eólica en México

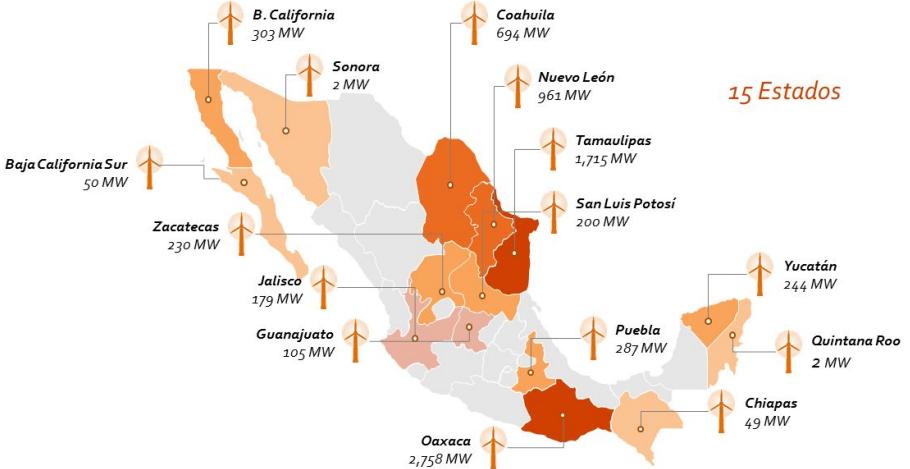
GLOBAL WIND ATLAS

MEAN WIND SPEED AT 100m

MEXICO

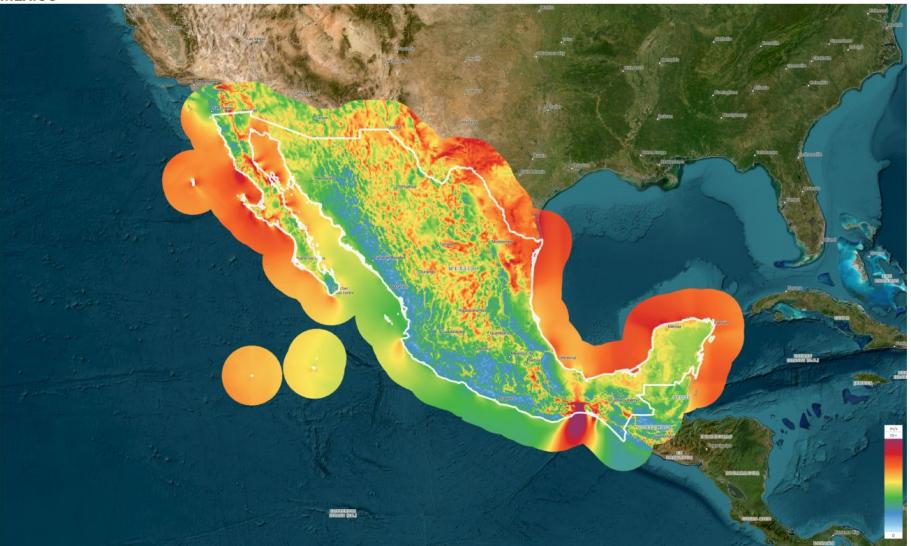


Energía eólica en México



GLOBAL WIND ATLAS
MEAN WIND SPEED AT 100m
MEXICO

WORLD BANK GROUP ESMAP DTU VORTEX



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Cálculo de la energía FV

The power output P_{out} of a PV module with a rated power, P_N , a power temperature coefficient, γ and a rate coefficient c_1 is calculated as:

$$P_{out} = \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot P_N \cdot c_1 \left[1 + \frac{\gamma}{100} (T_{PV} - T_{STC}) \right] \quad (2.6)$$

where G_t and G_{STC} are the solar irradiances at the site and standard test conditions (STC), respectively, and $T_{STC} = 25^\circ \text{C}$. The PV module temperature T_{PV} is calculated as:

$$T_{PV} = T_a + G_t \cdot \frac{T_{PV,TETC} - T_{a,TETC}}{G_{TETC}} \quad (2.7)$$

where T_a is the ambient temperature, $T_{PV,TETC} = 47^\circ \text{C}$ and $T_{a,TETC} = 20^\circ \text{C}$ are the module and ambient temperatures at Temperature Estimation Test Condition (TETC), and $G_{TETC} = 800 \text{ W/m}^2$ is the irradiance at TETC.

Panel de 190 W

Parameters of the typical PV panel.

Rated power (W)	Derating coefficient (%)	Power temperature coefficient (%/°C)
190	93	-0.5

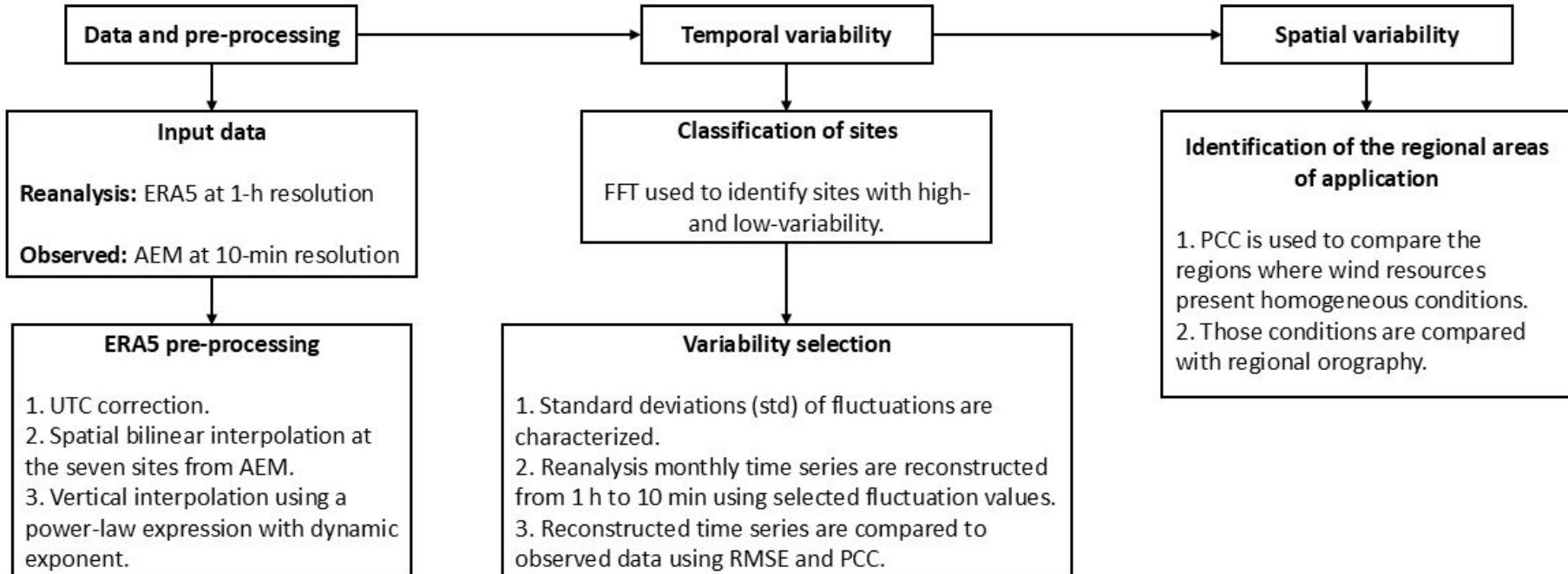
Dimensionamiento de tecnologías

Capacidad instalada requerida

	50%	80%
FV	950.2 MW	1520.3 MW
Eólico	966.1 MW	1545.7 MW

Para satisfacer el escenario del 80%, por un lado se requieren 104 turbinas de 15 MW instalados cada uno. En el caso de la tecnología FV, existen 1,941,252 hogares ocupados en conjunto entre los tres estados de la Península, los cuales requerirían instalar 1 kW para la capacidad instalada.

Metodología variabilidad espacial y temporal



Reconstrucción de series temporales

We assume the wind speed, u , can be decomposed into a mean and a fluctuating (turbulent) component [33]:

$$u = \bar{u} + u' \quad (4.1)$$

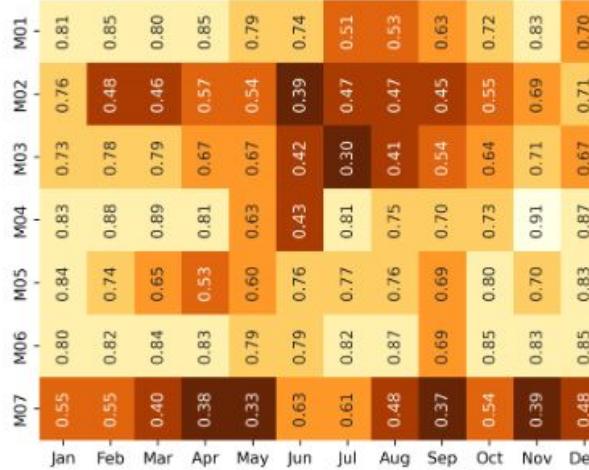
where \bar{u} is the mean and u' is a fluctuating component. Because u_{obs} is the time series with high temporal resolution, first, the mean values are obtained at the same resolution of u_{ren} , which is hourly. This average is named \bar{u}_{obs} . Then, the fluctuation of each observation at its original frequency is calculated, u'_{obs} :

$$u'_{obs} = u_{obs} - \bar{u}_{obs} \quad (4.2)$$

These fluctuations can be characterized by a normal probability density function (pdf) [34], also identified in our findings. Based on the normal pdf obtained, wind speed fluctuations with a random distribution at the resolution of the observations, u'_{pdf} , are reconstructed and subsequently added to u_{ren} :

$$u_{new} = u_{ren} + u'_{pdf} \quad (4.3)$$

Reconstrucción de series temporales



(a) Pearson correlation coefficient at 1-hour resolution.



(b) Differences between Pearson at 1-hour resolution and 10 min reconstructed time series.

Figure 4.5: The left columns at each month (∇) indicate using the reconstruction methodology with the min std, and the right columns (Δ) are max std.

Reconstrucción de series temporales

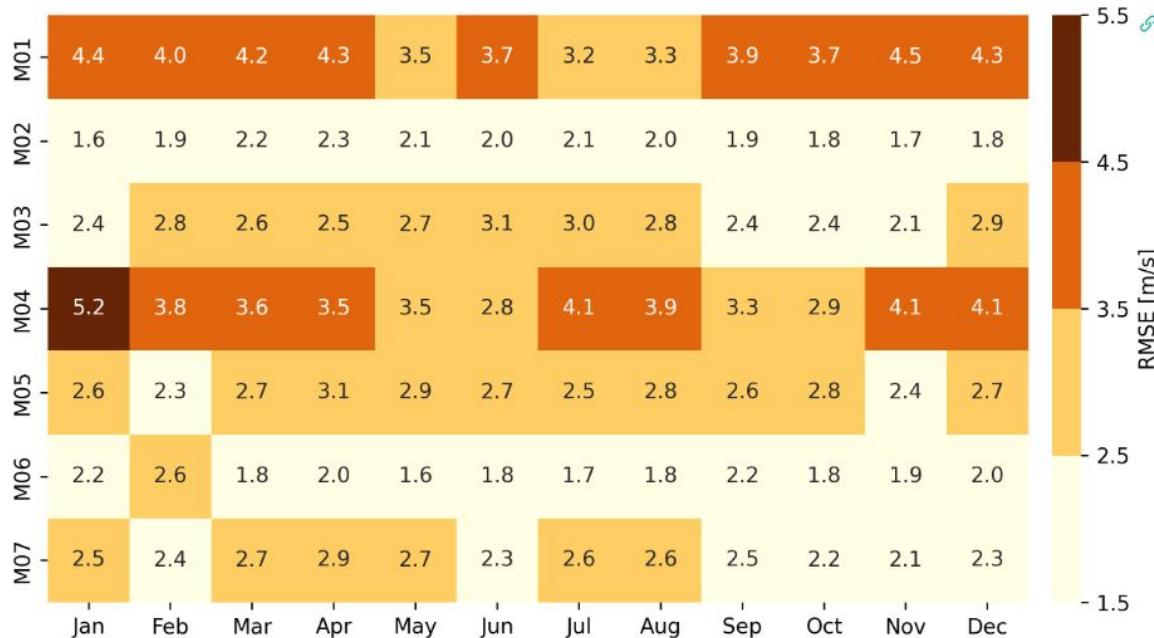


Figure 4.6: Monthly RMSE between 10-min experimental time series and the reconstructed by using minimum dispersion values.

Reconstrucción de series temporales

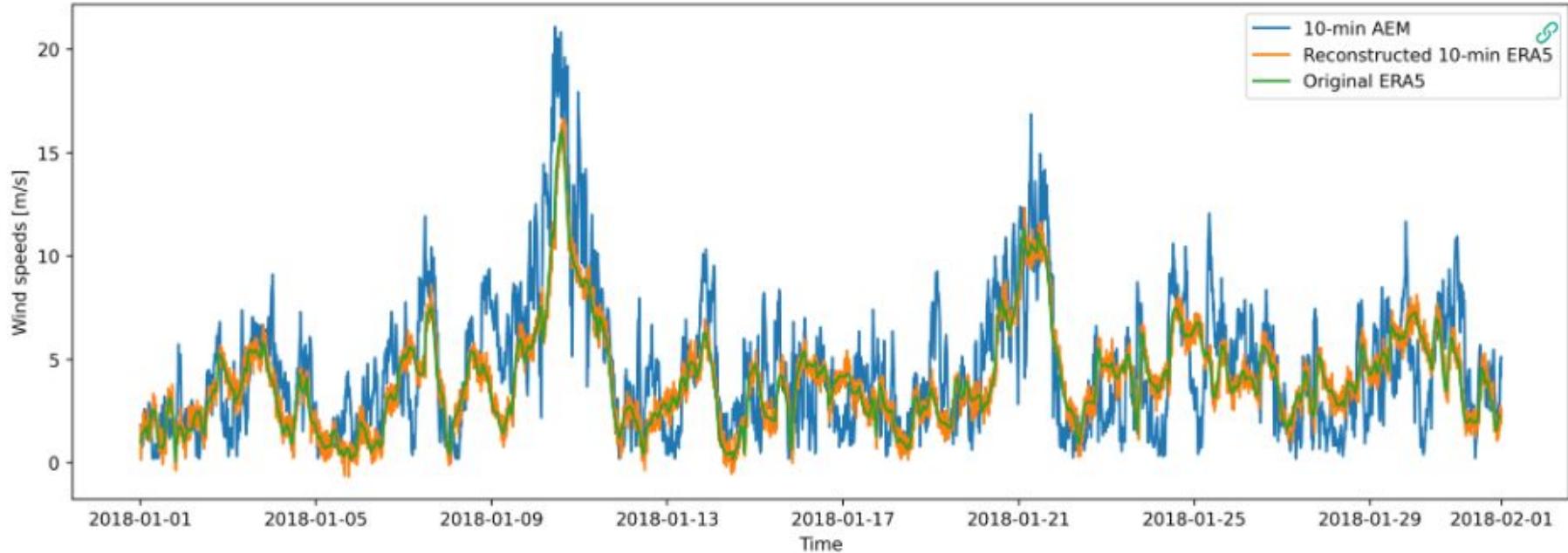
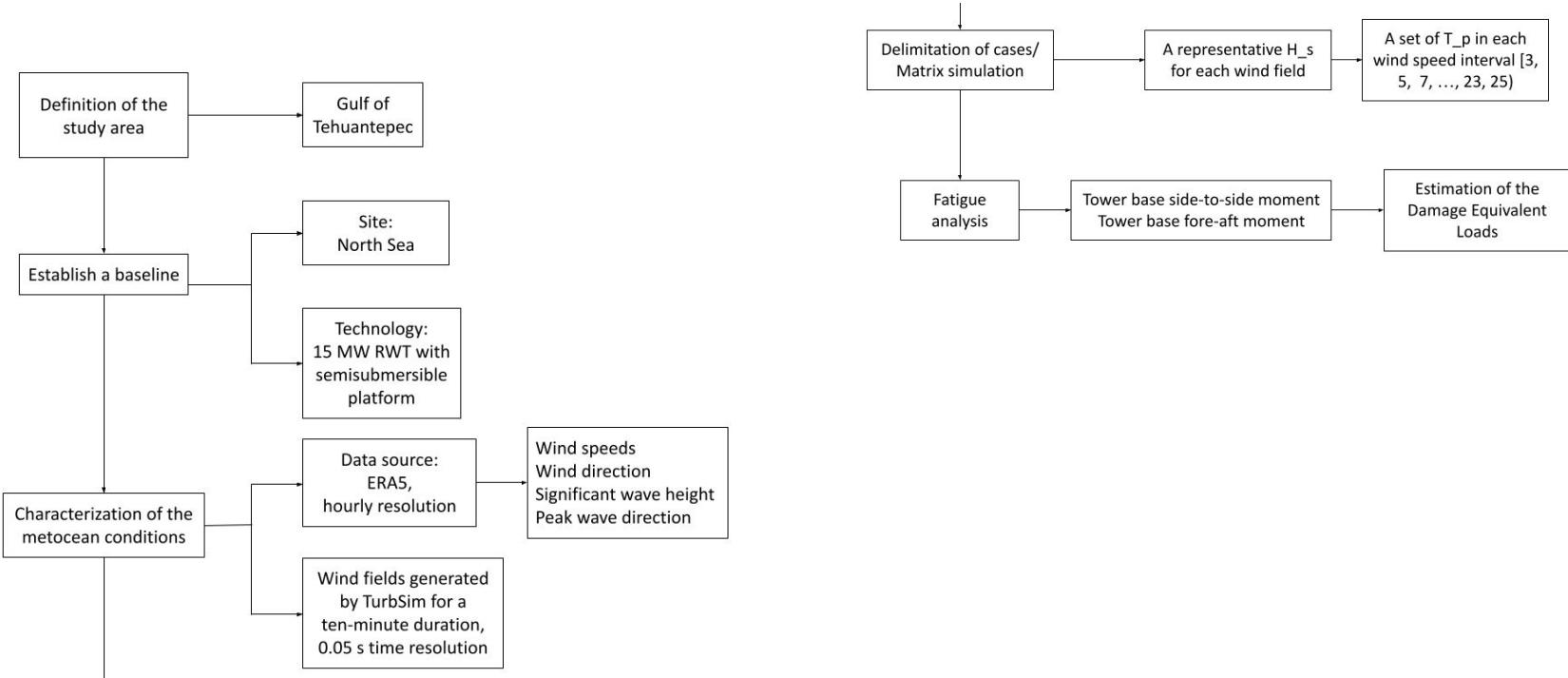
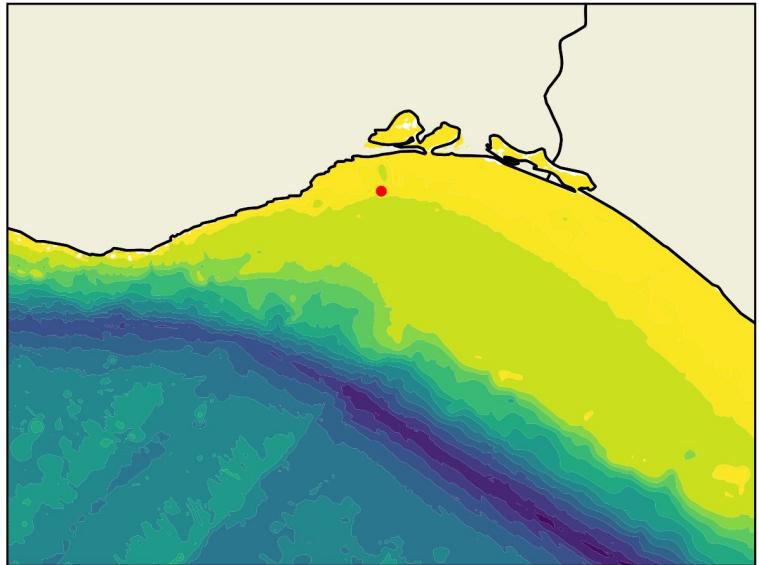


Figure 4.8: Example of the reconstruction method to the site M03.

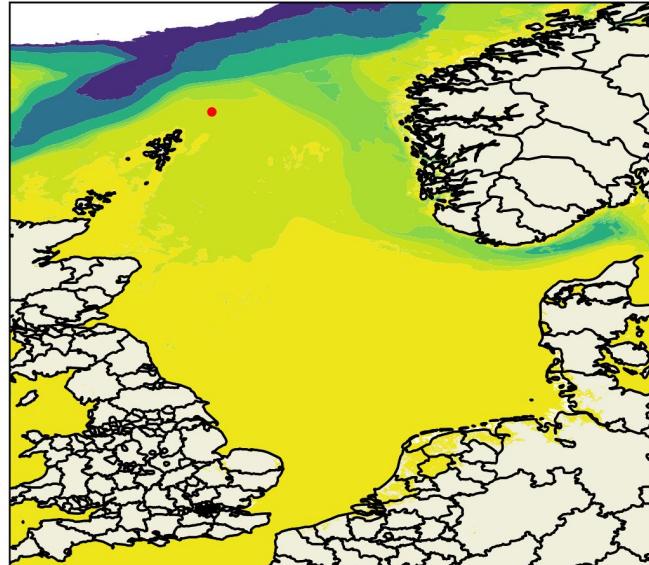
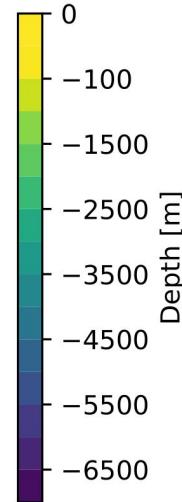
Metodología del desempeño de FOWT



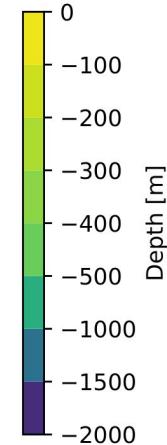
Batimetría



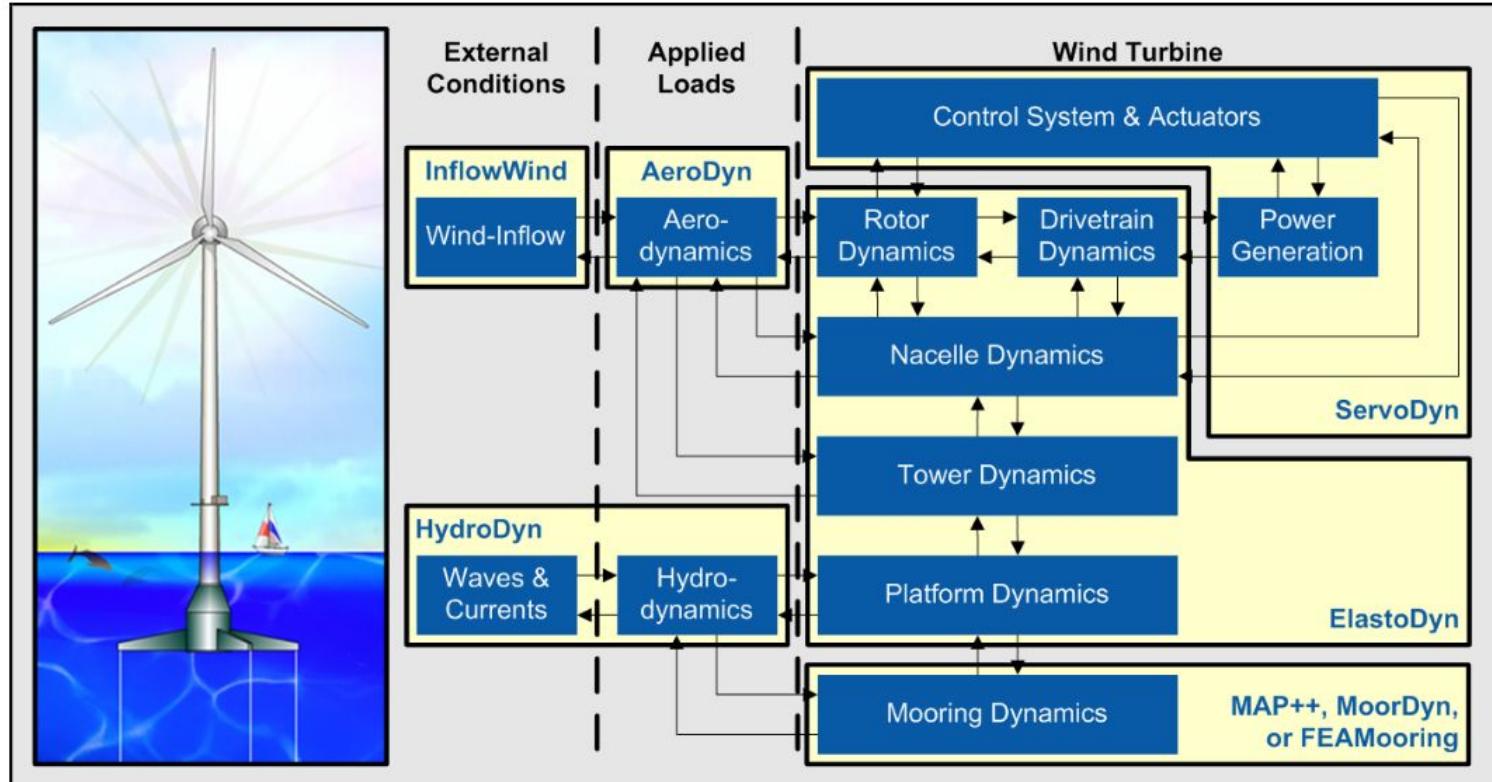
83 m



168 m



Módulos de OpenFAST



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

Damage Equivalent Load

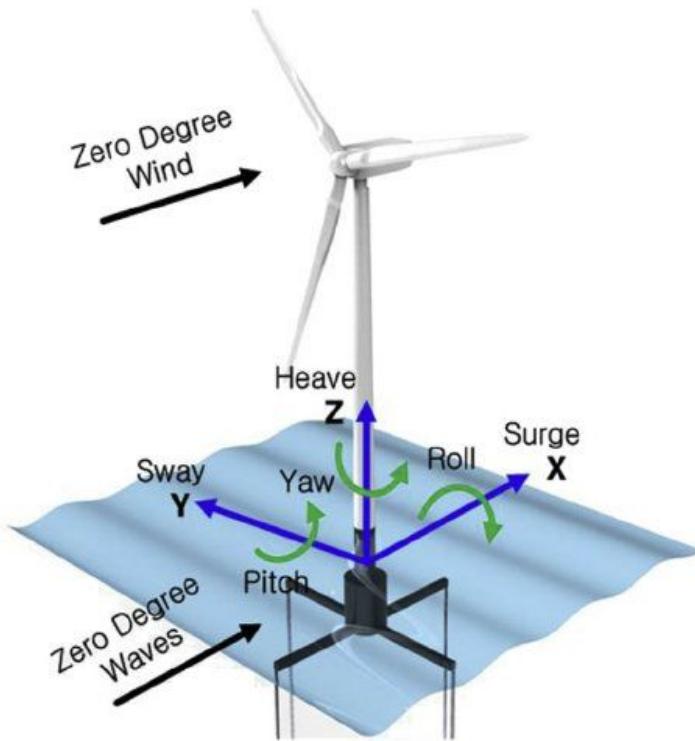
The $DEL_{M_{dir_p}}$ is the total damage equivalent load for all events in wind direction p during 25 years, a typical lifetime for a turbine, is defined as:

$$DEL_{M_{dir_p}} = \left(\sum_r P_r \left(\sum_i \frac{n_i M_i^k}{T_{sim}} \right) \right)^{1/k} \quad (2.6)$$

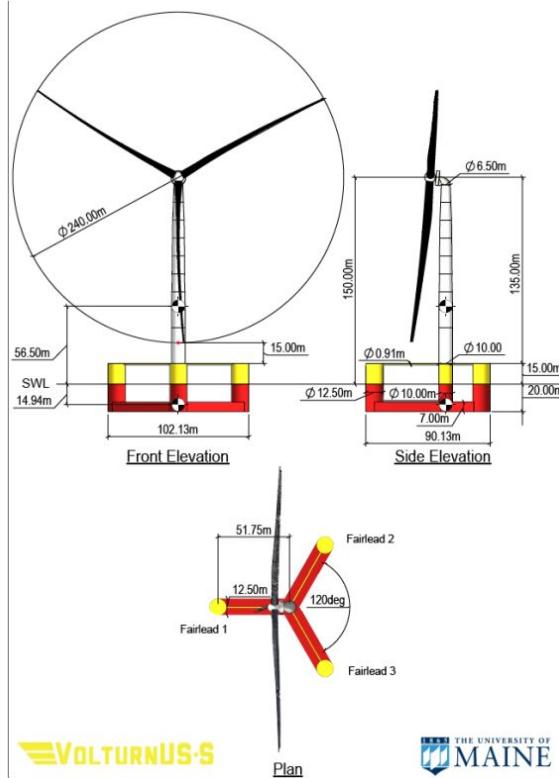
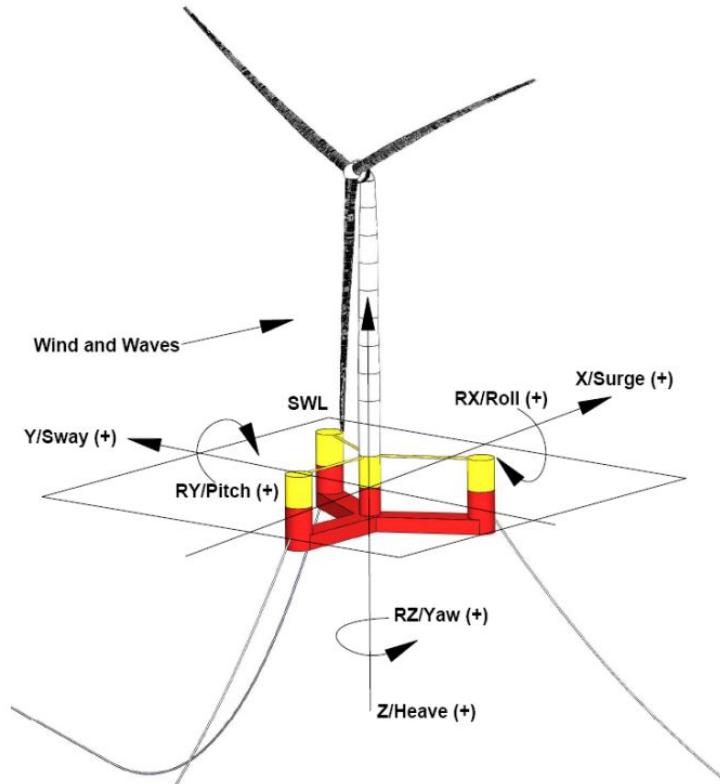
where:

- P_r is the probability of occurrence of a load case r , representing a specific combination of meteorological conditions.
- n_i is the number of load cycles for the i -th event, obtained from a load time series.
- M_i is the magnitude of the load (e.g., bending moment or stress) for the i -th event.
- k is the fatigue exponent, a material property that reflects the sensitivity of the material to fatigue damage.
- T_{sim} is the time duration of the simulation, used to normalize the load cycles over the simulation period.

La turbina de 15 MW

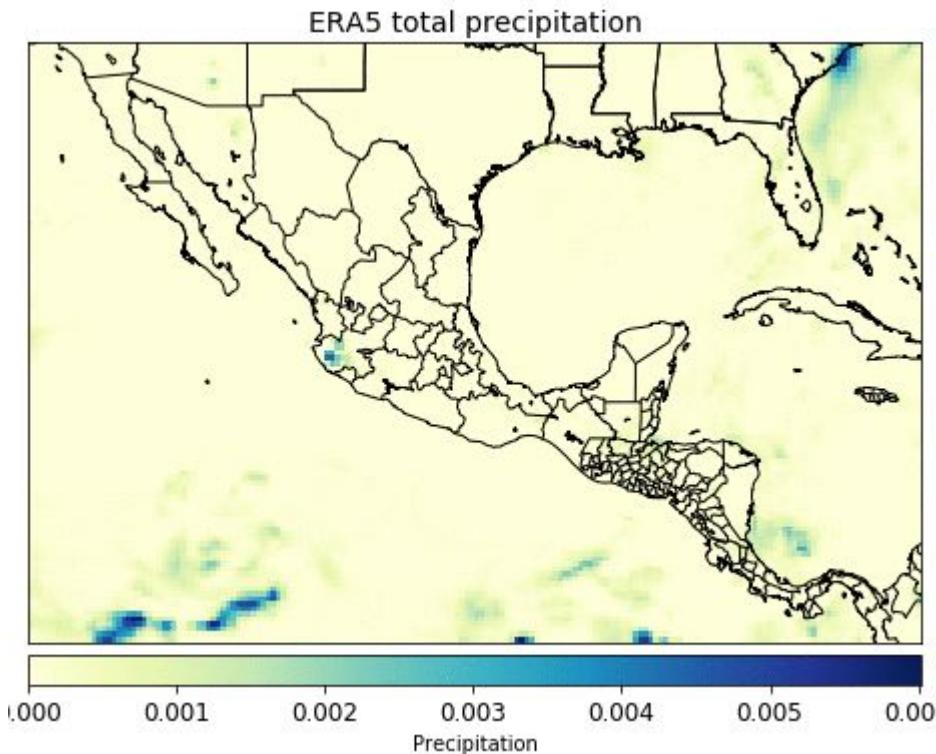


La turbina de 15 MW



High-resolution wind speed data and its influence
on wind energy aspects in Mexico
M. I. Diego Arturo Canul Reyes

ERA5



ERA5	
Desarrollado	ECMWF
Disponibilidad	1979-01-01
Cobertura espacial	Global
Resolución temporal	Horaria
Resolución espacial	30 km
Cobertura vertical	10, 100 m