



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Análisis del recurso eólico para la generación eléctrica en distintas regiones de México

T E S I S

que para obtener el título de:

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Castaño González Alyn

TUTOR DE TESIS:

Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández

Temixco, Mor., Diciembre de 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



OF/IER/LIER/152/2023
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Por medio de la presente le informo que el día viernes 15 de diciembre de 2023, a las 15:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, la **C. ALYN CASTAÑO GONZÁLEZ**, con número de cuenta 315628490 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación de su trabajo de titulación y examen profesional titulado:

***“Análisis del recurso eólico para la generación eléctrica
en distintas regiones de México”***

Debido a que la alumna ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE: DR. MARIANO LÓPEZ DE HARO
VOCAL: DRA. MÓNICA BORUNDA PACHECO
SECRETARIO: DR. OSVALDO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ
SUPLENTE: DR. CARLOS ALBERTO LÓPEZ VILLALOBOS
SUPLENTE: DRA. YURI SARA HERNÁNDEZ DEMESA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 1 de diciembre de 2023

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL'mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Agradecimientos

Principalmente quiero agradecer a mi universidad, la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme la oportunidad de desarrollarme como estudiante desde la preparatoria hasta la universidad, vivir experiencias inolvidables y hacer de mi recorrido por la licenciatura la mejor experiencia.

Agradezco al Dr. Osvaldo Rodríguez por introducirme a la energía eólica, por estar dispuesto a la resolución de dudas y por incitar a mantenerme positiva a lo largo de este trabajo realizado completamente de forma virtual.

Agradezco fielmente al Mtro. Gustavo Yepes y al Mtro. Diego Canul, quiénes me aconsejaron y apoyaron a lo largo de la realización de este trabajo; sin su ayuda, este no sería el mismo.

Agradezco a Kevin Alquicira por el continuo soporte técnico en el Jupyter Server. También, agradezco a Alberto Santos Zavaleta por su prontitud en asistirme con la plataforma Bidiunam. Mi reconocimiento especial al Dr. Guillermo Barrios por su disposición fuera de horario y por guiarme en la exploración del mundo de Python.

Al proyecto 272063 «Fortalecimiento del campo de energía eólica en el programa de Doctorado en Ingeniería Campo de conocimiento en Energía con sede en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México».

Al proyecto del Atlas Eólico Mexicano, coordinado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias y al «Plan de Acción para eliminar barreras para el desarrollo de la generación eolieléctrica en México» de las Naciones Unidas.

Quiero agradecer a mis sinodales el Dr. Carlos López Villalobos, Dra. Mónica Borunda, Dr. Mariano López de Haro y Dra. Yuri Hernández que se tomaron el tiempo para evaluar este trabajo.

Me gustaría agradecer a Leonardo Córdova ya que su esencia habilitó mi camino en múltiples semestres de esta carrera ofreciéndome apoyo incondicional, chistes malos y una amistad sincera.

Agradezco a mis mejores amigos con los que conformé el «Equipower»: Rafael, Nachito y Kenya. Gracias por haber estado conmigo en todo tipo de circunstancias, hacer mis días de pandemia más ligeros y apoyarme honestamente en el camino.

Dedicatoria

«No te trabes lengua mía,
no te vayas a turbar.
Nadie acierta antes de errar,
y aunque la fama se juega
el que por gusto navega
no debe temerle al mar».
—José Hernández

A mis padres

A mi familia

Índice

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	xi
1 Introducción	1
1.1 Justificación	3
1.2 Objetivo general	3
1.2.1 Objetivos Específicos	4
1.3 Estructura de la Tesis	4
2 Revisión bibliográfica y descripción matemática de los modelos físicos	5
2.1 Revisión bibliográfica	5
2.1.1 Aprovechamiento de la energía eólica a nivel internacional y en México	5
2.1.2 Aerogeneradores de Baja Potencia	6
2.2 Evaluación del Recurso Eólico	8
2.3 Descripción matemática de los modelos físicos	9
2.3.1 Distribución de frecuencias de rapidez de viento	10
2.3.2 Perfil de Velocidades	12
2.3.3 Turbulencia	13
2.3.4 Intensidad de Turbulencia de Viento	14
3 Datos y Metodología	17
3.1 Descripción de los datos	17
3.1.1 Atlas Eólico Mexicano	17
3.1.2 Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo	18
3.2 Metodología	20
3.2.1 Preparación de Datos	20
3.2.2 Disponibilidad de Datos	21
3.2.3 Selección de Regiones	22
3.2.4 Descripción de Regiones	24
3.2.5 Evaluación del recurso	41

ÍNDICE

3.2.6	Análisis de la intensidad de Turbulencia	41
3.2.7	Clasificación de velocidad de viento	42
4	Discusión y Resultados	45
4.1	Ajuste estadístico	45
4.2	Dirección de Viento	52
4.3	Cálculo de la intensidad de Turbulencia	56
4.3.1	Parámetros de Intensidad de Turbulencia	62
4.3.2	Global Wind Atlas vs PNUD	65
4.4	Análisis Estacional de la Intensidad de Turbulencia	66
4.5	Variación diaria de la Intensidad de Turbulencia	75
5	Conclusiones	81
5.1	Recomendaciones y trabajo a futuro	83
5.2	Apéndice	85
	Bibliografía	91

Índice de figuras

2.1	Distribución de Weibull para diferentes formas. Imagen (40)	11
3.1	Estaciones meteorológicas (14)	18
3.2	Estaciones meteorológicas AEM Y PNUD. Imagen propia con datos de (14)	19
3.3	Metodología para la evaluación del recurso eólico por regiones sintetizada en 4 puntos importantes: 1.- Obtención de mediciones en sitio, 2.- Selección de Regiones, 3.- Análisis del Recurso Eólico, 4.- Caracterización de la Intensidad de Turbulencia, 5.- Clasificación de la intensidad de Turbulencia y 6.- Conclusiones	20
3.4	Disponibilidad de datos. El gráfico de barras en color azul representa las series de tiempo PNUD y de color rojo se refiere a las series provenientes del AEM. Imagen propia con datos del Atlas (14)	22
3.5	Delimitación de las ocho regiones estudiadas: BC, CP, NC, NE, NO, SO, CVT y YC. Imagen propia.	24
3.6	Relieve de la República Mexicana. Mapa propio con datos de (2)	25
3.7	Ubicación de sitios en la Península de Baja California. Imagen propia. .	26
3.8	Relieve de la Región Baja California. De arriba hacia abajo se observa BCN1, BCS3, BCS1 y en el lado inferior izquierdo se muestra BCS2 . .	27
3.9	Ubicación de sitios en la Región Noroeste. Imagen propia.	28
3.10	Ubicación Región Noroeste. Imagen propia.	29
3.11	Relieve del sitio SI01	30
3.12	Ubicación Región Norcentro. Imagen propia.	31
3.13	Relieve Región Norcentro. Se muestran de arriba hacia abajo ZC01, ZC02 y JAL 1. Imagen propia.	32
3.14	Ubicación de sitios en la Región Noreste. Imagen propia.	33
3.15	Relieve de la Región Noreste. Se muestra de arriba hacia abajo TM03 y TM02. Imagen propia.	34
3.16	Ubicación de sitios en el Cinturón Volcánico Transversal (CVT)	35
3.17	Ubicación de sitios en Paso de Chivela (PC)	36
3.18	Relieve de La Ventosa, Oaxaca	37
3.19	Ubicación de sitios en la Península de Yucatán (YC)	38

ÍNDICE DE FIGURAS

3.20	Relieve Península de Yucatán (YC)	39
3.21	Ubicación Región Suroeste (SO)	40
3.22	Relieve Región Suroeste (SO)	40
3.23	Clasificación de colores con respecto a la velocidad de viento	42
3.24	Clasificación de colores en el Atlas Eólico Global (17)	42
4.1	Distribución de Weibull del sitio BCN1	46
4.2	Distribución de Weibull del sitio BCS3	46
4.3	Distribución de Weibull del sitio CH02	47
4.4	Distribución de Weibull del sitio CH04	47
4.5	Distribución de Weibull del sitio LV01	48
4.6	Distribución de Weibull del sitio OA01	48
4.7	Distribución de Weibull del sitio 0A03	49
4.8	Distribución de Weibull del sitio 0A04	49
4.9	Distribución de Weibull parámetro de escala (c)	51
4.10	Distribución de Weibull parámetro de forma (k)	51
4.11	Distribución de Weibull parámetro media (μ)	52
4.12	Histograma de viento del sitio BCS3	53
4.13	Rosa de vientos del sitio BCS3	53
4.14	Histogramas de dirección de viento para la región NE	54
4.15	Ajuste de curva de la Región BC	57
4.16	Ajuste de curva de la Región NO	57
4.17	Ajuste de curva de la Región NC	58
4.18	Ajuste de curva de la Región NE	58
4.19	Ajuste de curva de la Región CVT	60
4.20	Ajuste de curva de la Región PC	60
4.21	Sitio OA04- Región CP	61
4.22	Ajuste de curva de la Región SO	61
4.23	Ajuste de curva de la Región YC	61
4.24	Mapa caracterización IT (%)	64
4.25	Comparación de datos de velocidad media μ	65
4.26	Rapidez de viento- Región BC	66
4.27	Intensidad de Turbulencia- Región BC	66
4.27	Gráfica estacional- Región BC	68
4.28	Gráfica estacional- Región NO	68
4.29	Gráfica estacional - Región PC	69
4.30	Gráfica estacional IT - Región PC	69
4.30	Gráfica estacional- Región NC	70
4.31	Gráfica estacional- Región NE	70
4.31	Gráfica estacional- Región PC	72
4.32	Gráfica estacional- Región SO	72
4.32	Gráfica estacional- Región CVT	74
4.33	Gráfica estacional- Región YC	74
4.34	Variación diaria IT- Región BC	75

4.35	Variación diaria IT- Región NO	75
4.36	Variación diaria IT- Región NC	77
4.37	Variación diaria IT- Región NE	77
4.38	Variación diaria IT- Región PC	78
4.39	Variación diaria IT- Región SO	78
4.40	Variación diaria IT- Región CVT	79
4.41	Variación diaria IT- Región YC	79
5.1	Distribución de Weibull BCN1	85
5.2	Distribución de Weibull BCS1	85
5.3	Distribución de Weibull BCS2	85
5.4	Distribución de Weibull BCS3	85
5.5	Distribución de Weibull CH01	86
5.6	Distribución de Weibull CH02	86
5.7	Distribución de Weibull CH03	86
5.8	Distribución de Weibull CH04	86
5.9	Distribución de Weibull CI01	86
5.10	Distribución de Weibull LV01	86
5.11	Mapa de calor de rapidez del viento- Región NO	87
5.12	Mapa de calor IT- Región NO	87
5.13	Mapa de calor de rapidez del viento- Región NC	87
5.14	Mapa de calor IT- Región NC	87
5.15	Mapa de calor de rapidez del viento-Región NE	87
5.16	Mapa de calor IT- Región NE	87
5.17	Mapa de calor de rapidez del viento- Región SO	88
5.18	Mapa de calor IT- Región SO	88
5.19	Mapa de calor de rapidez del viento- Región CVT	88
5.20	Mapa de calor IT- Región CVT	88
5.21	Mapa de calor de rapidez del viento- Región YC	89
5.22	Mapa de calor IT- Región YC	89
5.23	Valores Intensidad de Turbulencia	90

Índice de tablas

3.1	Información general de las torres anemométricas. Región, Sitio , Altura (m) y Estado especificado por su respectivo acrónimo oficial	23
3.2	Términos descriptivos	43
3.3	Características Principales de las 8 regiones seleccionadas: BC, NO, NC, NE, SO, PC, CVT, YU	44
4.1	Ajuste estadístico	50
4.2	Valores IT obtenidos a partir de la metodología propuesta.	63

Introducción

En los últimos 10 años, las energías renovables han tomado un papel importante en el ámbito energético y la generación de energía eléctrica gracias a su extensión como una notable solución hacia la búsqueda de la fiabilidad, seguridad y resiliencia de una red eléctrica nacional, independencia energética y sustentabilidad.

Las energías renovables se han visualizado también como una respuesta ante la urgente necesidad mundial por combatir el cambio climático. Gracias al Acuerdo de París se intensificaron las acciones entre naciones con el fin de trabajar por un futuro sustentable con bajas emisiones de carbono. Los gobiernos de diferentes países han establecido como metas porcentajes de energía que se producirán a partir de fuentes renovables para las próximas décadas. Con esta perspectiva, Jacobson et. al. (39) modelaron un escenario prospectivo destinado a los Estados Unidos de América (EUA). En esta visión, cada nuevo generador de energía diseñado específicamente para la producción eléctrica deriva exclusivamente de fuentes energéticas provenientes del viento, el agua y la radiación solar (WWS por sus siglas en inglés). De manera gradual, se prevé la eliminación de todos los generadores convencionales, con la meta de lograr que para el año 2030, entre el 80% y el 85% de la infraestructura preexistente haya sido transformada. Este proceso de transición tiene como horizonte el año 2050, año en el cual se proyecta alcanzar la conversión total al nuevo modelo energético basado en WWS.

Ante la invasión rusa a Ucrania en el año 2022, se esperan cambios drásticos debido al aumento de precios a los combustibles fósiles; es por esto que la Agencia de Energía Internacional (IEA) ha otorgado opciones de emergencia para facilitar la transición energética en la Unión Europea (UE). Dentro de las soluciones de la IEA se encuentra la mejora de la eficiencia energética en los edificios, el aceleramiento del desarrollo de proyectos de energía eólica y solar, lo que podría reducir el consumo de gas en un aproximado 6 billones de metros cúbicos al año, así como maximizar la generación de energía a partir de la bioenergía y la energía nuclear, lo que podría reducir el consumo de gas en 13,000 millones de metros cúbicos al año (25). El último reporte IEA 2022 (26) menciona la estrategia «REPowerEU», en la cual se propone aumentar la participación

1. INTRODUCCIÓN

de energías renovables para 2030; para alcanzar dicho objetivo se requerirá casi de 600 GW para la solar fotovoltaica y 510 GW para la capacidad eólica. En Noviembre de 2022, la Comisión Europea propuso la designación de las energías renovables como una materia de interés público beneficiando y simplificando la concesión de permisos nuevos y su tiempo de respuesta.

De manera global, se espera que la energía eólica sea la que más aumente en términos de generación absoluta (24). La capacidad anual para la energía eólica terrestre a finales del 2018 fue de 45GW, se espera que la capacidad anual, para el 2050 sea de 200 GW, lo que equivale a un poco más de 4 veces la capacidad instalada del año 2018. (27).

Dada la complejidad del viento y sus consecuentes impactos en las cargas dinámicas en los aerogeneradores, se torna imperativo investigar los factores que potencialmente puedan incidir en la integridad de estas estructuras. Desde esta perspectiva, la velocidad media del viento adquiere una dimensión relevante, perfilándose como una perturbación intrínseca que está vinculada a una característica turbulenta fundamental que define la dinámica del flujo atmosférico. Una forma de caracterizar a la turbulencia es a partir de la intensidad de turbulencia, la cual emerge como un fenómeno resultado de una intersección de factores multifacéticos, estos factores abarcan desde la rugosidad de la superficie terrestre hasta la compleja dinámica de la estabilidad atmosférica como la inestabilidad convectiva o la cizalladura del viento.

Anteriormente, Rosen et al. (51) implementaron un método para calcular la potencia de salida media de una turbina eólica al considerar la intensidad de turbulencia y la corrección de dicha intensidad que, a su vez, toma en cuenta las características dinámicas propias de las turbinas. Esta investigación concluyó de manera contundente que la turbulencia del viento ejerce una influencia notable y directa en la potencia media de salida de las turbinas eólicas. Esta correlación revela una perspectiva fundamental: el uso de un parámetro tan específico como la intensidad de turbulencia del viento no solo permite evaluar la estabilidad atmosférica, sino que también se convierte en una herramienta clave para comprender cómo estas condiciones turbulentas impactan directamente en el rendimiento y la eficiencia de la energía eólica. Este enfoque integral nos lleva a una apreciación más completa de la importancia de la turbulencia atmosférica en el diseño y operación efectiva de instalaciones de energía eólica.

México al ser un país sumamente diverso geográficamente hablando, cuenta con una complejidad en la rugosidad que podría afectar las predicciones del viento. En 2019, Fei Li et al. (35) verificaron experimentalmente que la intensidad de turbulencia es un parámetro efectivo estadístico y físico para predecir la velocidad del viento. Análogamente en ese mismo año, Carlos Villalobos (37) caracterizó la intensidad de turbulencia del Istmo de Tehuantepec y comparó con un modelo normal de turbulencia descrito en la IEC 61400 en el que se encontró que ese modelo no representa a las condiciones meteorológicas imperantes de la región.

Por la importancia que tiene el parámetro de intensidad de turbulencia (IT) en el ámbito del recurso eólico es que se incluye en el presente proyecto de tesis de licenciatura, en

donde también se abarcará la caracterización y análisis de la IT para realizar un nuevo método para la caracterización del recurso eólico y rectificar o negar la existencia de un comportamiento regional dentro del territorio nacional mexicano.

1.1 Justificación

El presente trabajo muestra la caracterización regional del recurso eólico a baja escala que se encuentra en la República Mexicana obtenida a partir de bases de datos de acceso público. Este análisis facilitará la apertura de la inversión pública y privada en el territorio mexicano, beneficiando así los objetivos y metas de desarrollo sostenible preestablecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Este documento propone una nueva metodología aproximada y accesible para la obtención del parámetro IT y se presenta una solución práctica para la cuantificación efectiva del mismo parámetro a partir de un ajuste de curvas que se ha obtenido gracias a la caracterización del recurso eólico. La consideración de esta metodología tiene el potencial de simplificar la obtención de valores de intensidad de turbulencia, lo cual a su vez podría mejorar considerablemente la capacidad de prever dicha intensidad en el viento a medio y largo plazo, de manera aplicable y beneficiosa para investigadores y profesionales en el ámbito de la energía eólica en todo el mundo.

En este escrito se encuentra la propuesta de un análisis del recurso eólico en ocho regiones a lo largo del territorio mexicano, definidas principalmente por medio de la topografía representativa realizada a partir del conjunto de información evaluada, en la que se analiza la velocidad y dirección del viento, se realiza un ajuste estadístico y un análisis de la intensidad de turbulencia con el fin de comparar y comprender los diferentes comportamiento que puede tener la energía eólica de baja escala. Es importante mencionar que las tecnologías propuestas deben cumplir las características técnicas del sitio conforme a la norma IEC voltaje menor a 1000V a.c o 1500V d.c y un barrido de rotor inferior a 200m².

1.2 Objetivo general

Analizar y caracterizar las variables críticas del viento para la generación eléctrica en México a partir del Atlas Eólico Mexicano (AEM) y las bases de datos del Programa de las Naciones Unidas (PNUD).

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar una amplia revisión bibliográfica de las regiones definidas en términos de topografía, clima y principales fenómenos característicos.
- Realizar el ajuste estadístico de los datos
- Analizar la dirección de viento
- Analizar la intensidad de turbulencia por región
- Caracterizar la intensidad de turbulencia por sitio
- Comparar el recurso eólico en las regiones propuestas

1.3 Estructura de la Tesis

La presente tesis se compone de 5 capítulos. El primer capítulo expone los objetivos generales y específicos. El segundo de ellos presenta el estado del arte de la energía eólica, así como los parámetros utilizados para la evaluación del recurso eólico. El tercer capítulo hace referencia a la metodología, la descripción del sitio, así como a las bases de datos utilizadas para la caracterización de las variables de viento definidas, así como a la metodología a seguir. El Capítulo 4 muestra y discute los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 5, se exponen las conclusiones pertinentes del proyecto.

Revisión bibliográfica y descripción matemática de los modelos físicos

Una vez definidos los objetivos y la motivación en el capítulo anterior, se presenta una revisión bibliográfica que contiene conceptos teóricos de la energía eólica y la tecnología en baja potencia así como de la descripción matemática de los modelos utilizados.

2.1 Revisión bibliográfica

2.1.1 Aprovechamiento de la energía eólica a nivel internacional y en México

En 2019, la energía eólica aumentó un 19% su capacidad instalada a nivel mundial. Este es el segundo porcentaje más alto de la historia, en gran parte debido a los avances en las políticas energéticas de varios países de la Unión Europea, China y EUA. Incluso con los desafíos sanitarios, económicos y políticos a nivel mundial, para fines del año 2020 aumentó la capacidad total un 14%. Dicho aumento es debido al incremento de los cambios en la política en países como China y EUA, mientras que el resto del mundo, se mantuvo con la capacidad de 2019 (48). Para el año 2021, se instalaron 102 GW, de los cuáles, 83 GW representan la energía eólica onshore y 19 GW la offshore. Las adiciones totales aumentaron un 7% en comparación con 2020, y la capacidad eólica global total aumentó un 13.5% al final del año (49).

México tiene algunos de los territorios más atractivos para la energía eólica. La capacidad instalada de la energía eólica en el país es de 7692 MW (1) con una generación de

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS MODELOS FÍSICOS

19.701 GWh. Actualmente, México se está enfocando en la energía eólica terrestre que está dominando el mercado con grandes inversiones que han hecho viable los proyectos de gran escala.

En 2016 Hernández Escobedo (21) publicó un artículo en el cual analizó el potencial de la Península de Baja California, reafirmando el recurso eólico bien distribuido a lo largo de esta, en particular de Baja California Sur (BCS) y el centro de la misma península. En cuanto al análisis temporal, se encontró una distribución estacional del viento, concluyendo que enero, febrero y septiembre son los meses con menor viento.

Por otra parte, Borunda et al. (5) introdujo un sistema basado en la inteligencia bayesiana para evaluar la viabilidad de los aerogeneradores de energía eólica de pequeña escala en la generación de la cantidad necesaria de energía eléctrica, abordando la demanda excesiva de consumidores residenciales con alto consumo energético y evitando así las tarifas elevadas. Este sistema utiliza aerogeneradores de baja potencia de 5 y 10 kW en el sector residencial, con el objetivo no solo de comprender la incertidumbre inherente al recurso eólico, sino también de analizar la demanda de energía en el sector residencial. Adicionalmente, Canul (6) propuso un estudio sobre la implementación de la energía marítima en México, identificando cuatro puntos potenciales en el territorio mexicano para el aprovechamiento de este tipo de energía: Yucatán, Campeche, Ciudad del Carmen y Tamaulipas.

El sector eólico conlleva múltiples desafíos a corto y largo plazo como lo son la escasez de sitios óptimos en cuanto a recurso eólico y su proximidad de redes. Según IRENA (1), existen diversas partes del mundo en las que están presentes altas velocidades de viento que podrían aprovecharse; sin embargo, las mejores locaciones para la generación de energía eólica son en su mayoría lugares remotos. Análogamente, se estima que el planteamiento y proyecto de una planta eólica podría demorar hasta 5 años y solo unos pocos meses para su instalación. Este es un factor de desaceleración notorio para la transición energética.

2.1.2 Aerogeneradores de Baja Potencia

Aunque se ha asumido un compromiso firme para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y se ha promovido ampliamente el uso de energías renovables como solución al desafío ambiental, no podemos pasar por alto el hecho de que la energía eólica impacta más que la energía fotovoltaica. Se ha estimado que la huella climática de la energía eólica es hasta 10 veces mayor por unidad de energía generada en comparación con la energía solar (49). Es por eso que el análisis y estudio del recurso eólico es esencial antes de la realización de cualquier inversión. En consecuencia, un enfoque riguroso en la evaluación del recurso eólico se erige como un paso esencial para determinar la viabilidad técnica y económica de los proyectos eólicos en un panorama donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son factores determinantes en la toma de decisiones.

El sector eólico, no obstante, se enfrenta a varios desafíos, incluida la escasez de recursos eólicos favorables y la necesidad de estar cerca de las redes eléctricas. En este contexto, la descentralización de las turbinas podría ser considerada como una opción viable y sostenible. Esta aproximación posibilita la generación de electricidad autónoma en áreas sin acceso a la red eléctrica convencional, y ofrece un suministro de energía más amplio. Además, esta estrategia puede ser complementada con la energía solar, siendo aprovechada tanto por empresas como hogares (60). En un contexto donde la sostenibilidad y la eficiencia energética son factores fundamentales para tomar decisiones, los aerogeneradores de baja potencia emergen como una solución versátil y estratégica para impulsar un futuro más sostenible.

De acuerdo con el estándar IEC 61400-2, los aerogeneradores de baja potencia (ABP) son caracterizados por una superficie de barrido de rotor inferior a $200m^2$ que genera un voltaje menor a 1000v CA (corriente alterna) o 1500v CD (corriente directa) (10) (64). En los últimos 30 años los aerogeneradores de eje horizontal han pasado de tener un rotor de 35 m a tener uno de 220 m y han aumentado su altura de 35 m a 135 m y han pasado de una capacidad nominal de 500 kW a 18 MW (42), esta última del fabricante industrial «CSSCHaizhuang».

Las turbinas eólicas de pequeña escala con una potencia nominal de 50 W producen electricidad más costosa que las turbinas eólicas de gran y mediana escala, especialmente en aplicaciones autónomas que requieren un alto nivel de fiabilidad (7). Sin embargo, si se dimensiona correctamente, se podría considerar una fuente de energía fiable no solo en países de desarrollo sino como aplicaciones autónomas en zonas rurales.

Dentro de la clasificación ABP se encuentra la clasificación basada en el eje del rotor ya sea horizontal o vertical. Generalmente se clasifica a las turbinas de viento por la orientación de su eje de rotación: turbinas de viento de eje horizontal (horizontal axis turbine HAWT) y turbinas de eje vertical (vertical axis wind turbine, VAWT). Y otro modo alternativo para clasificarlas sería por el momento de torsión al eje de rotación: sustentación o de arrastre.

Por una parte, se encuentra el eje vertical (VAWT) con dos tipos de turbinas: Darrieus, que consiste en un número de aspas curvadas de forma vertical. Estas turbinas funcionan a partir de la fuerza de sustentación producida durante la rotación. Y la segunda opción, Savonius la cuál es una turbina de arrastre que consta de 2 a 3 aspas que cuentan con una sección transversal en forma de «S» al observarlas desde arriba (57). Por otra parte, se encuentra el HAWT dependientes en gran parte por la dirección del viento, operando a grandes alturas en comparación con las VAWT con una eficiencia de 50% y 60%.

Es cierto que los aerogeneradores de baja potencia pueden llegar a tener ciertas complicaciones. Por ejemplo, los aerogeneradores de baja potencia que operan a bajas velocidades regularmente se enfrentan al problema de bajos desempeños debido a la separación laminar y separación laminar de burbujas en las aspas (54). Las burbujas representan un fenómeno asociado a bajos números de Reynolds ($> Re=2300$), donde

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS MODELOS FÍSICOS

el flujo laminar se separa antes de que se pueda transferir el flujo total turbulento como resultado del gradiente de presión adverso (GPA). La separación del flujo laminar generalmente ocurre dentro de la capa límite, que es la región cercana a la superficie de un objeto donde el flujo del fluido se ve afectado por la fricción con la superficie. La burbuja de separación degrada el rendimiento aerodinámico global de un perfil aerodinámico, lo que resulta en la reducción del coeficiente de arranque y de potencia de una turbina (34). Por lo que el uso de perfiles especialmente diseñados para funcionar a bajos números de Re permite obtener velocidades de arranque menores, incrementando el torque de arranque y por lo tanto, mejorando el desempeño integral de la turbina (54).

Dentro del diseño podría asociarse un grado de rugosidad a los perfiles aerodinámicos para promover la transición temprana de flujo laminar a turbulento, como lo propuso Lissaman (36), al disminuir el grosor de la capa límite. Ahora bien, es importante cuidar la respuesta inicial a bajas velocidades de viento para generar la potencia máxima y, debido a que existe la fricción vinculada al tren de engranajes, rodamientos y generador, las turbinas ABP tienen múltiples palas en el rotor para compensar el torque tan bajo de arranque (9).

Dentro de las principales diferencias entre las turbinas se encuentra que las de tipo vertical pueden aprovechar la energía eólica desde casi cualquier dirección de viento.

2.2 Evaluación del Recurso Eólico

Uno de los conceptos más importantes al hablar del recurso eólico es el viento como fuente de energía y el análisis de su comportamiento. La producción de energía eólica es función cúbica de la velocidad del viento.

La densidad de potencia de viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento: al duplicarse la velocidad de viento aumenta la densidad de potencia de viento por un factor de 8 como se muestra en la ecuación 2.1 (38); esto implica que pequeños cambios en las estimaciones de la velocidad del viento pueden dar lugar a grandes cambios en las estimaciones de la energía eólica. Existen, empero, variaciones de la velocidad del viento en el día y la noche durante todo el año. Por esta razón, la densidad promedio de potencia de viento se encuentra en términos del promedio anual de viento U_i .

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2}\rho\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (2.1)$$

En dónde N representa la serie de velocidad de viento observada, ρ representa la densidad, U_i es el promedio de la velocidad del viento sobre un intervalo de tiempo Δt y $\frac{\bar{P}}{A}$ es el promedio de la densidad de potencia de viento por unidad de área.

Los patrones de calentamiento diferencial de la superficie terrestre, las fuerzas de inercia, las variaciones de la absorción de la radiación en la superficie y la evaporación son unos de los patrones escalares y temporales que dan lugar a la existencia de diversos vientos (18).

Debido a los factores mencionados, la irregularidad es una característica importante en esta fuente de energía. Sus variaciones pueden ser caracterizadas desde dos puntos de vista: variaciones temporales y variaciones espaciales, y depende de la disponibilidad del recurso eólico de un lugar determinado.

Por ejemplo, cuando exista rozamiento de la corriente de aire con la superficie terrestre, el perfil vertical del viento no será constante, y aumentará con la altura. Cuando el aire fluye sobre un terreno uniforme, las características del perfil de viento vienen condicionadas por la rugosidad de este terreno, y si la rugosidad cambia bruscamente, por ejemplo, de un cultivo a un bosque, la capa límite interna que se genera respondería a la rugosidad pero sobre el mismo perfil de viento condicionado por la rugosidad del terreno anterior por lo que la velocidad cambiaría. En esta variable se ve representada la turbulencia que se analizará próximamente en la sección 2.3.3 .

La variación temporal se refiere a los ciclos energéticos que se pueden observar a lo largo del tiempo, estos están asociados a las escalas del movimiento atmosférico. Esta variación podría ser a corto plazo, debido al intercambio atmosférico o largo plazo, que serían las variaciones anuales (31).

Para analizar estos factores y variaciones, la medición y el monitoreo de la velocidad y la dirección del viento representan las variables fundamentales para definir la disponibilidad del recurso eólico. Para su obtención, es posible realizar mediciones mediante sensores en el sitio con torres meteorológicas instrumentales con anemómetros, veletas y sensores de temperatura que realizarán mediciones de la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, presión barométrica, humedad relativa, entre otros parámetros. Otras técnicas incorporan el anemómetro láser, ultrasónico y el anemómetro SODAR de efecto Doppler (28).

2.3 Descripción matemática de los modelos físicos

A fin de estimar el potencial de energía eólica de un emplazamiento, se deben adquirir, validar, limpiar y, posteriormente, analizar e interpretar adecuadamente los datos obtenidos de la estación meteorológica del sitio.

La variabilidad del viento aparenta ser al azar, pero tiene sus características específicas como lo son el perfil vertical de velocidad, las características atmosféricas, la intensidad de turbulencia, función de densidad de probabilidad del viento, autocorrelación, rugosidades del sitio, estratificaciones inestables, variaciones espaciales y temporales en la transferencia radiativa entre el Sol y la superficie terrestre, entre otras características.

2.3.1 Distribución de frecuencias de rapidez de viento

El análisis estadístico se utiliza para determinar el potencial del recurso eólico de algún sitio determinado y para estimar la producción de energía eólica. Este término describe una variable aleatoria como lo es el viento (38). Las funciones de densidad de probabilidad (PDF) se utilizan normalmente para describir la distribución de la velocidad del viento para la selección adecuada de turbinas eólicas en un lugar determinado.

Existen diversas funciones que pueden ser utilizadas para describir la distribución de frecuencia del viento como lo son Weibull, Rayleigh y la distribución normal logarítmica. La función de probabilidad de densidad es un medio también para caracterizar la turbulencia $p(U)$, lo cuál representa uno de los principales propósitos de este proyecto.

En la caracterización del recurso eólico la función más utilizada es la función Weibull que tiene dos parámetros definidos como factor de escala (c), ecuación 2.6 y el factor de forma (k), ecuación 2.5. Ambos parámetros están definidos por la función de la velocidad media 2.4 y de la desviación estándar σ_u 2.7.

La PDF Weibull se define como:

$$PDF = p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{(k-1)} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (2.2)$$

Es importante saber que la integral de la función de la densidad de probabilidad es 1.

$$\int_0^{\infty} p(U) dU = 1 \quad (2.3)$$

La velocidad media del viento está definida como:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (2.4)$$

Además, k y c están definidas de la siguiente forma (38):

$$k = \left(\frac{\sigma_u}{\bar{U}}\right)^{-1.086} \quad (2.5) \quad c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (2.6)$$

La desviación estándar permite comprender la variación o dispersión en la que los puntos de datos individuales difieren de la velocidad media.

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (2.7)$$

Ahora bien, la distribución de Weibull es válida para $k > 1$ y $c > 0$. El factor de forma típicamente tendrá un rango que va de 1 a 3 (56). Un factor de forma bajo indica una distribución relativamente amplia de velocidades del viento alrededor de la media, mientras que un factor de forma alto indica una distribución estrecha alrededor de la media.

De acuerdo con Sathyajith (40), la uniformidad del viento en una distribución Weibull está determinada por el factor k . Este efecto se puede observar en la figura 2.1 para un factor de escala (c) de $9.8 \frac{m}{s}$.

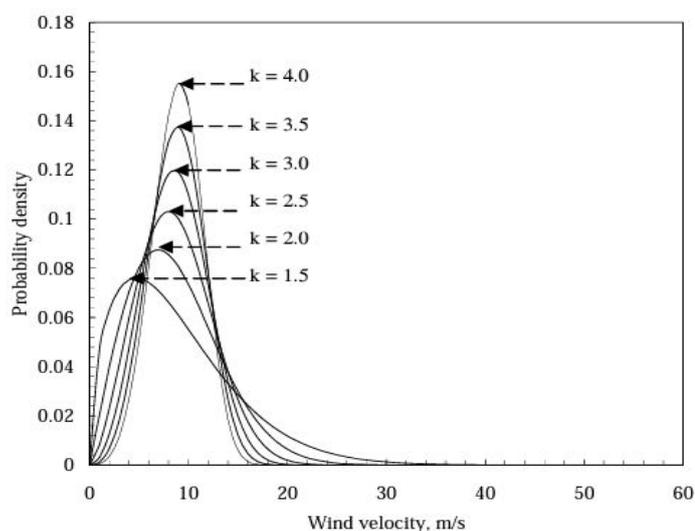


Figura 2.1: Distribución de Weibull para diferentes formas. Imagen (40)

Suponiendo una serie de observaciones (N) de la velocidad del viento (U_i), cada una promediada a lo largo del intervalo de tiempo Δt (38).

La distribución Weibull (DW) de 2 parámetros es aceptada como el mejor modelo debido a su flexibilidad para adaptarse a un conjunto de datos, que pueden representar un período de tiempo, por lo general 1 mes o 1 año (8). La distribución Rayleigh, por otro lado, se considera una simplificación de la función de distribución Weibull en la que el parámetro de forma k se aproxima a 2.0 (40). Para calcular los parámetros k y c de la distribución Weibull, se requiere un análisis de datos recopilados durante un intervalo de tiempo específico. Sin embargo, según (40), esta información podría no estar fácilmente disponible, lo que lleva a la consideración del modelo simplificado de Weibull como una opción viable.

Un enfoque relevante para este trabajo se deriva del trabajo de Jaramillo et al. (29), quienes desarrollaron un modelo basado en una distribución de Weibull bimodal. Este enfoque se utiliza como herramienta analítica para estimar la distribución de frecuencia de la velocidad del viento en la región de La Ventosa, un sitio específico de estudio en

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS MODELOS FÍSICOS

esta investigación.

Además, Suwarno, M Fitra (55) propusieron un método modificado de Weibull que considera tres parámetros (escala α y forma λ y β) que se encuentran por medio el método de mínimos cuadrados (LSM), con los cuales es posible estimar mucho mejores coeficientes que la distribución Weibull estándar, para valores inferiores a $2\frac{m}{s}$.

2.3.2 Perfil de Velocidades

Las velocidades de viento varían respecto a la altura de la superficie terrestre, este perfil de velocidades o cizalladura del viento cambia con un número de variables incluyendo:

- Estabilidad Atmosférica
- Rugosidad de la Superficie
- Cambios en las Condiciones de la Superficie
- Forma del Terreno

Estas características adquieren una relevancia significativa en el ámbito económico, ya que podrían influir en gran medida en la elección del emplazamiento. La categorización del terreno se divide en dos principales tipos: terrenos planos y no planos. El primer tipo presenta pequeñas irregularidades, como bosques, mientras que el segundo tipo exhibe variaciones más pronunciadas en forma de elevaciones y depresiones, tales como valles, cañones, montañas o cordilleras (Manwell, 2010)(38).

Para ser clasificado como un terreno plano se tiene que cumplir con lo siguiente:

- Las diferencias de elevación entre el sitio de la turbina y el terreno circundante no son superiores a 60 m en cualquier lugar en un círculo de 11.5km de diámetro alrededor del sitio de la turbina.
- Ninguna colina tiene una relación de aspecto (altura y ancho) superior a 1/50 dentro de 4 km aguas arriba y aguas abajo.
- La diferencia de elevación entre el extremo inferior del disco del rotor y la elevación más baja en el terreno, es mayor que tres veces la diferencia de elevación máxima (h) (del terreno a la altura del rotor) dentro de 4 km aguas arriba (38).

Una depresión pequeña está caracterizada por tener terrenos más bajos a sus alrededores como lo son cañones o valles menores a 50 m, mientras que las lagunas serían una depresión a larga escala. Los cambios de la velocidad de viento incrementan considerablemente si las depresiones pueden canalizar el viento efectivamente, pero también dependen de las variaciones diurnas, anchura, longitud, pendiente y rugosidad de la depresión.

2.3.3 Turbulencia

En la dinámica de fluidos, el flujo laminar se caracteriza por trayectorias regulares de partículas del fluido. El movimiento intensamente desordenado de un fluido, que es común se presente a velocidades altas y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad, se llama flujo turbulento (63). Un flujo turbulento es un eficiente mezclador de masa, momento cinético y energía. También es un disipador importante de energía. En 1883, Reynolds descubrió que la caracterización dependía de la razón entre fuerzas inerciales y viscosas. Este tipo de flujo se compone de fluctuaciones altas de vorticidad que consisten en estructuras irregulares identificables en distintas escalas espaciales y temporales (52).

La turbulencia es uno de los temas más complejos en la mecánica de fluidos. Es un efecto implícito en la circulación del viento. Puede caracterizarse como la variabilidad a lo largo del tiempo respecto a una velocidad media.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, fundamentales en la mecánica de fluidos, desempeñan un papel esencial en la comprensión y predicción del comportamiento de los fluidos en movimiento. Junto con la ecuación de continuidad, estas ecuaciones forman un sistema que modela la dinámica de fluidos con gran detalle. Este sistema representa un conjunto de tres leyes de equilibrio clave: conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía. La primera de ellas, conocida también como ecuación de continuidad, aborda la conservación de la masa. La segunda, que corresponde a la Primera Ley de Newton, trata la conservación del momento. Finalmente, la tercera ecuación representa el primer principio de la termodinámica y abarca la conservación de la energía que proporciona información vital sobre cómo la energía térmica y cinética se transfieren y transforman dentro del fluido.

Al ser resueltas, entregan el campo de velocidad y de presión para todo el flujo en estudio; en concordancia, estas ecuaciones describen el comportamiento de los fluidos en cualquier tipo de situación. En un principio, tendríamos que resolver dichas ecuaciones para entender y analizar el comportamiento del flujo de fluido externo o interno, y para esto, existen dos posibilidades diferentes: investigación experimental o enfoque numérico. Esto serviría para comprender todos los fenómenos de turbulencia, pues es en los flujos turbulentos que el campo de velocidad y presión dependen del tiempo, y para esto se requiere una malla sumamente fina para poder observar los remolinos y respuesta del flujo en el caso de uso de computadora para la modelación y resolución de este tipo de flujos.

De esa forma, para que un aerogenerador funcione a su máxima eficiencia, se requiere un flujo laminar constante de viento entrante; por lo que, la turbulencia, independientemente de su fuente, podría tener un efecto importante. Sheinman y Rosen (62) encontraron que la potencia eólica podría ser sobrestimada por alrededor del 10 % sin considerar los efectos de turbulencia. Es por eso que se procura utilizar zonas con poca superficie de obstáculos o grandes masas de agua. Añadido a las condiciones

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS MODELOS FÍSICOS

externas a considerar, las turbinas mismas generan turbulencia, generando pequeños vórtices cerca de los bordes de las palas. El efecto más conocido es aquel relacionado con la formación de estelas turbulentas en la punta de las aspas del rotor de los aerogeneradores, Estas estelas turbulentas se generan debido a las diferencias de presión y velocidad del aire entre el intradós y el extradós de las aspas. Dicha fenomenología tiene un impacto significativo en el flujo del viento. Por lo tanto, lo ideal sería poder separar entre sí las turbinas lo máximo posible en la dirección de viento dominante; sin embargo, dado que también se busca la optimización del terreno, se persigue mantener una distancia de entre 5 y 9 diámetros de rotor en la dirección de los vientos dominantes, y de 3 a 5 diámetros de rotor en la dirección perpendicular a estos (13). El equilibrio entre la distancia ideal entre las turbinas y la optimización del espacio disponible resulta esencial para lograr un diseño eficiente y rentable del parque eólico.

Existen varios mecanismos que pueden causar un comportamiento turbulento o inestable, como lo son el calentamiento de la superficie de la tierra o los efectos de la cizalladura. «Esto implica que la turbulencia sea el resultado de que la atmósfera intenta deshacer la causa de la inestabilidad; por lo tanto, se genera turbulencia a diferentes escalas» (37). Aunque es cierto que la turbulencia atmosférica no incide de manera directa en la capa límite del perfil de un aerogenerador, su influencia es significativa de manera indirecta al modificar los ángulos de ataque. Estos cambios a su vez perturban los patrones de flujo y las distribuciones de presión en la superficie de las aspas del aerogenerador, lo que conlleva repercusiones notables en su rendimiento y eficiencia en la generación de energía eólica.

La turbulencia de viento tiene 3 componentes: longitudinal, lateral y vertical. El componente longitudinal está designado como $u(z, t)$ 2.8 donde $u(t)$ representa la velocidad total del viento en la dirección longitudinal en un momento específico (t), que se descompone en una velocidad promedio constante \bar{U} que es perpendicular a U y una componente fluctuante $\dot{u}(z, t)$ que varía tanto en altura como en tiempo.

$$u = U + \tilde{u} \quad (2.8)$$

en dónde U es la velocidad del viento, \tilde{u} la componente fluctuante de la velocidad del viento en la dirección longitudinal, que varía tanto con la altura (z) como con el tiempo (t).

2.3.4 Intensidad de Turbulencia de Viento

El modelo más simple para la turbulencia es el modelo de intensidad de turbulencia (IT). En la energía eólica, la turbulencia es un proceso de transporte que es intrínseco a la capa límite que afecta la energía producida por un aerogenerador (37). Esto se debe a que la intensidad de turbulencia en el flujo que se aproxima a un aerogenerador

influye en su carga acumulada por fatiga y también tiene un papel activo en las fuerzas y los momentos de flexión que actúan sobre una estructura.

La intensidad de turbulencia es la relación entre la desviación típica de la velocidad del viento y la velocidad media de este, determinada a partir del mismo conjunto de muestras de datos medidos de la velocidad del viento y tomadas durante un período de tiempo especificado (23) (10). La IT es una variación de la velocidad del viento horizontal que representa la intensidad del viento fluctuante y se expresa como:

$$I_a = \frac{\sigma_a}{U(z)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_1)^2}}{U(z)} \quad (2.9)$$

$a = u, v, w$ donde u, v y w son componentes longitudinal, lateral y vertical respectivamente.

Cada vez es más común utilizar mediciones de la intensidad de la turbulencia para clasificar el rendimiento de la turbina ya que se ha reportado que es una fuente de daños a las cargas de fatiga y su incertidumbre se propaga al igual a la curva de potencia (32); por lo que se puede comparar con un modelo normal de turbulencia (NTM) descrita en la IEC 61400 estándar.

Si bien la ecuación 2.9 hace un trabajo razonable en el modelado de la intensidad de la turbulencia, no funge como un predictor exacto del momento en el que una ráfaga de viento importante podría ocurrir (11).

La incertidumbre de la intensidad de turbulencia, los cambios repentinos en la dirección de viento y las problemáticas que se pueden ocasionar por fallas por cargas dinámicas de un aerogenerador, ratifican la importancia que impulsa el estudio de la variable en el ámbito de la energía eólica. Sabiendo que el 90 % de los componentes estructurales fallan por este tipo de cargas (13) y considerando que el enfoque del presente estudio es representativo de alturas de 20 m y 15 m, es necesaria la evaluación del parámetro IT en terreno con una rugosidad tan irregular como lo es la del territorio mexicano. La caracterización de la intensidad de turbulencia y la consideración de este parámetro contribuirán al desarrollo del sector de la energía eólica en México.

Hasta ese punto se ha presentado la revisión bibliográfica y descripción matemática de los modelos físicos estudiados, en la sección 3.1 se realizará una descripción de las 29 estaciones a evaluar a lo largo de este trabajo que permitirán comprender también las superficies en donde se encuentran las torres anemométricas.

Datos y Metodología

En el presente capítulo se muestra una descripción de las bases de datos que se utilizan para el análisis de datos a realizar. Asimismo, se presenta la metodología a seguir a fin de lograr el objetivo de dicho trabajo.

3.1 Descripción de los datos

3.1.1 Atlas Eólico Mexicano

El Atlas Eólico Mexicano (AEM) funge como proyecto para planear estrategias en el cumplimiento de las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante un mapa eólico. El AEM es un proyecto coordinado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Tecnológica de Dinamarca (DTU).

Para ello fueron instaladas 7 torres anemométricas en zonas estratégicas (de alto potencial eólico y cercanas a redes de transmisión) de la República Mexicana en los estados de Baja California, Yucatán, Chihuahua, Oaxaca, Jalisco, Tamaulipas y Puebla; que se encargan de recopilar diversos datos como la velocidad y dirección de viento promediados, la temperatura, la radiación solar, la densidad del aire, la presión barométrica y la humedad relativa en intervalos de 10 minutos a 20, 40, 60 y 80 m, los valores promediados de velocidad y la desviación estándar; estos últimos fueron los principales valores que se utilizaron en el presente proyecto. Todos los datos del AEM generados son almacenados en bases de datos de acceso libre que se pueden obtener de sus respectivas páginas web citadas en la bibliografía de este documento.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

En dicha base de datos se tiene información recabada en intervalos de 10 minutos a diferentes alturas referenciadas a la hora de invierno del centro del país (Ciudad de México UTC-06:00).

El presente trabajo abordará los datos de las 7 estaciones meteorológicas correspondientes a la altura de 20 m, representando esta altura un aerogenerador de baja potencia.

3.1.2 Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) trabaja en 170 países: ayuda a reducir la pobreza, las desigualdades y la exclusión; dentro de los proyectos que llevan a cabo se encuentra el «Plan de Acción para eliminar barreras para el desarrollo de la generación eolieléctrica en México», que tiene como fin evaluar el recurso eólico en las áreas más prometedoras del país mediante la instalación de 14 estaciones anemométricas de referencia que generen información de alta calidad de acuerdo con las mejores prácticas en el ámbito (4)(programa desarrollado en conjunto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas, por convenio con la Secretaría de Energía).

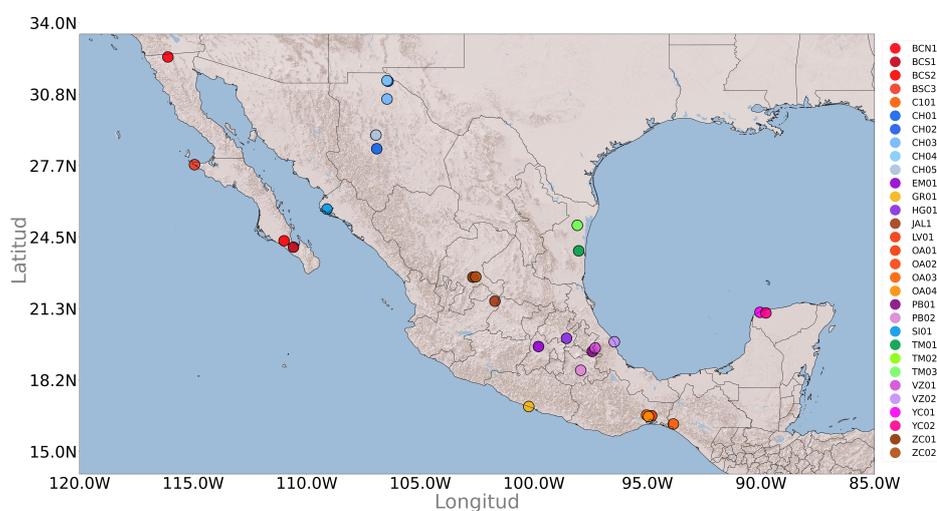


Figura 3.1: Estaciones meteorológicas (14)

Por una parte, en color rojo se identifican las 7 estaciones del Atlas la primera en Rumorosa, Baja California Norte (**BCN1**); la segunda en Mérida, Yucatán (**YC02**); posteriormente la tercera en Ciudad Cuauhtémoc (**CH05**); la cuarta en La Ventosa, Oaxaca (**OA01**); la quinta en Ojuelos, Jalisco (**JAL1**); la sexta en San Fernando, Tamaulipas (**TM03**) y por último, la séptima que se encuentra en Tepexi, Puebla (**PB02**).

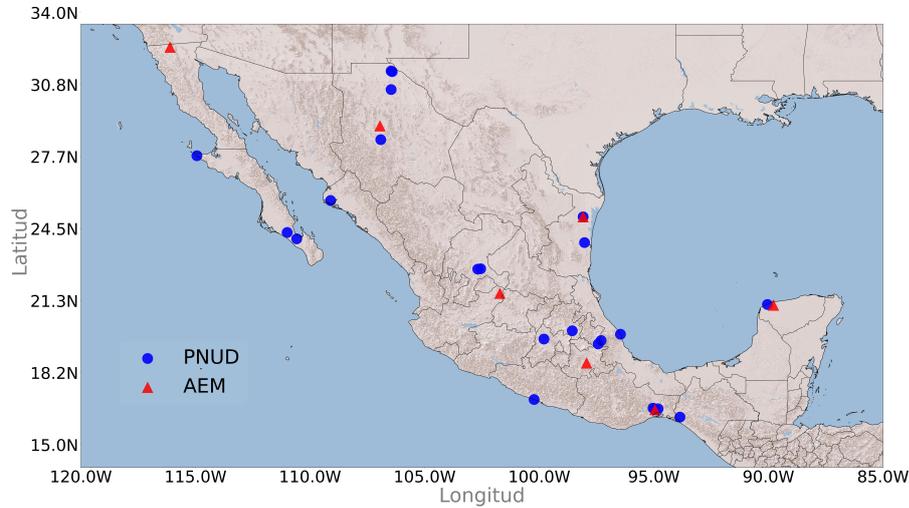


Figura 3.2: Estaciones meteorológicas AEM Y PNUD. Imagen propia con datos de (14)

En cuanto a las estaciones del PNUD localizadas en color azul se encuentran 24 estaciones. En la península de Baja California Sur se encuentran 3 estaciones que son: El Paso (BCS1), San Hilario (BCS2) y Bahía de Tortuga (BCS3). En el estado de Chihuahua se encuentran 4 que son: Ciudad Cuauhtémoc (CH01), Samalayuca (CH02), Villa Ahumada (CH03) y Samalayuca II (CH04). En el estado de Zacatecas se encuentran dos: Cieneguillas (ZC01) y Cerro La Virgen (ZC02). En el estado de Tamaulipas se encuentran dos estaciones en: Los Naranjos (TM01) y en Francisco Villa (TM02). En Sinaloa se encuentra una en Los Mochis (SI01) y de igual manera se encuentra solo una estación en Sisal, Yucatán (YC01) así como en el Estado de México en Patejé (EM01). Por otra parte, en Oaxaca se encuentra 4 estaciones, localizadas en La Venta (LV01), La Ventosa (OA01, OA02) y Cd. Ixtepec (OA03). En el estado de Veracruz hay dos estaciones: Perote (VZ01) y Punta Delgada (VZ02). Y finalmente, se encuentra una estación en El Progreso, Chiapas (CI01); otra en Barra de Coyuca, Guerrero (GR01) y la última en Alchichica, Puebla (PB01).

Como se mencionó anteriormente, las zonas a evaluar están ubicadas en todo México, al menos un sitio por región. La Tabla 3.1 presenta la región donde se ubican los sitios, los sitios, nombre completo de los sitios de estudio, junto con su sigla, la altura a la que se reporta la velocidad del viento y el Estado al que pertenece.

3.2 Metodología

La metodología se sustenta en la estrategia para seguir en el proceso de investigación con el fin de conseguir los resultados deseados.

Esta sección explica la metodología seguida para comparar y analizar datos de velocidad de viento en las torres de medición por región. Se puede observar en la figura 3.3.



Figura 3.3: Metodología para la evaluación del recurso eólico por regiones sintetizada en 4 puntos importantes: 1.- Obtención de mediciones en sitio, 2.- Selección de Regiones, 3.- Análisis del Recurso Eólico, 4.- Caracterización de la Intensidad de Turbulencia, 5.- Clasificación de la intensidad de Turbulencia y 6.- Conclusiones

3.2.1 Preparación de Datos

A fin de realizar el análisis de datos del recurso eólico, se obtuvo información del Atlas Eólico Mexicano mediante la página oficial del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEL) en (14) y se adquirieron los datos del PNUD. Ambas bases se tomaron como un conjunto de datos en su totalidad

Se propuso tomar únicamente la menor altura (20 m) de los datos y con ella, se realizó una limpieza de datos que consistió en el retiro de datos NAN, datos inconsistentes y donde se delimitó las velocidades de viento eliminando las velocidades de $0\frac{m}{s}$ para los cálculos con el fin de facilitar el cálculo y la visualización de los datos.

3.2.2 Disponibilidad de Datos

La disponibilidad de datos presente corresponde a series de tiempo que comprenden un periodo de años de 2004 hasta el 2008 para el PNUD; mientras que para el AEM corresponden datos más actuales, abarcando un periodo que va desde el 2018 a agosto del 2020.

En la figura 3.4 se exponen gráficamente las series de tiempo disponibles a lo largo de un período de 16 años, comenzando desde el año 2004. Del lado izquierdo es posible visualizar los datos del PNUD representados en color azul, y de color rojo se observan los datos proveniente del AEM. Se observan dos diferentes periodos temporales. Es importante mencionar la ausencia de datos referentes a la dirección de viento debido a diversos factores como fallas y mantenimiento de las torres anemométricas. Por ejemplo, en el AEM, al preparar los datos, fue posible observar mayor ausencia de datos para las estaciones JAL1 y CH05, la Ventosa y Cuauhtémoc respectivamente. A pesar de eso, más de la mitad de los sitios tienen series temporales con una gran cantidad de datos como lo son los sitios restantes de AEM que cumplen con dos años y siete meses; mientras que, los datos PNUD cumplen con 1 año o más a excepción de la estación EM01 y HG01 que cuentan con 8 y 9 meses respectivamente.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

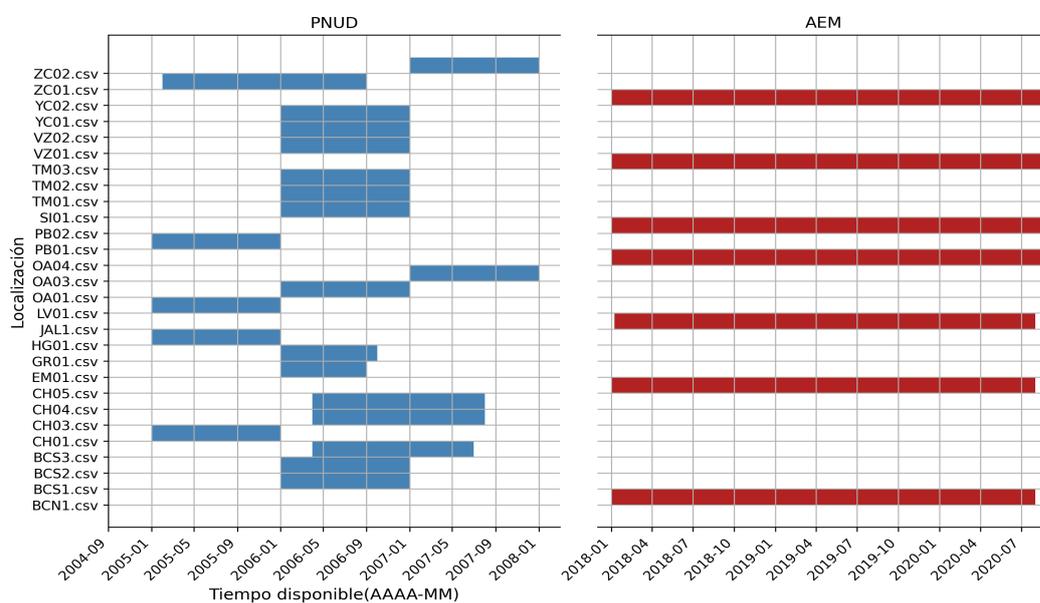


Figura 3.4: Disponibilidad de datos. El gráfico de barras en color azul representa las series de tiempo PNUD y de color rojo se refiere a las series provenientes del AEM. Imagen propia con datos del Atlas (14)

3.2.3 Selección de Regiones

El propósito principal de este estudio es representar el recurso eólico regional en áreas específicas. Para llevar a cabo el análisis inicial, se emplearon las regiones definidas que figuran en la tabla 3.1. Estas regiones fueron determinadas mediante correlaciones horarias y semanales establecidas por Carlos Ruvalcaba y publicadas en 2020 (44). Los sitios específicos se describen en la sección Descripción de Regiones.

Región	Sitio	Locación	Altura(m)	Estado
BC	BCN1	La Rumorosa	20	BC
	BCS1	El Paso	15	BS
	BCS2	San Hilario	15	BS
	BCS3	Bahía de Tortuga	20	BS
NO	CH01	Cd. Cuauhtémoc	20	CH
	CH02	Samalayuca	16	CH
	CH03	Villa Ahumada	15	CH
	CH04	Samalayuca II	15	CH
	CH05	Cd. Cuauhtémoc	20	CH
	SI01	Los Mochis	20	SI
NC	ZC01	Cieneguillas	20	ZS
	ZC02	Cerro La Virgen	20	ZS
	JAL1	Ojuelos	20	JC
NE	TM01	Los Naranjos	20	TM
	TM02	Francisco Villa	20	TM
	TM03	San Fernando	20	TM
SO	GR01	Barra de Coyuca	10	GR
PC	CI01	El Progreso	20	CS
	LV01	La Venta	15	OA
	OA01	La Ventosa	20	OA
	OA03	Cd Ixtepec	20	OA
	OA04	La Ventosa	20	OA
CVT	PB01	Alchichica	20	PU
	PB02	Tepexi	20	PU
	VZ02	Punta Delgada	20	VE
	EM01	Pastejé	10	EM
	HG01	Cerro Pelón	20	HG
YC	YC01	Sisal	20	YU
	YC02	Mérida	20	YU

Tabla 3.1: Información general de las torres anemométricas. Región, Sitio , Altura (m) y Estado especificado por su respectivo acrónimo oficial

3. DATOS Y METODOLOGÍA

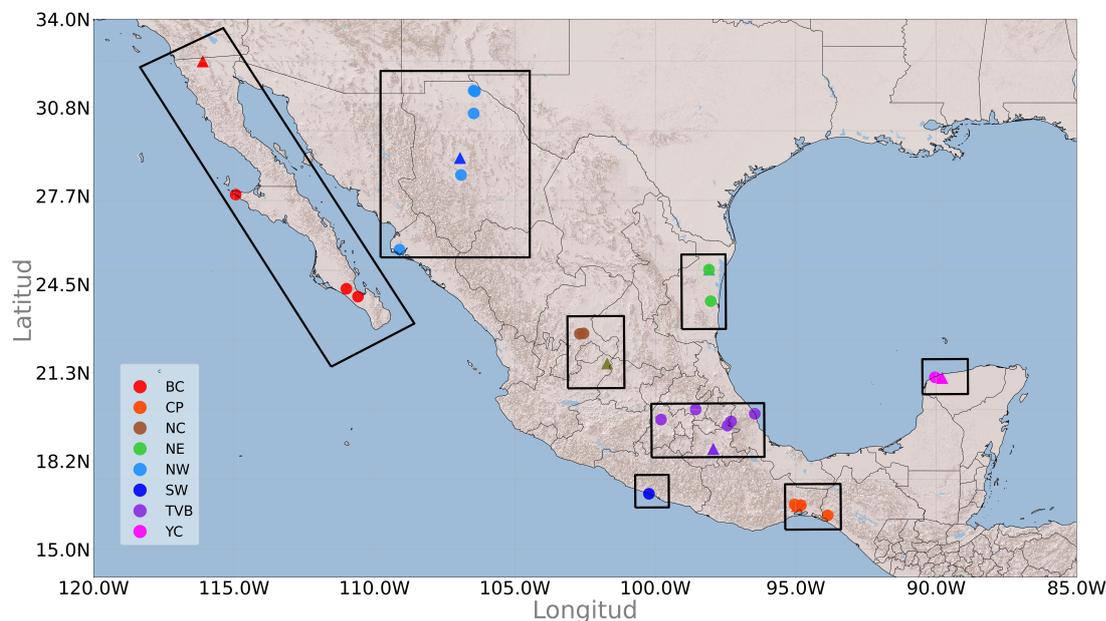


Figura 3.5: Delimitación de las ocho regiones estudiadas: BC, CP, NC, NE, NO, SO, CVT y YC. Imagen propia.

Dicho esto, se definieron 8 regiones principales que se observan en la figura 3.5 y se detallan en la tabla 3.1: Baja California (BC), representativo de 4 estaciones tanto de Baja California Sur como de Norte (BSC1, BSC2, BSC3, BCN1) en la figura 3.7, la Región Noroeste (NO) en donde se encuentran 5 estaciones localizadas en Chihuahua y Sinaloa definidas como (CH01, CH02, CH03, SI01), la Región Norcentral (NC) en donde se identifican 3 estaciones localizadas en Zacatecas y Jalisco (ZC01, ZC02, JAL1) en la figura 3.12, la Región Noreste (NE) 3.14 se muestra con tres estaciones respectivamente en el estado de Tamaulipas (TM01, TM02, TM03), el Cinturón Volcánico Transversal (CVT) con 5 estaciones encontrándose 2 de estas en Veracruz, una en el Estado de México y 2 en Puebla (VZ01, VZ02, EM01, PB01, PB02) mostradas en la figura 3.16, el Paso de Chivela (PC) con 6 estaciones, 4 de estas en Oaxaca y 2 en Chiapas (OA01, OA02, OA03, OA04, CI02 y LV01) mostradas en la figura 3.17, el Suroeste en donde se encuentra únicamente una estación en el estado de Guerrero (GR01) que se muestra en la figura, y en la Península de Yucatán (YC) se localizan 2 estaciones identificadas en la figura 3.19 (YC01, YC02).

3.2.4 Descripción de Regiones

México es el tercer país en América Latina con mayor superficie (15) y el 14vo. a nivel mundial con $1,964,375\text{km}^2$ (16), este está compuesto un 80% de zonas montañosas a

excepción de las costas y de la península de Yucatán, como se puede observar en el mapa 3.6.

El rasgo más notable del relieve que hoy configura la República Mexicana es el de una meseta de vastas dimensiones llamada «Altiplanicie del Territorio Mexicana». México se conforma en sus límites laterales por la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental; al oeste, en la península, se encuentra el eje de la Sierra de California; el Eje Volcánico Transversal recorre de este a oeste el territorio, conectando con la Sierra Madre del Sur.



Figura 3.6: Relieve de la República Mexicana. Mapa propio con datos de (2)

Región Península de Baja California (BC)

BCS1, BCS2, BCS3 se encuentran en la Península de Baja California (BC); específicamente, BCS1 está en el rancho San Hilario, La Paz; BCS2, en el rancho Hilario, La Paz, y BCS3, en Bahía de Tortuga, Mulegé.

Baja California es una península rodeada por 2 cuerpos de agua diferentes: el Mar de Cortés y el Océano Pacífico. Tiene una longitud de 1,300 km y oscila entre 45 y 250 km de ancho (50).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

El viento de BC tiene un gran potencial para participar en la transmisión, distribución y suministro de energía eléctrica para pequeñas zonas urbanas. En particular, la energía eólica en Baja California Norte puede generar energía eléctrica para alrededor del 12% de las comunidades urbanas pequeñas; mientras que en Baja California Sur la generación de energía eléctrica podría electrificar casi el 25 % de las pequeñas comunidades urbanas (21).

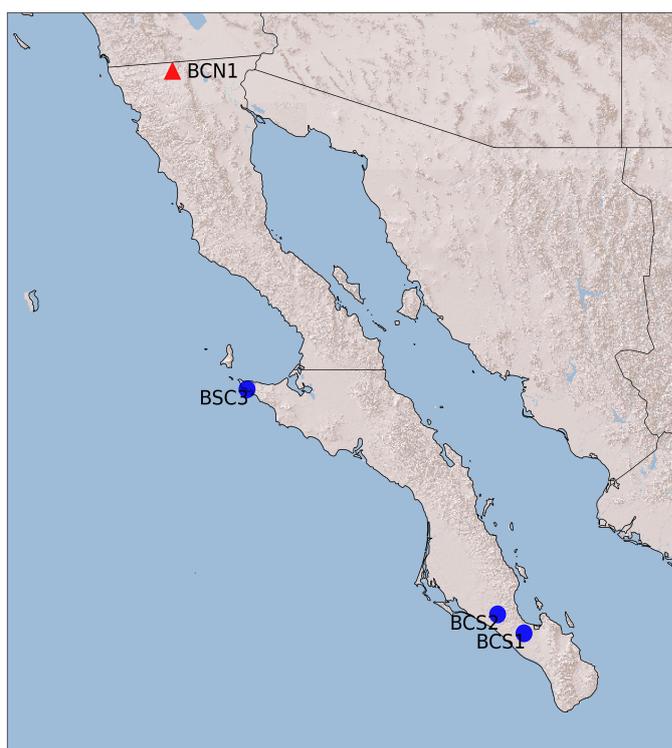


Figura 3.7: Ubicación de sitios en la Península de Baja California. Imagen propia.

BCN1 específicamente se encuentra dentro de una «Zona Potencialmente Productora de Energía Eléctrica Eólica en Baja California», ya que La Rumorosa fue seleccionada como una de las localidades potenciales para aprovechamiento de energía eólica por su cercanía con Mexicali y a la red de transmisión de CFE, que pasa por ese sitio (66) .

De manera general, la distribución de viento de la península se asocia con dos contrastes térmicos (entre las superficies de temperaturas superficiales de las masas de agua circundantes y temperaturas de aire a lo largo de los márgenes la isla).

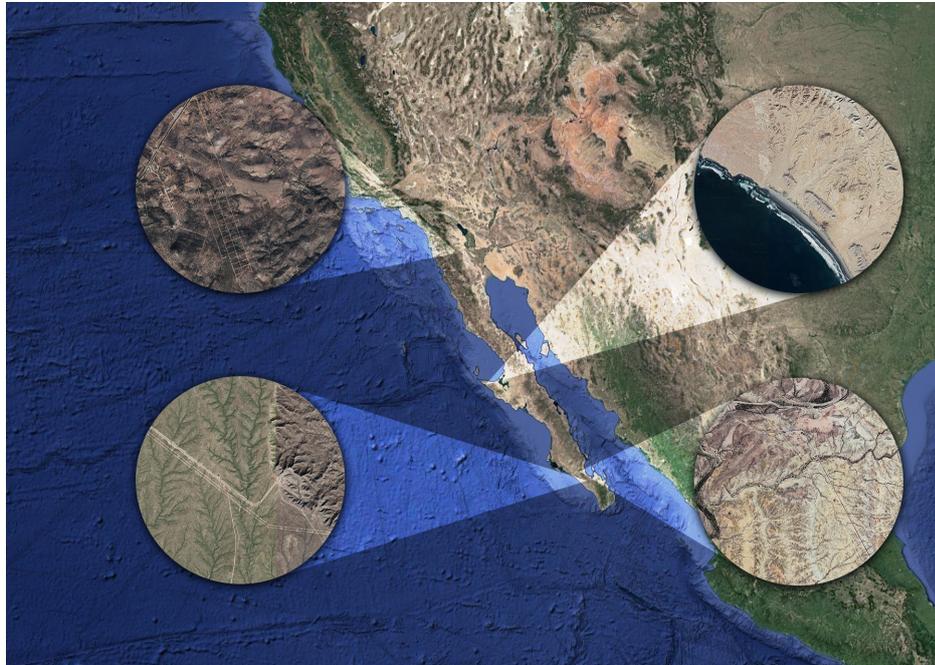


Figura 3.8: Relieve de la Región Baja California. De arriba hacia abajo se observa BCN1, BCS3, BCS1 y en el lado inferior izquierdo se muestra BCS2

Otro factor importante es la topografía que reorienta las masas de aire de la superficie hacia el este y aumenta la intensidad del viento ($> 6 \frac{m}{s}$) debido al efecto canalizador de las montañas (43). El territorio es tan amplio y diverso que en 1940, Ordoñez (45) clasificó 4 provincias fisiográficas en la península: Región de Ensenada, Delta del Colorado, Península y Región del Cabo. Debido a la complejidad de la misma, se ha encontrado que definir a Baja California por medio de datos de reanálisis es sumamente complicado (44), por lo que las torres anemométricas son de gran utilidad para una descripción real de los datos de medición.

Morales-Acuña et al. (43) identifican las mayores intensidades de ($> 7 \frac{m}{s}$) para sitios que se encuentren en una latitud de 27° y $30^\circ N$ mientras que las velocidades bajas ($< 2 \frac{m}{s}$) se encuentran en $23^\circ N$, $26^\circ N$ y $31^\circ N$ que se asocian a su vez con elevaciones orográficas ($> 800m$). También mencionaron que la compleja topografía de la península reorientan las masas de aire de superficie hacia el este y aumentan la intensidad del viento ($> 6 \frac{m}{s}$) debido al efecto canalizador de las laderas de la montaña y confirmaron que la distribución del viento superficial sobre Baja California se asocia con el contraste térmico de al menos $7^\circ C$ entre las masas de agua circundantes y los márgenes continentales, y con la diferencia de presiones atmosféricas superficiales a lo largo del margen de la península.

La estación BCS3 se encuentra específicamente en el Desierto del Vizcaíno, en el municipio de Mulegé en donde se tiene la mayor precipitación en diciembre (2.11 mm en

3. DATOS Y METODOLOGÍA

el primer mes) y la menor en septiembre (1.64 mm en el primer mes). Es en este sitio donde la humedad mínima (15.59%) coincidió con la temperatura máxima (24.7°) en verano, aunque el pico de velocidad del viento $4.42 \frac{m}{s}$ se produjo en primavera.

Región Noroeste (NO)

CH01, CH02, CH04 y CH05 se encuentran localizadas en el estado de Chihuahua. CH01 se encuentra en las inmediaciones de la ciudad Cuauhtémoc y es propiedad de la compañía Ingeniería en Radiodifusión y Comunicaciones. CH02 está ubicado en la Sierra el Presidio, Samalayuca, municipio de Ciudad Juárez, propiedad de Grupo Cementos Chihuahua. CH03 se encuentra ubicado en Villa Ahumada, propiedad del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). CH04 está en Ciudad Juárez, Chihuahua; es propiedad del gobierno del estado de Chihuahua. Finalmente, CH05 es parte del Atlas Eólico Mexicano ubicado en la Cd. Cuauhtémoc.

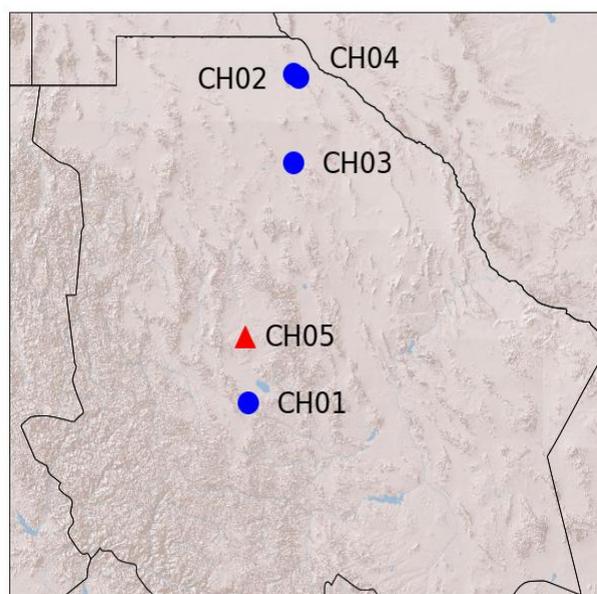


Figura 3.9: Ubicación de sitios en la Región Noroeste. Imagen propia.

Chihuahua es el estado más extenso de la República Mexicana y representa el 12.6% del país (65). Comparte territorio con dos de las quince provincias fisiográficas que dividen al país, siendo estas las Sierras y Llanuras del Norte y la Sierra Madre Occidental (SMO). La primera provincia abarca el 56.6% de la superficie estatal, extendiéndose desde el suroeste de EUA. Se compone de elevaciones de 3,000m sobre el nivel del mar, mientras que las llanuras tienen de 800 a 1000 m de elevación sobre el nivel del mar. En contraste, la SMO abarca el 43.44% del estado y presenta altitudes que van de 2,000 a 2,500 msnm. Además, en la SMO es posible encontrar climas semisecos templados (65).

Los climas templados abarcan el 12.87% de la superficie. También es posible observar climas templados semifríos con verano fresco largo subhúmedo y en ocasiones lluvias de verano y climas cálidos en la zona colindante con el estado de Sonora y Sinaloa. El clima dominante es semicálido y templado.

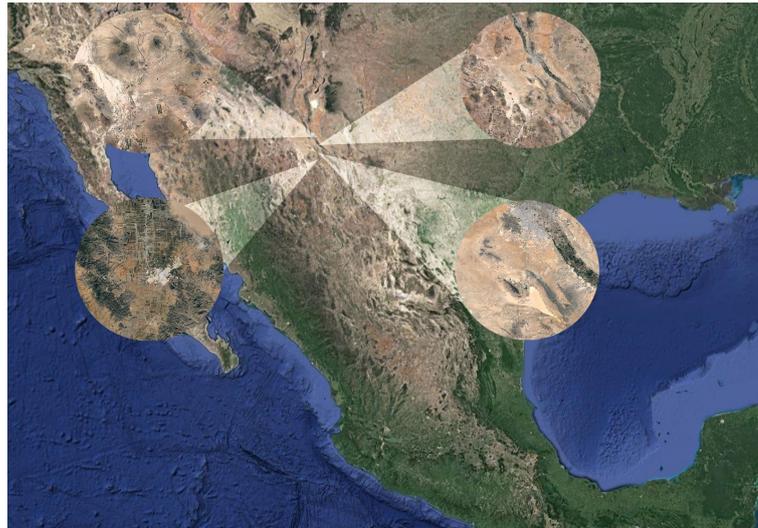


Figura 3.10: Ubicación Región Noroeste. Imagen propia.

Región SW

En la imagen 3.11 se muestra el sitio SI01 ubicado en el estado de Sinaloa. Este estado se encuentra principalmente dividido en dos partes. Por una parte, se encuentra la Sierra Madre Occidental ubicada al Este del estado y por otra parte, la llanura Costera del Pacífico ubicada el Oeste.

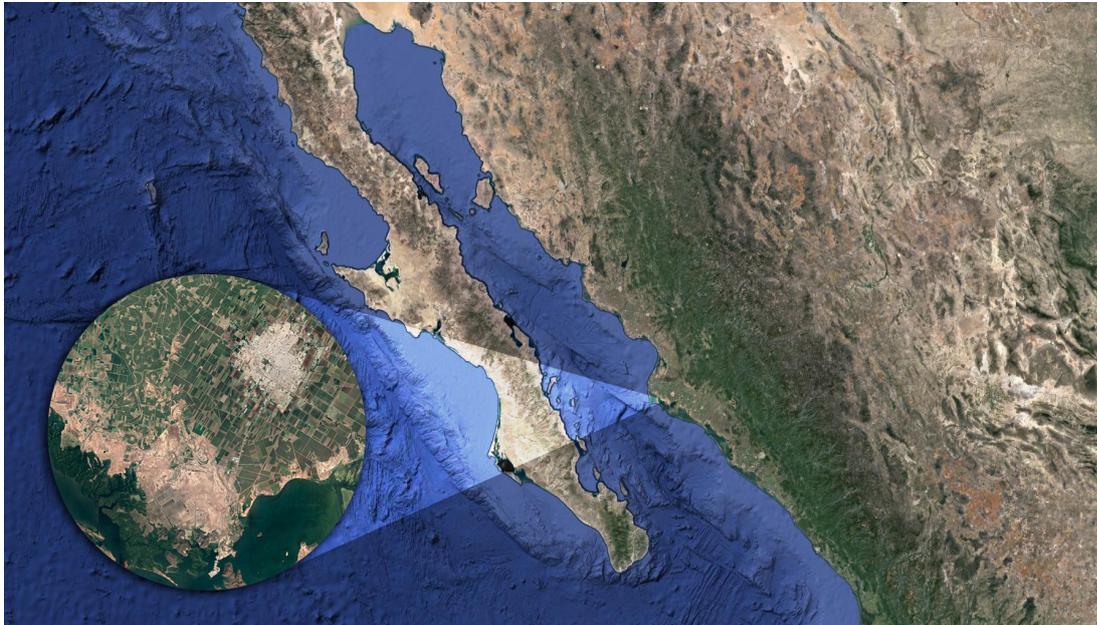


Figura 3.11: Relieve del sitio SI01

Región Norcentro (NC)

La región Norcentro cuenta con tres sitios: ZC01, ZC02 y JAL1 como se muestra en la figura 3.12. Zacatecas está formado por tres provincias fisiográficas distintas que son: Provincia Sierra Madre Oriental, Provincia Mesa Central y Provincia Sierra Madre Occidental, al sur del estado en los límites con Jalisco.

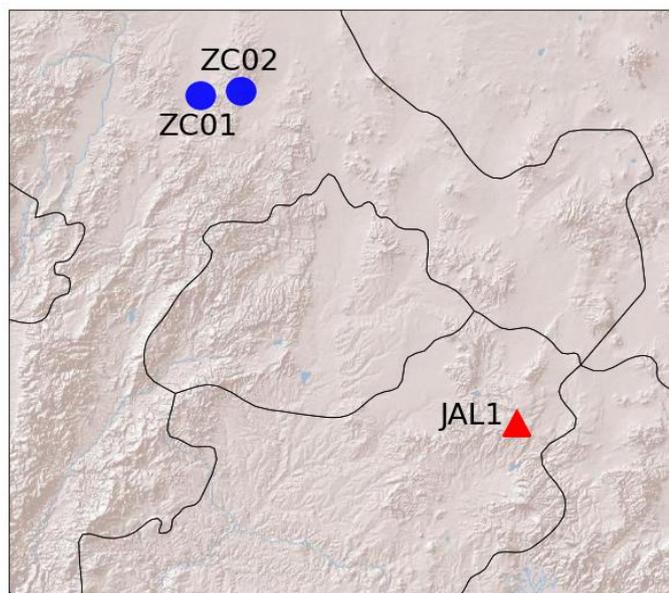


Figura 3.12: Ubicación Región Norcentro. Imagen propia.

El sitio ZC02, ubicado en el Cerro de la Virgen, ha sido estudiado geomorfológicamente por Escalona y Suárez (19), en cuyo trabajo se han estudiado las posibles caídas de bloques, fenómeno asociado con fracturas, fallas y foliación, y la presencia de estos podrían presentar un derrame riolítico derivado de la secuencia volcánica; también han sido estudiadas las posibles cárcavas en temporada de lluvias y los depósitos de Talud que se encuentran en erosión activa. El objetivo del presente párrafo es presentar la precaución y prevención por la instalación de alguna tecnología a pesar de los resultados que este trabajo impulse.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

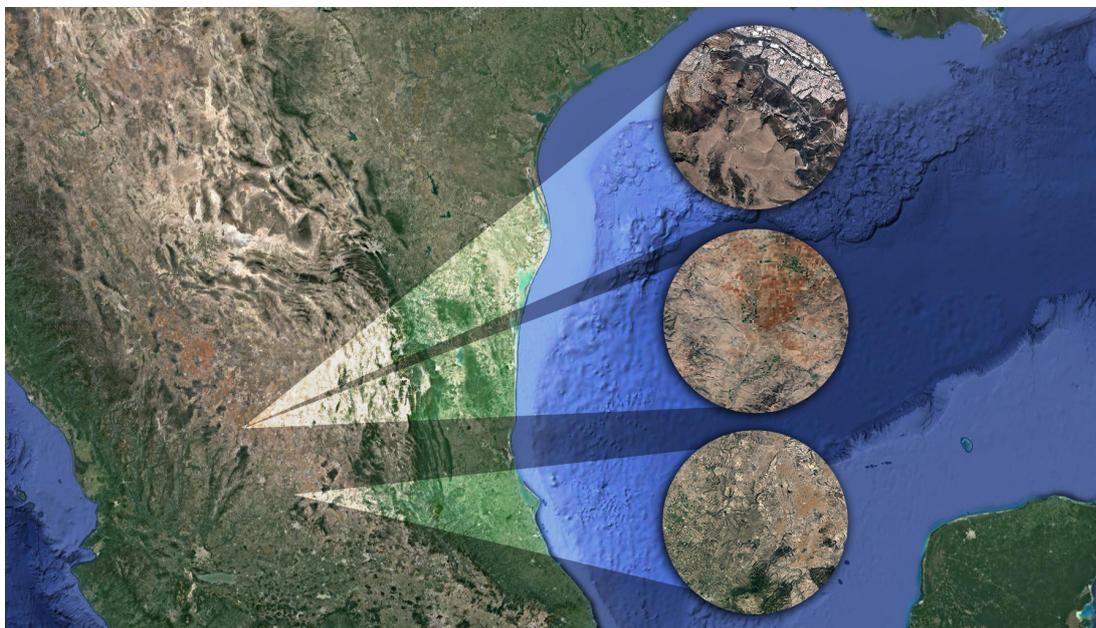


Figura 3.13: Relieve Región Norcentro. Se muestran de arriba hacia abajo ZC01, ZC02 y JAL 1. Imagen propia.

Nordeste (NE)

Abarca fisiográficamente la Llanura Costera del Golfo Norte, la cual se comparte con Estados Unidos de América (EUA). Dentro de sus principales características se observa que al noreste de la provincia predominan lomeríos y llanuras de más 100 km de largo en algunas secciones, en tanto que en el sur se tienen valles y llanuras de inundación formadas por el río Pánuco.

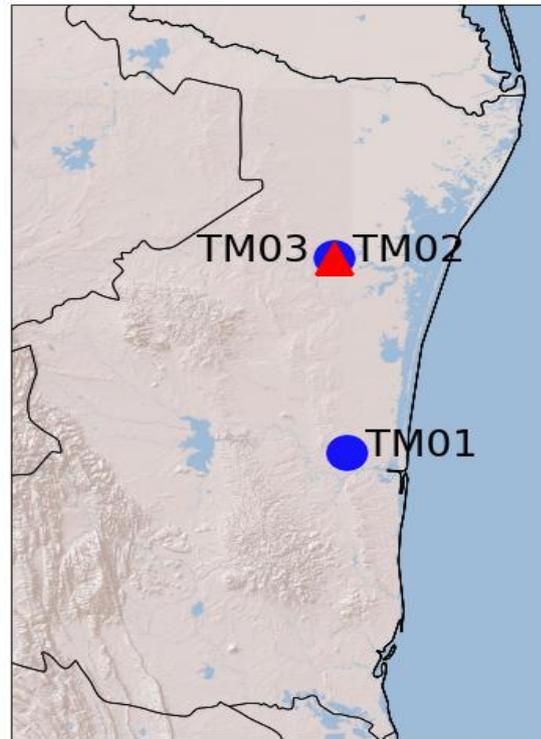


Figura 3.14: Ubicación de sitios en la Región Noreste. Imagen propia.

En la figura 3.15 se puede observar el relieve del sitio. Debido a que los sitios TM03 y TM02 se encuentran tan cercanos se representa un solo relieve.

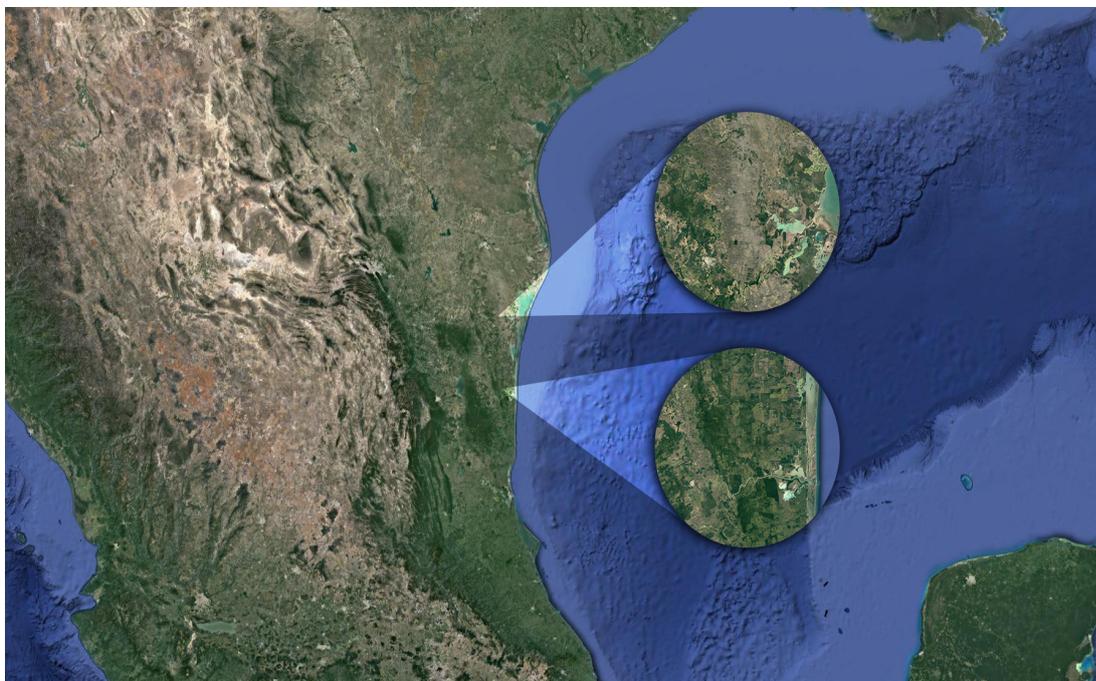


Figura 3.15: Relieve de la Región Noreste. Se muestra de arriba hacia abajo TM03 y TM02. Imagen propia.

Cinturón Volcánico Transversal (CVT)

El Cinturón Volcánico Transmexicano constituye una fisiografía con una extensión de 920 km que biseca a la porción intermedia de la República Mexicana desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. A lo largo de su territorio una zona volcánica lo recorre de norte-sur y en su porción central, desde la ciudad de San Luis Potosí hasta el poblado de Chaucingo, Morelos (30).

El cinturón aparenta ser consecuencia del desplazamiento de las 3 placas tectónicas: Placa de Norteamérica, Placa de Cocos y Caribe. Debido a la subducción de la Placa de Cocos y a la efusión del magma hacia la superficie, los primeros esfuerzos fueron compresivos y produjeron estratovolcanes (30). La composición de la zona depende mucho del ángulo de incidencia y del espesor de la placa oceánica, lo que provoca diferentes manifestaciones tectónicas y estructurales a lo largo y a lo ancho.

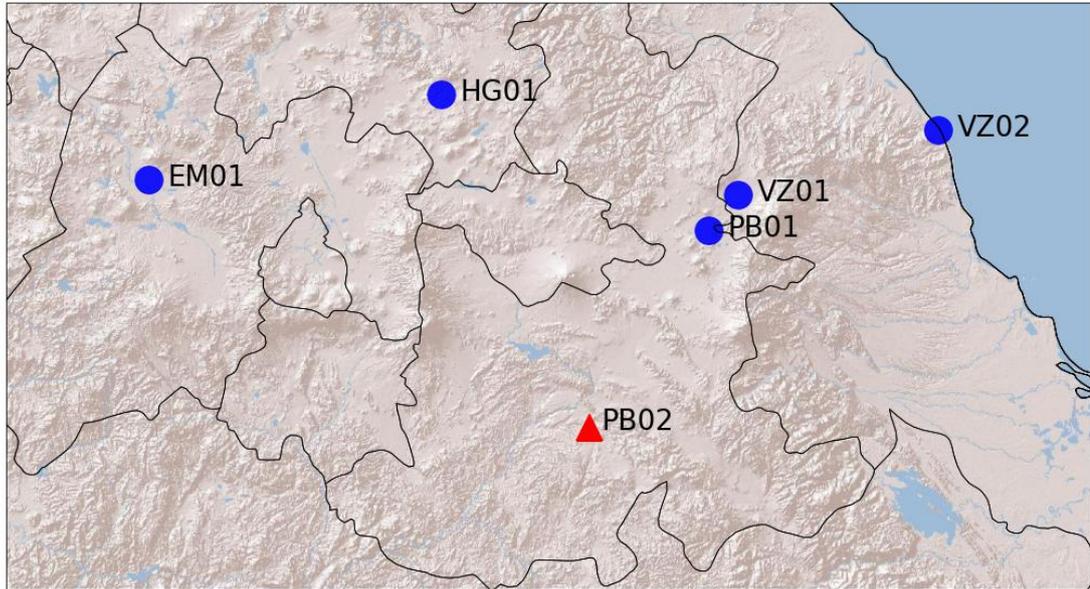


Figura 3.16: Ubicación de sitios en el Cinturón Volcánico Transversal (CVT)

Paso de Chivela (PC)

El paso de Chivela es el desnivel que generan las montañas de la Sierra Madre que atraviesan de este a oeste al istmo de Tehuantepec. Aquí se genera la franja más angosta de separación del Golfo de México y el Océano Pacífico y el punto de menor distancia entre las dos masas marinas, de tan solo 200 km (47) de largo y 40 km de ancho, y su altitud máxima alcanza tan solo 250 m.

La región del Paso de Chivela (PC) se muestra en la figura 3.17, se aprecian también los vientos, que están estrechamente ligados a la interacción entre la gran escala, la circulación y la orografía local, ya que aquí ocurren efectos atmosféricos importantes. Por una parte, se encuentra la circulación de los vientos del Atlántico hacia el Pacífico a través del paso de Chivela, que en ocasiones sobrepasan los $10 \frac{m}{s}$, produciendo lo que se conoce como «vientos tehuanos». Por otra parte, el verano y el otoño se caracterizan por la presencia de centros de baja presión cuasi-estacionarios que podrían favorecer la ocurrencia de eventos tehuanos de larga duración, contrario a los meses de invierno y primavera (20).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

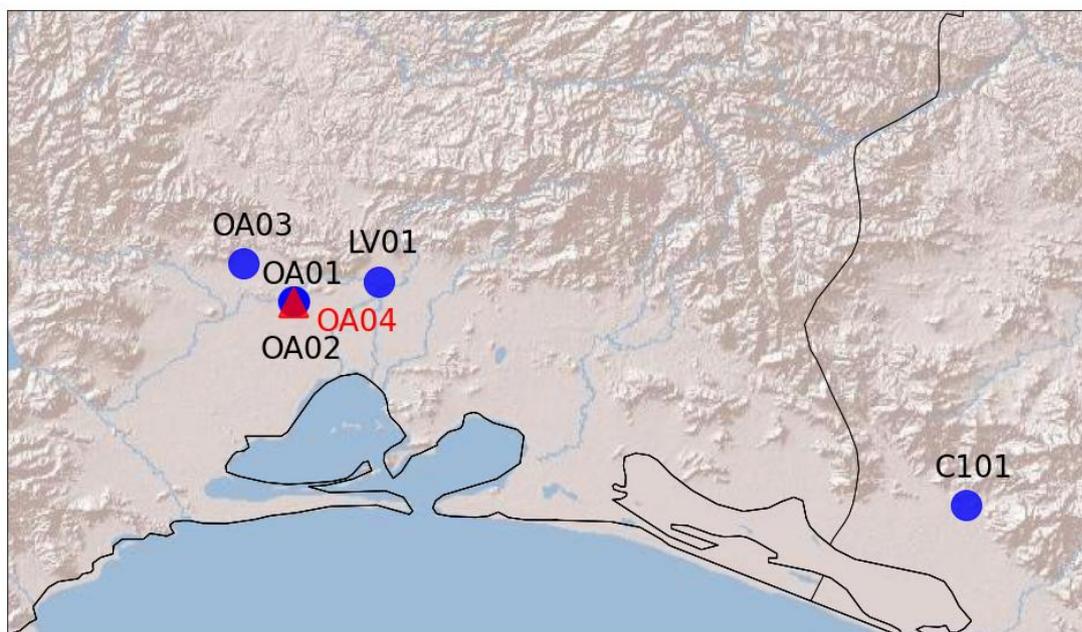


Figura 3.17: Ubicación de sitios en Paso de Chivela (PC)

Por otra parte, la Sierra Madre forma una barrera natural para oleadas de frío, separando la húmeda costa oriental y la costa occidental seca de América Central en dos diferentes regiones climatológicas (46). Diversos científicos han estudiado cómo es que los tehuanos afectan a sus alrededores. Los resultados de estos programas de campo mostraron la evolución detallada del océano superior al forzamiento de un tehuano. En un caso, Barton et al. (3) observaron una caída de 8° en SST (temperatura superficial del mar) dentro de aproximadamente 6 h después del inicio de los fuertes vientos del norte.

El terreno de Oaxaca es variado e incluye sierras, mesetas amplias, valles altos y planicies costeras. Una gran parte de Oaxaca es montañosa, encontrándose la mitad del estado a una altitud mayor a los 1,000 msnm (12). El mejor potencial eólico se encuentra concentrado en la región sureste (SE) del estado, principalmente en la parte sur del Istmo de Tehuantepec. El mayor recurso eólico en el Istmo se presenta cerca de las colinas (incluyendo La Mata y La Venta), cordilleras y en la costa (12). Esta topografía particular induce episodios de viento de salida de brecha muy fuertes sobre el Golfo de Tehuantepec cuando el forzamiento a gran escala es favorable para el desarrollo del viento del norte debido a la aparición de, por ejemplo, las olas de frío en América Central.

El efecto que produce un evento de viento es tan significativo que modifica de forma muy similar la circulación superficial sin importar la condición inicial del campo de corrientes. La baja variabilidad observada cerca de la costa oriental sugiere que la corriente costera se ve menos afectada por el viento en el lado este, mientras que la

zona de alta variabilidad en la costa occidental está relacionada con los cambios de magnitud y dirección en la corriente y con la formación de remolinos anticiclónicos durante algunos eventos tehuanos (59).

Velázquez-Muñoz et al (59) concluyeron que existe una relación entre la circulación costera con la componente zonal del esfuerzo del viento y que la divergencia del esfuerzo del viento sugiere la influencia de otros mecanismos aún no estudiados como lo son el bombeo, el transporte de Ekman y la mezcla turbulenta.



Figura 3.18: Relieve de La Ventosa, Oaxaca

Otro efecto importante se identificó en 1997 cuando Schulz et al (53) llegaron a la conclusión de que el forzamiento dinámico asociado con la depresión de latitud alta y la región confluyente de entrada en chorro sobre México y América Central, además de la canalización topográfica a lo largo de la Sierra Madre, favoreció la extraordinaria incursión ecuatorial del aire frío.

En específico, la estación OA02 se ubica en la región conocida como La Ventosa, que se puede observar en 3.18, que concentra alrededor del 60% de la energía eólica de México. La Ventosa se encuentra justo dentro del Paso Chivela, que es un desnivel entre dos sierras, la Sierra Madre Oriental al oeste y la Sierra Madre de Chiapas al este. La función de distribución de probabilidad anual del viento en la región se caracteriza por

3. DATOS Y METODOLOGÍA

una distribución bimodal (33) rectificada en las correlaciones realizadas por (44).

Península de Yucatán(YC)

YC01 y YC02 se encuentran en la Península de Yucatán. YC01 se encuentra ubicada a 0 m sobre el mar en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM en Sisal en el municipio de Hunucmá. A diferencia de la península de Baja California, la península de Yucatán es una amplia región mayormente plana y, por lo tanto, aunque los vientos en YC01 están determinados por contrastes mar-tierra y su interacción con la atmósfera, al igual que los de Baja California, la circulación a gran escala juega un papel más importante (44).

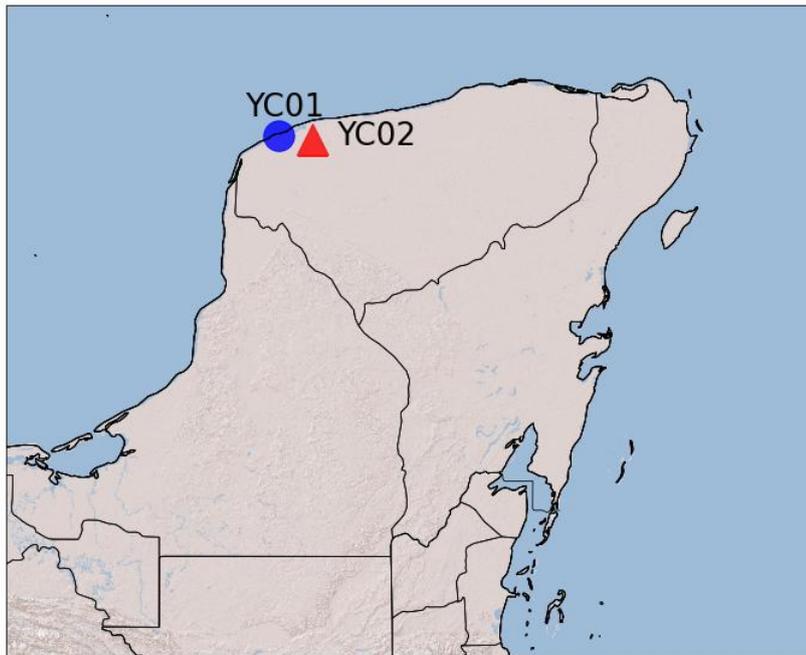


Figura 3.19: Ubicación de sitios en la Península de Yucatán (YC)



Figura 3.20: Relieve Península de Yucatán (YC)

Suroeste(SO)

El sitio GR01 se encuentra en el estado de Guerrero. La superficie de Guerrero forma parte de la Sierra Madre del Sur y del Eje Neovolcánico. En su mayoría se encuentra conformado con sierras con rocas intrusivas predominantes. Cuenta con gran presencia de lomerías y valles que han erosionado a la sierra.

En la figura 3.21 se muestra la ubicación del sitio.

3. DATOS Y METODOLOGÍA



Figura 3.21: Ubicación Región Suroeste (SO)

En la figura 3.22 se muestra el relieve de esta región.



Figura 3.22: Relieve Región Suroeste (SO)

Después de llevar a cabo un exhaustivo análisis bibliográfico de cada una de las regiones abordadas en este documento, se logró obtener una comprensión detallada de las características generales de cada territorio. En algunos casos, se identificaron fenómenos físicos y naturales representativos de cada localidad. Aunque el estudio fisiográfico no constituye el tema central de este trabajo, su realización proporciona una visión integral que contribuye a comprender la amplitud del recurso eólico.

3.2.5 Evaluación del recurso

Una vez definidas las regiones, se realizó la caracterización del recurso eólico mediante un ajuste estadístico de todas las estaciones y se obtuvieron sus respectivos parámetros, se analizó la dirección de viento mediante histogramas, se obtuvieron los datos de intensidad de viento, se realizaron mapas de calor para comprender el comportamiento de velocidad de viento y la intensidad de turbulencia.

3.2.6 Análisis de la intensidad de Turbulencia

Posteriormente, se realizará un análisis diario y estacional con el fin de identificar comportamientos representativos de las regiones.

Una vez obtenidos los datos principales del ajuste estadístico, fue posible proponer un ajuste de curvas. Si bien el comportamiento de la intensidad de turbulencia es sumamente complejo, se observaba una visible curva en los datos promedio encontrados graficados respecto a intervalos de velocidades sugeridos por unidades; por lo que, como propuesta general de este trabajo se realizó un ajuste de curvas respecto a la ecuación 3.1.

$$y = a * \log(x - c) + b \quad (3.1)$$

Una de las contribuciones de este trabajo se relaciona con la definición de rangos para la velocidad del viento. Es importante resaltar que esta clasificación específica ha sido creada y aplicada exclusivamente en el marco de esta investigación con el objetivo de facilitar el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. Si bien existen clasificaciones estándar reconocidas internacionalmente, esta definición particular ha sido concebida para adaptarse a las necesidades y metas específicas de este estudio. Esta aclaración pretende garantizar que la clasificación sea claramente identificada como una parte integral de la metodología empleada en esta investigación, eliminando posibles ambigüedades.

3.2.7 Clasificación de velocidad de viento

El último paso de la metodología conlleva la clasificación de velocidad de viento en 4 etapas: de 3 a 5 $\frac{m}{s}$ se considera como **bajo**; de 5 a 7 $\frac{m}{s}$, **medio**; de 7 a 9 $\frac{m}{s}$, **alto**, y, en último lugar, de 9 a 10 $\frac{m}{s}$ es considerado como **extremo**. En la figura 3.23, se muestran los rangos de velocidad de viento seleccionados para el presente trabajo con sus respectivos colores.



Figura 3.23: Clasificación de colores con respecto a la velocidad de viento

La elección de estas categorías se basa principalmente en dos fuentes: en primer lugar, el Atlas Eólico Mundial (17), la cual es una aplicación en línea desarrollada por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) que estima el recurso eólico global utilizando datos del modelo de reanálisis ERA5 y facilita a los inversores identificar las áreas de alta energía eólica para su aprovechamiento prácticamente en cualquier parte del mundo este considera las velocidades de 10 $\frac{m}{s}$ en su mayor categoría identificada en color rojo.

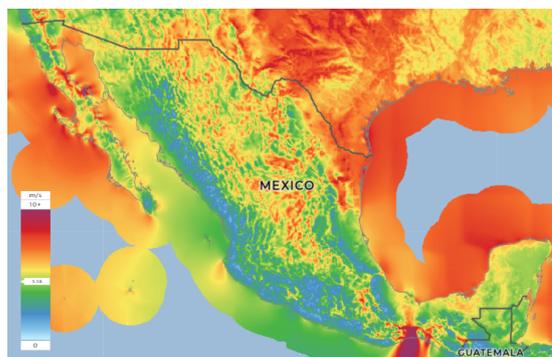


Figura 3.24: Clasificación de colores en el Atlas Eólico Global (17)

En segundo lugar, el Met Office (41) el cual es el servicio meteorológico nacional del Reino Unido, este proporciona servicios meteorológicos críticos y ciencia climática líder en el mundo con el fin de ayuda a tomar mejores decisiones. La utilización de la escala de Beaufort permite identificar pronósticos marinos y es una medida empírica para describir la intensidad del viento basada en las condiciones del mar observadas.

Promedio de Velocidad de Viento	Límites de Velocidad de Viento	Términos descriptivos del viento
$\frac{m}{s}$	$\frac{m}{s}$	-
0	<1	Calma
1	1-2	Aire Ligero
3	2-3	Brisa Ligera
5	4-5	Brisa Gentil
7	6-8	Brisa moderada
10	9-11	Brisa Fresca
12	11-14	Brisa Fuerte
15	14-17	Vendaval Cercano
19	17-21	Vendaval
23	21-24	Fuerte Vendaval
27	25-28	Tormenta
31	29-32	Tormenta Violenta
-	33+	Huracán

Tabla 3.2: Términos descriptivos

3. DATOS Y METODOLOGÍA

A lo largo de este capítulo se estableció la metodología principal del trabajo, se mencionaron las principales características de las ocho regiones propuestas que se muestran en la tabla 3.3 , el ajuste de curvas de intensidad y las categorías seleccionadas.

Región	Características
BC	Topografía irregular Desierto Vizcaíno Contraste Térmico
NO	Estado con mayor extensión de la República Clima semiseco templado
NC	Sierra Madre Oriental Provincia Mesa Central Provincia Sierra Madre Occidental Cerro de la Virgen
NE	Valles y llanuras de inundación
SO	Sierra Madre del Sur y del Eje Neovolcánico
CP	Golfo de Tehuantepec Circulación costera Vientos Tehuanos Transporte de Ekman
CVT	Desplazamiento de 3 placas tectónicas: Placas de Norteamérica, Placa de Cocos y Caribe. Subducción de la Placa de Cocos
YU	Contrastes mar - tierra Frentes fríos sobre el Golfo de México

Tabla 3.3: Características Principales de las 8 regiones seleccionadas: BC, NO, NC, NE, SO, PC, CVT, YU

Discusión y Resultados

Este apartado presenta los resultados obtenidos mediante el procesamiento, análisis e interpretación de los datos de la investigación. La discusión se realiza a lo largo de cinco secciones: Ajuste estadístico, Dirección de Viento, Análisis Estacional, Variación diaria de Intensidad de Turbulencia y Cálculo de la intensidad de Turbulencia. Al final de cada momento se presentan los aportes a la investigación general y, para terminar, la integración de los resultados, para dar paso a las conclusiones en el próximo capítulo.

4.1 Ajuste estadístico

Uno de los componentes más importantes del trabajo es el análisis estadístico que se utilizó para la determinación del comportamiento del viento, el cual se logró a partir de la distribución de Weibull y sus parámetros principales.

El ajuste estadístico que se observa a continuación en la tabla ?? permitirá la comprensión general del comportamiento que tienen las torres meteorológicas en donde a todos los sitios se les otorgó un parámetro de ubicación $loc = 0$. El parámetro de forma se asemeja al ancho de la distribución de datos indicando el pico de distribución de viento. El valor pequeño de forma (k) hace referencia a vientos variables, mientras que vientos constantes están caracterizados por un valor k mayor. El parámetro de escala permite reconocer la escala de la distribución y, específicamente, determina la escala de la abscisa de la distribución de la velocidad del viento que refleja las velocidades de viento altas representativas en el texto como: **alto** y **extremo**, según el sitio deseado. Por ejemplo, cuando $\beta = 1$, el PDF de los tres parámetros Weibull se reduce al de la distribución exponencial de dos parámetros; para valores de $\beta > 1$, la distribución Weibull asume formas parecidas a la distribución normal.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

- Región BC

BCS3 indica una velocidad característica de aproximadamente $4.48 \frac{m}{s}$ y una alta variabilidad en las velocidades del viento. La distribución Weibull en este sitio demuestra limitaciones en la modelación de vientos de baja intensidad. BCS2 presenta una velocidad característica mayor que BCS3, con una variabilidad moderada en las velocidades del viento. BCS1 exhibe valores de $k = 2.177$, $c = 4.928$, y μ de 4.36. Esto indica una velocidad característica ligeramente superior a la de BCS2, acompañada de una variabilidad del viento de intensidad moderada.

Finalmente, BCN1 tiene valores de $k = 2.261$, $c = 6.543$, y μ de 5.80, correspondiendo a una velocidad característica **más alta** en comparación con los otros sitios y una variabilidad significativa.

En general, BCN1 muestra la velocidad característica más alta del sitio en comparación con los sitios en Baja California Sur. La región de Baja California es heterogénea en cuanto a su recurso eólico, lo que puede deberse a factores geográficos, topográficos y climáticos locales y esta variabilidad es crucial para el recurso eólico.

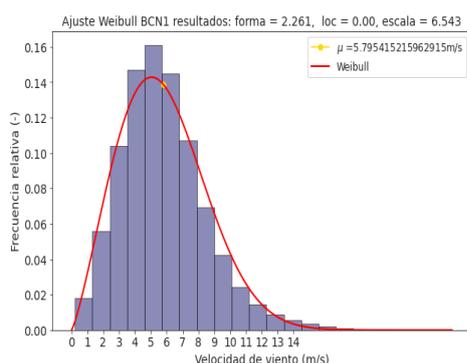


Figura 4.1: Distribución de Weibull del sitio BCN1

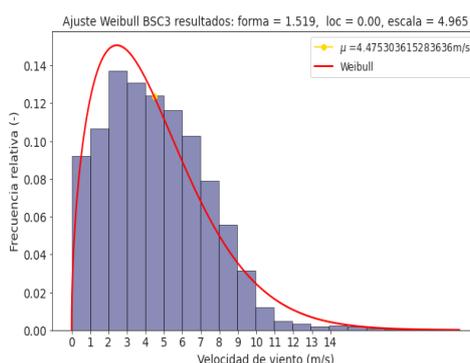


Figura 4.2: Distribución de Weibull del sitio BCS3

- Región NO

Esta región cuenta con valores similares en el factor forma en cuatro sitios: CH01, CH03, CH05 y SI01, pero, a su vez, los factores de escala también son semejantes y se encuentran dentro del mismo rango, por lo que podemos inferir un patrón de comportamiento en la región. Asimismo, dos sitios (CH02 y CH04) se comportan de manera similar al encontrarse ambos en el rango **medio** y el parámetro de escala en **extremo**, aun así algunos criterios se mantienen constantes debido a que ambas estaciones se encuentran en una ubicación cercana entre sí, como se puede observar en la figura 3.9. De igual forma, los sitios CH01 y CH05 coinciden en valores de escala y valor medio.

En las estaciones CH02 y CH04, situadas en proximidad geográfica (mapa 3.9), se

destaca que el factor de forma presenta similitudes al clasificarse en el rango **medio**. Esto indica que las precipitaciones en estas estaciones presentan una distribución más dispersa, con eventos de intensidad más baja y más frecuentes. Esto podría dificultar la predicción del recurso eólico, ya que los eventos de intensidad alta serían menos predecibles. Sin embargo, es probable que también ocurran eventos de intensidad alta, ya que el factor forma es similar al de los otros tres sitios. Recordemos que en la sección visualizamos la cercanía de ambos sitios así como una precipitación media similar 256.6 mm para CH02 y 249.4 mm para CH04. De igual forma, los sitios CH01 y CH05 que se encuentran en una zona geográfica similar, coinciden en valores de escala y valor medio pero con mayor precipitación que los dos sitios anteriores mencionados contribuyendo un patrón similar de comportamiento. El sitio SI01 muestra un comportamiento moderado de las velocidades del viento así como una variabilidad moderada, lo que en este caso indicaría ser una opción atractiva para el recurso eólico.

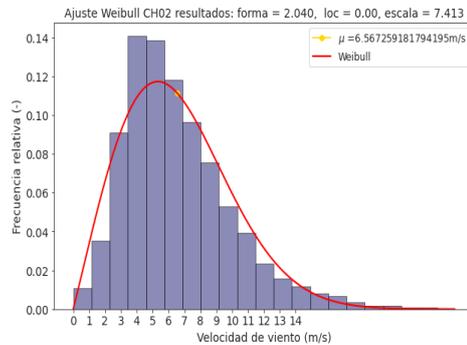


Figura 4.3: Distribución de Weibull del sitio CH02

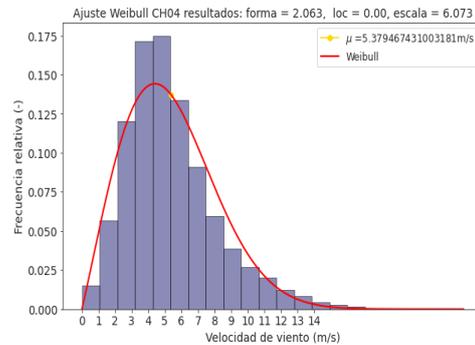


Figura 4.4: Distribución de Weibull del sitio CH04

- Región NC

La región Norcentro cuenta con tres sitios de monitoreo en Zacatecas: ZC01, ZC02 y JAL1. Comparando los parámetros del ajuste estadístico, es evidente que ZC02 tiene velocidades de viento significativamente más altas en comparación con ZC01, lo que se refleja en valores de parámetros sustancialmente mayores. Específicamente, ZC01 se encuentra en un rango clasificado como **bajo** para el factor de forma (k) y en un rango **medio alto** para el parámetro de escala (c). En contraste, ZC02 exhibe un factor de forma en el rango **medio** y un valor de parámetro de escala en el rango **extremo**. Por otro lado, el sitio JAL1 muestra valores de parámetros en un rango **medio** para el factor de forma y un rango **medio alto** para el parámetro de escala.

Los tres sitios exhiben distribuciones de velocidad de viento clasificadas como mesocúrticas, lo que sugiere que es probable que ocurran eventos de viento de intensidad moderada en la región Norcentro. En particular, ZC02 destaca como el sitio con un mayor potencial para el recurso eólico debido a sus valores más altos en el ajuste estadístico.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Basándonos en el ajuste estadístico realizado en estos sitios, se puede inferir que la región Norcentro posee un gran potencial para la energía eólica.

- Región NE

TM01 y TM02 comparten el mismo rango de $k < 1$ bajo. Mientras que TM01 y TM03 comparten el mismo rango **alto** de escala y los tres sitios se encuentran dentro del mismo rango medio, y la velocidad media del vientos en estos tres sitios es similar.

Los valores de k son relativamente altos lo que quiere decir que el viento tiene una tendencia a ser más constante y predecible cercanas a la velocidad media en un rango **medio alto**. Los valores de desviación estándar son moderados pero no extremadamente altas. Basada en la información obtenida, se podría inferir que la región Noroeste tiene un buen potencial para la generación de energía eólica.

- Región SO

Una estación que vale la pena mencionar es GR01 con un valor de 0.87, en donde se descubrió que 51 % de los datos estaban en el rango de 0 a $1 \frac{m}{s}$, lo que posiblemente refleje esta característica a lo largo del análisis. Este es un comportamiento de datos esperado. De igual forma, la distribución Weibull no se considera representativa para $k < 1$. La desviación estándar de $2.8 \frac{m}{s}$ indica una variabilidad moderada a alta en las velocidades del viento.

- Región PC

Es preciso señalar que el Paso de Chivela es la región con valores de escala mayores esto se debe particularmente al sitio geográfico, sus elevaciones, forma y rugosidad, en el que las estaciones se encuentran. Uno de los aspectos más interesantes y debatidos, que se aborda en detalle en la sección 2.3.1, es el evidente comportamiento bimodal que podemos observar en la figura 4.5 correspondiente a La Venta con el que una Weibull Bimodal otorgaría aún un mejor ajuste. Específicamente, en el caso del sitio OA04, se puede observar que la distribución de Weibull se ajusta de manera apropiada.

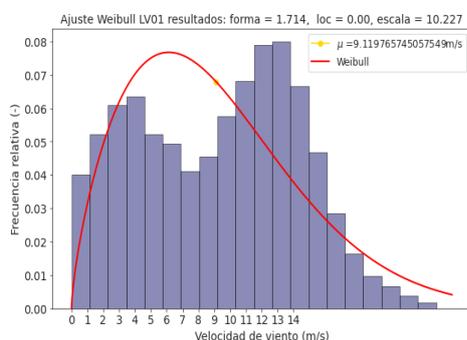


Figura 4.5: Distribución de Weibull del sitio LV01

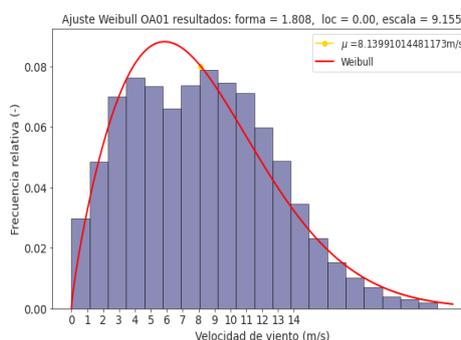


Figura 4.6: Distribución de Weibull del sitio OA01

LV01 tiene el valor c más alto con una distribución de las velocidades del viento es más dispersa. Dada esta información, la región centro tiene un buen potencial para la generación de energía eólica, siendo LV01 la que tiene el mejor potencial seguido de OA01, OA03, OA04.

Además, a pesar de que LV01 se encuentra 5 metros por debajo de las demás estaciones, el comportamiento del parámetro de escala es comparable con los demás sitios debido a su afinidad. Concretamente para el sitio CI01 se obtiene el menor valor de escala. Se puede observar en la figura 3.17 con claridad que dicha estación ya no forma parte del tubo de Venturi generado gracias a la sierra madre de Chiapas y a la Sierra Madre del Sur, por lo que suponer una menor intensidad de turbulencia en el sitio es razonable.

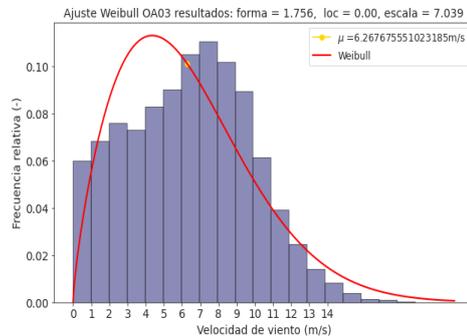


Figura 4.7: Distribución de Weibull del sitio OA03

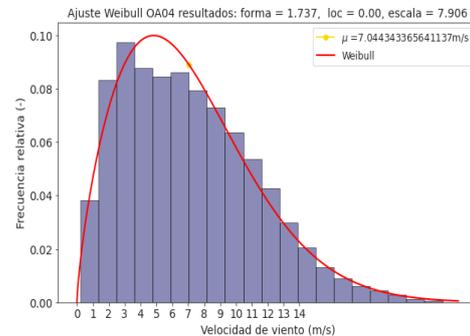


Figura 4.8: Distribución de Weibull del sitio OA04

- Región CVT

El Cinturón Volcánico Transversal cuenta con un amplio espectro en el ajuste estadístico. Sin embargo, en todas las estaciones, se observa que el parámetro « k » se ubica en un rango k bajo. Esto indica una mayor probabilidad de ocurrencia de velocidades de viento extremas debido a una distribución Weibull de cola pesada.

En términos de factor de forma, PB02 muestra una mayor tendencia hacia velocidades del viento más constantes y predecibles en comparación con PB01, que tiende a tener velocidades más variables. Sin embargo, PB02 tiene un parámetro de escala (c) más bajo, lo que significa que las velocidades del viento en PB01 pueden tener una variabilidad más amplia. Dado que PB01 presenta la mayor desviación estándar, se puede inferir que la velocidad del viento en este sitio es variable, lo que podría indicar un potencial eólico relativamente menor en esta región.

Es importante señalar que el sitio VZ01 fue excluido en esta evaluación debido a discrepancias en los datos. En este caso, una distribución con $k = 1$ se caracteriza por seguir una distribución exponencial, lo que no es representativo de los datos observados en la región.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Tanto HG01 como VZ02 muestran una variabilidad significativa en las velocidades del viento. Dado que HG01 posee una velocidad media más alta, podría representar un mayor potencial en esta región. Por otro lado, EM01 presenta una variabilidad moderada en las velocidades del viento.

Región	Sitio	Forma (k)	Escala (c)	Media (μ)	STD (σ^2)
BC	BCN1	2.261	6.543	5.80	2.71
	BCS1	2.177	4.928	4.36	2.11
	BCS2	1.718	3.710	3.31	1.98
	BCS3	1.519	4.965	4.48	3.00
NW	CH01	1.583	4.844	4.35	2.81
	CH02	2.040	7.413	6.57	3.37
	CH03	1.600	4.019	3.60	2.31
	CH04	2.063	6.073	5.38	2.73
	CH05	1.720	4.864	4.34	2.60
	SI01	1.944	4.298	3.81	2.04
NC	ZC01	1.722	4.958	4.42	2.65
	ZC02	2.278	7.480	6.63	3.08
	JAL1	2.173	5.361	4.75	2.30
NE	TM01	1.969	5.761	5.11	2.71
	TM02	1.901	6.048	5.37	2.94
	TM03	2.089	5.826	5.16	2.59
SW	GR01	0.870	2.263	2.43	2.80
CP	CI01	1.227	5.411	5.06	4.15
	LV01	1.714	10.227	9.12	5.48
	OA01	1.808	9.155	8.14	4.66
	OA03	1.756	7.039	6.27	3.69
	OA04	1.737	7.906	7.04	4.18
CVT	PB01	1.156	5.048	4.80	4.16
	PB02	1.896	3.845	3.41	1.87
	VZ01	1.000	1.050	1.05	1.05
	VZ02	1.782	6.320	5.62	3.26
	EM01	1.263	3.298	3.06	2.44
	HG01	2.293	7.096	6.29	2.91
YU	YC01	2.324	6.505	5.76	2.63
	YC02	2.296	3.928	3.48	1.61

Tabla 4.1: Ajuste estadístico

- Región YC

La región de Yucatán tiene parámetros de forma **medios**, lo que indica que cuenta con tasa de fallos que podría aumentar con el tiempo, conocida también como fallas de desgaste.

En el caso de YC01, el valor del parámetro «c» es **extremo**, lo que indica que este sitio es ventoso, con velocidades de viento más altas en promedio. Además, la velocidad media del viento es **medio alto**.

En comparación, YC02 tiene un valor de $c = 3.928$, lo que sugiere una distribución de velocidad del viento más aguda. En este caso, a medida que aumenta la velocidad del viento, la distribución de la velocidad del viento se desplazará hacia la izquierda, lo que podría indicar que las velocidades del viento en YC02 tienden a ser más predecibles, con menos variabilidad en comparación con YC01.

A continuación se muestran los mapas 4.9, 4.10 y 4.11 en los que se observan los parámetros Escala, Forma y Media respectivamente clasificados en 4 categorías pertinentes a este trabajo que identifican los valores como :

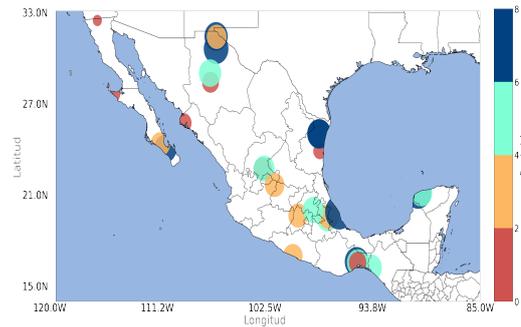


Figura 4.9: Distribución de Weibull parámetro de escala (c)

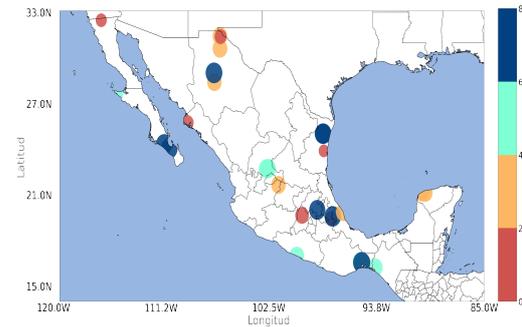


Figura 4.10: Distribución de Weibull parámetro de forma (k)

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

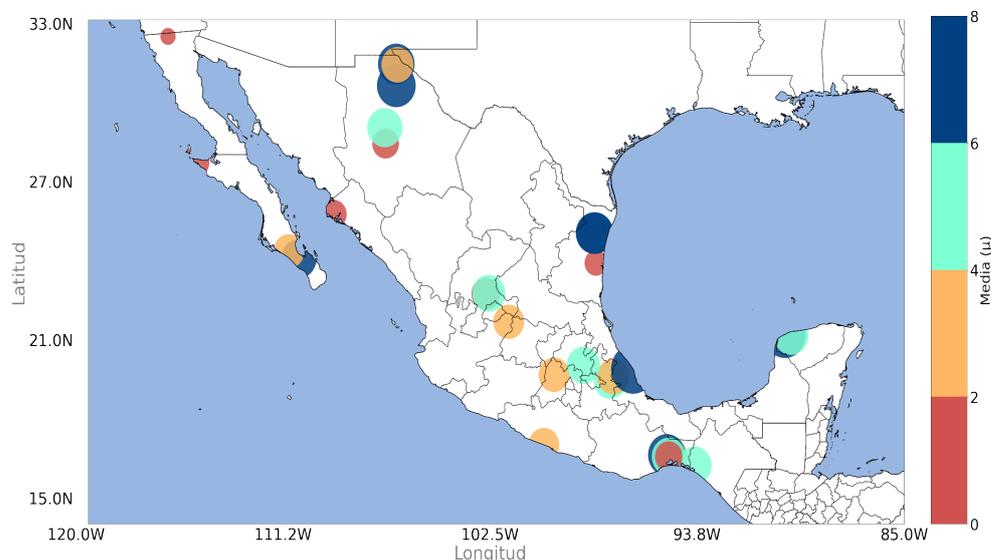


Figura 4.11: Distribución de Weibull parámetro media (μ)

Definitivamente deseo remarcar que en la figura 4.9 se percibe a primera vista que la región YC coincide con el rango mientras que la región NO es sumamente variada y tiene valores de escala extremos, altos, medio y bajos, en tanto que la región NC se identifica alta para los sitios ubicados en Zacatecas y medio para un sitio sin llegar a ser una región desmesurada como NO. Por el contrario, la región NE muestra valores altos para dos sitios cercanos y un valor de escala mucho menor **bajo** para un solo sitio. En su mayor parte, el Paso de Chivela (CP) muestra valores **altos** y **extremos**.

4.2 Dirección de Viento

Como punto de partida, este estudio se enfoca en las turbinas de baja potencia HAWT y VAWT, considerando la influencia de la dirección del viento. Las turbinas de baja potencia, que a menudo se instalan en entornos residenciales y comunidades locales, deben adaptarse a condiciones variables para funcionar de manera eficiente. Comprender cómo la dirección del viento puede cambiar en una ubicación específica permite ajustar las turbinas y garantizar un rendimiento constante a lo largo del tiempo. La complejidad de la dinámica de flujo en las palas de las VAWT es grande dado que operan en una amplia gama de ángulos de ataque y experimentan fenómenos de desprendimiento dinámico y separación del flujo (22).

En muchos casos, las direcciones del viento muestran similitudes significativas en una región particular. En consecuencia, en la práctica, es factible utilizar métodos de interpolación para estimar las condiciones del viento en ubicaciones cercanas al sitio

de interés. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen circunstancias especiales en las que no se recomienda utilizar este enfoque. Estas situaciones suelen involucrar terrenos con características topográficas distintivas, como montañas, costas o valles. En tales escenarios, la topografía local puede ejercer una influencia sustancial en la dirección y velocidad del viento, lo que hace que las interpolaciones no sean apropiadas. En lugar de ello, se requiere llevar a cabo un análisis más detallado y específico de las condiciones del viento en esas áreas, teniendo en cuenta los efectos de la topografía en la dinámica del viento (véase (13)).

- **Región BC**

La región de Baja California tiene dos direcciones predominantes al NE: de 50° a 100° , y al SO: de 250° a 300° , que funcionan perfectamente para describir los sitios BCN1, BCS1 y BCS2. Por lo que se refiere a BCS3, se describen tres direcciones principales que serían el NO, NE y SO. Morales et al. (43) indicaron que la temperatura de la superficie del mar, del aire y la presión de la superficie revelan que la dirección del viento está asociada a dos contrastes térmicos. El primero es que existe una diferencia entre la superficie del agua del océano Pacífico de 8°C , y el segundo contraste, de 6°C , es de la temperatura del aire a través de la península. Sin embargo, al hablar de la presión atmosférica, existe también un contraste importante en el que dentro del mar de Cortés es posible encontrar bajas presiones, mientras que del lado del Pacífico se observan altas. Dentro de la latitud 24°N - 26°N se observan patrones de viento asociados a la orografía que en su mayoría reorientan a las masas de aire al este y aumenta la intensidad del viento.

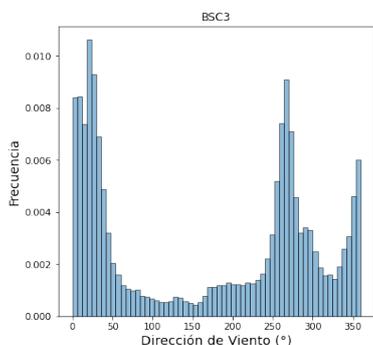


Figura 4.12: Histograma de viento del sitio BCS3

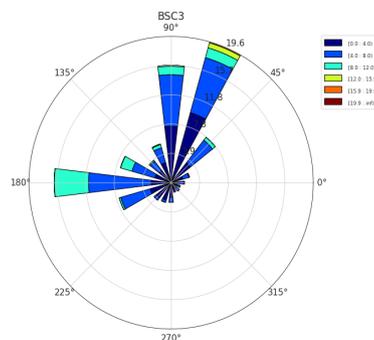


Figura 4.13: Rosa de vientos del sitio BCS3

- **Región NO**

Debido a la amplia distribución de las estaciones a lo largo del territorio, la región NO muestra cuatro comportamientos principales. El primero lo representa la estación CH01 con una dirección predominante al Oeste-Noroeste (ONO) y al SE. Al encontrarse dos sitios en la misma ciudad de Samalayuca, es posible hablar de un segundo

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

comportamiento notorio representativo para los sitios CH02 y CH04 con sus direcciones principales este-nordeste (ENE) provenientes del oeste-suroeste (OSO) y sur-sureste (SSE). Un patrón similar se encuentra representado por la estación CH03, la cual comparte dos direcciones del segundo comportamiento: SSE, NO y ENE. Por último, se encuentra la estación CH05, la cual tiene una dirección al S y SO.

Esta variabilidad en la dirección del viento subraya la complejidad atmosférica de la región Noroeste, enfatizando la necesidad de considerar patrones específicos en la planificación de proyectos eólicos.

• Región NC

En la región Norcentro es posible observar un patrón hacia el sur. La tendencia de la dirección del viento en este sitio para ZC01 y ZC02 es hacia el suroeste (SO) y luego al SE. De manera opuesta, JAL1 tiene una preferencia en primer lugar al este y sucesivamente el SO.

• Región NE

En región Noreste fue posible hallar un comportamiento similar entre las tres estaciones existentes debido en su mayor parte, por la cercanía que estos sitios conllevan. Las estaciones TM01 y TM02 tienen una dirección predominante al sureste con una dirección secundaria al NO, mientras que la estación TM03 tiene una dirección principal al NO con una menor tendencia al sureste.

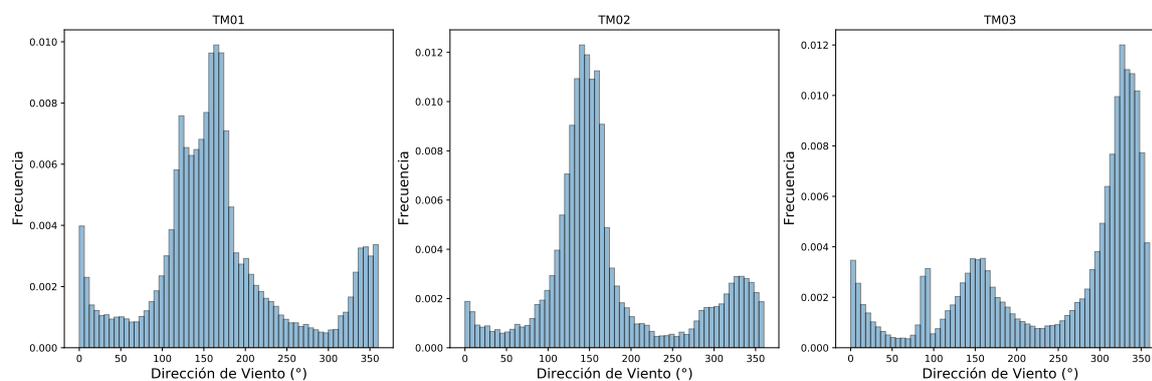


Figura 4.14: Histogramas de dirección de viento para la región NE

• Región SO

La región SO cuenta con solo una estación localizada en el estado de Guerrero; por lo tanto, la dirección de viento representativo tiene dos direcciones, siendo la dominante al SO y la secundaria al NO.

- **Región CP**

A pesar de que la región del Paso de Chivela cuenta con una gran cantidad de sitios, es posible encontrar un patrón predominante al N y NO en las estaciones con una dirección de 350° a 0° .

- **Región CVT**

Ambas estaciones localizadas en Puebla (PB01 y PB02) cuentan con un patrón a 50° al E. Empero, PB02 muestra un segundo patrón a 250° al Oeste.

VZ02 muestra su mayor patrón de 120° a 250° al SE y un segundo patrón de 260° a 350° al O. Por otra parte, justo en estas direcciones, VZ01 muestra una dirección inversa de 350° a 30° al N y una dirección menor a 210° al OSO (Oeste- Suroeste). Una observación interesante es que a pesar de que tanto VZ01 como PB01 se encuentren como vecinos y debiese ser seguro interpolar entre ambos sitios, se tienen direcciones muy lejanas, por lo que se puede deber a una compleja orografía o un error en la medición de alguna de estas estaciones. Finalmente, las estaciones EM01 y HG01 tienen un patrón NE similar.

- **Región YC**

YC01 cuenta con fallas dentro de los datos de dirección del viento por lo que no fue posible determinar un comportamiento. YC02 muestra un claro comportamiento de 40° a 150° al E.

4.3 Cálculo de la intensidad de Turbulencia

La temática que conlleva esta sección representa la mayor contribución de la presente tesis pues su fin es otorgar porcentajes de intensidad de turbulencia representativos de cada sitio que se pueden obtener de manera clara, sencilla y rápida a través de la metodología propuesta.

El cálculo de la intensidad de turbulencia se hace por medio de las curvas logarítmicas explicadas en la sección 3.2.6 determinadas por medio de intervalos de velocidad de viento que se definen gracias a la velocidad máxima en cada uno de los sitios.

Se graficaron los valores promedio de intensidad de turbulencia de cada una de los intervalos de velocidad, obteniendo finalmente una ecuación descriptiva de la intensidad de turbulencia que pudiese ser utilizada como aproximación al parámetro. Esta metodología facilitará los cálculos del recurso eólico debido a que el valor de intensidad se suele mantener estable al momento de realizar cálculos ingenieriles.

- **Región BC**

La región BC se representa gráficamente en la figura 4.15. A simple vista, se evidencia una tendencia común en tres sitios: BCS1, BCS2 y BCN1; no obstante, el comportamiento de BCS3 se distingue por su marcada singularidad. Anteriormente se mencionó la complejidad fisiográfica de la península de Baja California y sus largas cadenas montañosas. BCS3 se diferencia de otros lugares en que se encuentra en el Desierto Vizcaíno de San Sebastián Vizcaíno al ras del océano Pacífico a una altura de apenas 17 m. Está caracterizada por su clima seco. Por lo tanto, y como se puede observar en el relieve de la figura 3.6 no cuenta con cadenas montañosas a su alrededor. En este sitio los fuertes vientos del océano Pacífico y en ocasiones, las lluvias torrenciales llegan a inundar las llanuras (45). Los embates constantes del mismo viento del mismo océano causan que las plantas de planicies costeras sean bajas y ampliamente espaciadas (61). Sin embargo, los vientos costeros disminuyen tierra adentro, la vegetación toma una mayor altura y aparecen mesetas inclinadas al oeste o hacia el océano Pacífico. Cabe destacar que para esta estación en específico se encontraron errores de medición considerables en el intervalo de velocidad $[0-1] \frac{m}{s}$ que no se consideraron para su análisis ni para la generación de curva de intensidad de turbulencia de ninguna estación.

En BCS1 se puede mostrar una tendencia a partir del intervalo de velocidad $[3 - 4] \frac{m}{s}$ con porcentajes de intensidad de turbulencia que varían desde 15.3% hasta 15.8%. A partir del intervalo $[11 - 12] \frac{m}{s}$, es posible observar un aumento de esta con valores 16.3% a 16.5% estabilizándose para la máxima velocidad a 15.2%.

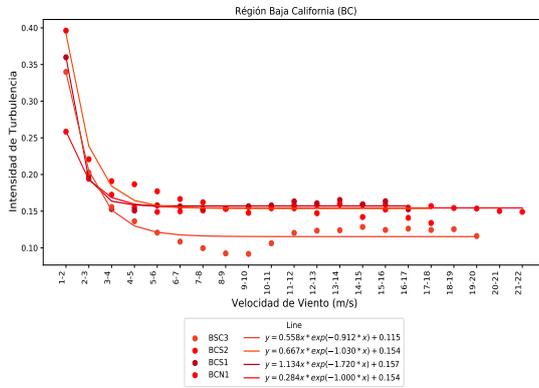


Figura 4.15: Ajuste de curva de la Región BC

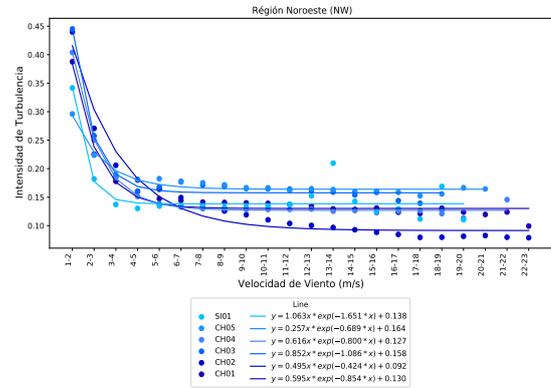


Figura 4.16: Ajuste de curva de la Región NO

BCS2 posee la máxima intensidad de turbulencia de las tres estaciones meteorológicas dentro del intervalo $[1 - 2] \frac{m}{s}$ con un valor de 39.6%. A partir del intervalo $[5 - 6] \frac{m}{s}$ es posible observar 16%, que va variando entre 14.7% a 15.9% y comienza a disminuir notoriamente a partir de los intervalos más grandes que son de $[16 - 17]$ y $[17 - 18] \frac{m}{s}$.

Para esta estación se observa una tendencia descendente de 25.8% en la intensidad de turbulencia hasta el intervalo $[9 - 10] \frac{m}{s}$ hasta 15.5% en donde existe un comportamiento creciente que va hasta el intervalo de $[11 - 12] \frac{m}{s}$ con una búsqueda de la estabilidad en las intensidades de 15.8%. y 15.9%. hasta las velocidades en el intervalo $[16 - 17] \frac{m}{s}$ n con intensidades de 15.3% hasta 15.6%.

• **Región NO**

A simple vista es posible observar un comportamiento asertivo conforme al ajuste de curva realizado en la metodología propuesta. En cuanto a la intensidad de turbulencia, se observan notables diferencias entre los sitios de la región Noroeste. CH01 exhibe una presencia constante del 13.4% en el rango de velocidades de $[3 - 18] \frac{m}{s}$. Contrariamente, CH02 presenta valores similares alrededor del 9% en velocidades que oscilan entre $[7 - 18] \frac{m}{s}$, destacando, sin embargo, por alcanzar el valor máximo de todas las estaciones, registrando una intensidad de turbulencia del 44.5%.

Por otro lado, CH03 muestra comportamientos similares a CH02, manteniéndose alrededor del 16.2% desde $[2 - 3] \frac{m}{s}$ hasta $[15 - 16] \frac{m}{s}$. Estas semejanzas se pueden visualizar en las figuras ?? y ??. Ambos sitios comparten patrones en los primeros intervalos de velocidad, especialmente cuando la velocidad es inferior a $3 \frac{m}{s}$. En contraste, CH04 exhibe una constancia desde $[6 - 7] \frac{m}{s}$ hasta $[20 - 21] \frac{m}{s}$, alcanzando un 14% en el intervalo máximo. Este sitio se distingue por presentar los porcentajes más bajos de intensidad de turbulencia, con un promedio de 29.6%.

En el caso de CH05, se observa estabilidad a partir del intervalo $[6 - 7] \frac{m}{s}$, manteniendo una intensidad de turbulencia del 16.4%, que persiste sin cambios hasta el

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

máximo intervalo de velocidad. En comparación, SI01 muestra una estabilidad inicial del 13.4% desde $[2-3] \frac{m}{s}$, experimentando ligeras variaciones a partir del intervalo $[12 - 13] \frac{m}{s}$, con un pico del 20% y posterior disminución nuevamente a 13.4%.

• Región NC

La Región Norcentro cuenta con tres sitios distintos. El primer sitio es JAL1, el cual muestra una intensidad de turbulencia de 22% en su intervalo inicial de $[1 - 2] \frac{m}{s}$, y se mantiene en decremento desde un intervalo de $[4 - 5] \frac{m}{s}$ con un valor de IT alrededor de 15% hasta el intervalo $[9-10] \frac{m}{s}$, en el que se encuentran valores de 16.3%, y vuelven a disminuir en el intervalo $[13 - 14] \frac{m}{s}$ a 16%, ver figura 4.17. ZC01 disminuye de una intensidad de turbulencia promedio de 47% en el primer intervalo hasta 14%, en donde se mantiene estable a $[9-10] \frac{m}{s}$. Por otra parte, ZC02 comienza con intervalo promedio de 43% y disminuye drásticamente a 0.115 en el intervalo de velocidad de $[6 - 7] \frac{m}{s}$. Esta representará la menor intensidad de turbulencia de la región.

Las tres estaciones de la región NC coinciden en buscar una estabilidad a la par a partir de una velocidad de viento del intervalo $[9-10] \frac{m}{s}$, cada una con su respectiva intensidad de turbulencia. JAL1 representa la estación con mayor intensidad de turbulencia de la región, mientras que ZC02 cuenta con la menor.

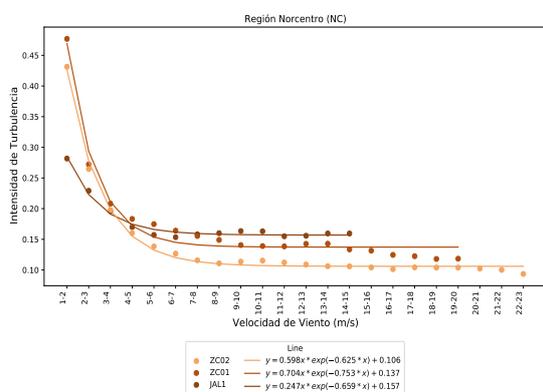


Figura 4.17: Ajuste de curva de la Región NC

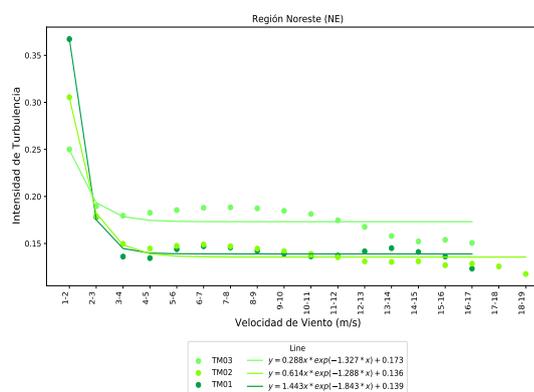


Figura 4.18: Ajuste de curva de la Región NE

• Región NE

En la Figura 4.18, se presenta el comportamiento de las curvas de los sitios TM01, TM02 y TM03 en la Región NE. Las curvas de TM01 y TM02 muestran una semejanza notoria a partir del intervalo de velocidad $[6 - 7] \frac{m}{s}$, manteniéndose con valores de intensidad de turbulencia alrededor del 14%. Sin embargo, a partir del intervalo $[12 - 13] \frac{m}{s}$, se observa una ligera separación cuando TM02 comienza a disminuir mientras que TM01 se mantiene dentro del rango de valores de IT.

En contraste, el sitio TM03 exhibe un comportamiento excepcionalmente complejo y

difícil de definir de manera precisa. Desde el intervalo $[2 - 3] \frac{m}{s}$, se registran valores de intensidad de turbulencia relativamente altos, aproximadamente del 18%. A medida que aumenta la velocidad, se observa un descenso continuo en los valores, pasando de 16.7% a 15% en el último intervalo de velocidad, $[12 - 13] \frac{m}{s}$.

- **Región CVT**

Es posible observar en la Región del CVT una tendencia en la intensidad de turbulencia en 4 de las 6 curvas que pertenecen a la región (VZ01, VZ02, HG01 y PB01). VZ02 representa al sitio con menor intensidad de turbulencia seguido de VZ02, PB01, EM01, HG01 y PB02.

Para el sitio PB01 se observa un claro decremento logarítmico con el valor máximo de la región que es de 54.4% hasta 11.7% en un intervalo de $[8 - 9] \frac{m}{s}$, donde se estabiliza.

Por un lado, VZ01 cuenta con una curva nítida en la que a partir de un intervalo de $[4 - 5] \frac{m}{s}$ existe una equiparación con valores de intensidad de 11%. En las velocidades más altas de este sitio $[14 - 15]$ y $[15 - 16] \frac{m}{s}$ coinciden con los mayores valores de intensidad de turbulencia de 14.2% y 13% respectivamente.

Asimismo, la estación VZ02 es la estación que presenta menor intensidad de turbulencia dentro de la región con un valor de 28.7. Tiene un decremento hasta el intervalo $[6 - 7] \frac{m}{s}$, intervalo en el cuál la curva busca una estabilidad que permanecerá hasta las velocidades máximas $[22 - 23] \frac{m}{s}$ con valores que van desde 10% hasta 87%.

Ahora bien, el sitio HG01 cuenta con un comportamiento semejante a las estaciones anteriormente mencionadas; no obstante, cuenta con tres principales valores tendencia que resaltan la intensidad de turbulencia. A partir del intervalo $[5 - 6] \frac{m}{s}$ hasta el intervalo $[9 - 10] \frac{m}{s}$ los valores rondan 13.5%, seguido de un notable decremento hasta el intervalo $[14 - 15] \frac{m}{s}$ con valores que llegan a 7%.

Es importante señalar que al igual que en el sitio BC, HG01 fue una excepción con grandes variaciones en los intervalos de $[0 - 1] \frac{m}{s}$ lo que implicó la selección de datos de todas las estaciones de este intervalo en adelante.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

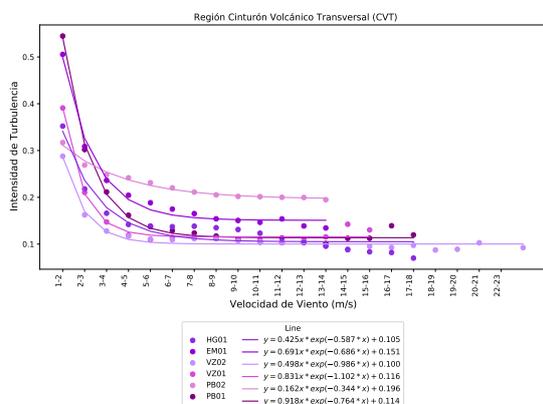


Figura 4.19: Ajuste de curva de la Región CVT

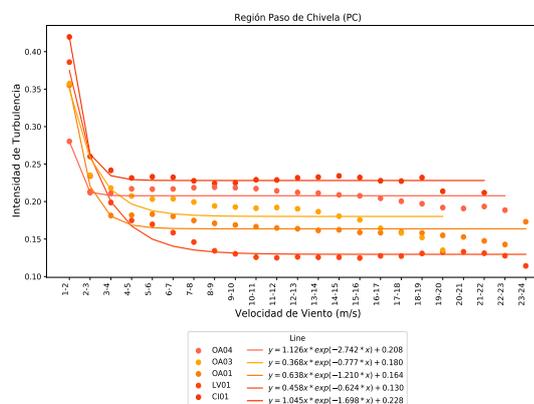


Figura 4.20: Ajuste de curva de la Región PC

• Región PC

El comportamiento observado en este sitio inicialmente parece concordar con los ajustes de curvas realizados, a pesar de la evidencia previa que demuestra que el ajuste de Weibull para algunas estaciones en esta región es bimodal. Por lo tanto, se propone la utilización de los valores medios obtenidos a partir del ajuste de Weibull propuesto, ya que esto contribuiría a mejorar las ecuaciones obtenidas.

En el sitio OA01, la variación general de la intensidad de turbulencia (IT) a lo largo de sus velocidades es relativamente estable. Desde el intervalo $[3 - 4] \frac{m}{s}$ hasta el $[19 - 20] \frac{m}{s}$, se observan valores cercanos al 16.5%.

Para el sitio OA03, a partir del intervalo $[3 - 4] \frac{m}{s}$ hasta el intervalo $[14 - 15] \frac{m}{s}$, los valores de intensidad de turbulencia se mantienen alrededor de 19.3%.

El sitio OA04 cuenta con un comportamiento bastante particular, ya que es el sitio con un porcentaje de intensidad de turbulencia más constante, analizado con el mismo valor de 21% a lo largo de 11 intervalos de velocidad hasta el intervalo $[13 - 14] \frac{m}{s}$, donde disminuye a 20.7% y alrededor del intervalo $[17 - 18] \frac{m}{s}$ disminuye muy lentamente con valores alrededor del 19%.

A continuación se muestra el comportamiento de los datos antes de ser procesados por la metodología.

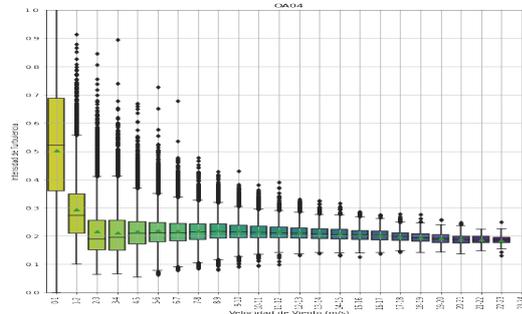


Figura 4.21: Sitio OA04- Región CP

• Región SO

La región SO cuenta únicamente con una estación en la que la intensidad de turbulencia de 50% disminuye y se encuentra en la estabilidad de IT constante a partir del intervalo $[8 - 9] \frac{m}{s}$. Para esta estación fue posible reconocer una gran parte de los datos en velocidades bajas; por lo que, en definitiva, la consideración del intervalo $[0 - 1] \frac{m}{s}$ hubiese otorgado diferentes parámetros en la ecuación obtenida.

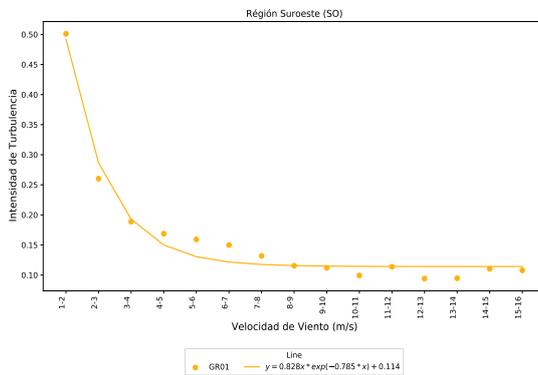


Figura 4.22: Ajuste de curva de la Región SO

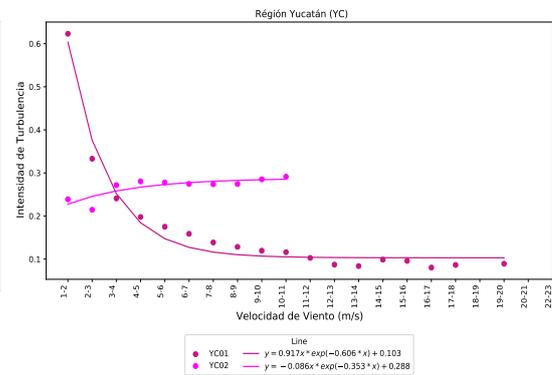


Figura 4.23: Ajuste de curva de la Región YC

• Región YC

Es posible identificar que el sitio YC02 tiene un comportamiento constante de intensidad de turbulencia a lo largo del aumento de velocidad del viento a partir del intervalo $[3 - 4] \frac{m}{s}$ hasta el máximo de $10 \frac{m}{s}$, lo cual no corresponde con la teoría señalada, debido a que a mayor velocidad, hay menor IT, por lo que se concluye como una falla técnica en el anemómetro del sitio.

El sitio YC01, en cambio, sí cuenta con una curva logarítmica clara en la que se muestran valores IT constantes a partir de una velocidad de $9 \frac{m}{s}$.

4.3.1 Parámetros de Intensidad de Turbulencia

Gracias a la metodología presentada en la sección 4.3, es posible determinar los valores de a , b y c en la ecuación anterior que en conjunto con la velocidad media del viento, otorgará un valor IT . Este proceso se repitió tres veces al considerar datos de forma mensual, estacional y con la velocidad media del ajuste estadístico obtenido μ . Obteniendo los mismos datos para el método mensual y estacional a excepción del sitio GR01. La estimación de la intensidad de turbulencia se deriva del valor de la media de este proceso, obteniendo, finalmente la aproximación de la intensidad de turbulencia.

En la tabla 4.2 se muestran los parámetros generales para todos los sitios a excepción de VZ01 que se dejó de considerar a partir del ajuste estadístico.

Región	Sitio	Media	a	b	c	IT (%)
BC	BCN1	5.7983	0.28	1.00	0.15	15.5
	BCS1	4.3638	1.13	1.72	0.16	15.8
	BCS2	3.3079	0.67	1.03	0.15	17.5
	BCS3	4.4753	0.56	0.91	0.12	12.4
NO	CH01	4.3474	0.60	0.85	0.13	14.5
	CH02	6.5673	0.50	0.42	0.09	12
	CH03	3.6035	0.85	1.09	0.16	17.6
	CH04	5.3795	0.62	0.80	0.13	13.6
	CH05	4.3414	0.26	0.69	0.16	17.8
	SI01	3.8112	1.06	1.65	0.14	14
NC	ZC01	4.4201	0.70	0.75	0.14	16.3
	ZC02	6.6263	0.60	0.62	0.11	11.5
	JAL1	4.7526	0.25	0.66	0.16	16.9
NE	TM01	5.1069	1.44	1.84	0.14	13.9
	TM02	5.3665	0.61	1.29	0.14	13.6
	TM03	5.1657	0.29	1.33	0.17	17.3
SW	GR01	2.4277	0.83	0.78	0.11	25.7
PC	CI01	5.0617	1.04	1.70	0.23	23
	LV01	9.1198	0.46	0.62	0.13	13.1
	OA01	8.1399	0.64	1.21	0.16	16.4
	OA03	6.2677	0.37	0.78	0.18	18.3
	OA04	7.0567	1.13	2.74	0.21	20.8
CVT	PB01	4.7972	0.92	0.76	0.11	13.7
	PB02	3.4149	0.16	0.34	0.20	24.7
	VZ02	5.6229	0.50	0.99	0.10	10.2
	EM01	3.0644	0.69	0.69	0.15	23.4
	HG01	6.2864	0.42	0.59	0.10	11.5
YC	YC01	5.7636	0.92	0.61	0.10	13.1
	YC02	3.4835	-0.09	0.35	0.29	26.2

Tabla 4.2: Valores IT obtenidos a partir de la metodología propuesta.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El sitio YC02 cuenta con el valor de intensidad de turbulencia más alto de todos los sitios evaluados con un valor de 26.6%. Se puede observar que la región CVT presenta los mayores valores IT junto con la región SO que se presenta de color amarillo con un valor de 25.7%. Con respecto a la velocidad media, la región PC coincide en tener los valores de velocidades *altas* y *extremas*.

Recordando el relieve de la República Mexicana de la figura 3.6 y las regiones seleccionadas, se presenta el mapa de la figura 4.24 con el fin de mostrar los valores IT calculados; se observa un amplio rango de dispersión entre sitios.

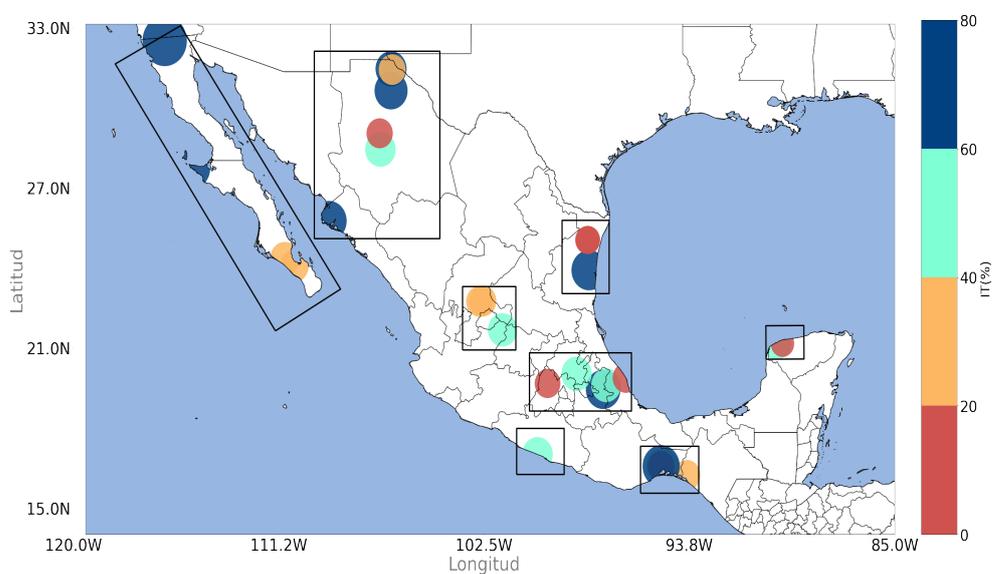


Figura 4.24: Mapa caracterización IT (%)

4.3.2 Global Wind Atlas vs PNUD

A continuación se muestra una breve comparación de los datos de velocidad media obtenidos del PNUD y del Atlas Eólico Mundial (17), el cual es una aplicación en línea que permite a los inversores identificar las áreas de alta energía eólica para su aprovechamiento prácticamente en cualquier parte del mundo. En la figura 4.25 se muestran dos alturas: 10 m en color violeta y 50 m en color verde; por lo que, tomando en cuenta que la mayoría de las estaciones presentadas se encuentra a 15 m y 20 m, una comparación directa sería incorrecta; sin embargo, la visualización de un gráfico como este, permite la comprensión del comportamiento real del viento. Estas bases cuentan con una correlación de 0.97 con Wind Atlas a 10 m y con otra de 0.92 con Wind Atlas a 50 m con respecto a la base PNUD. Esto ractifica el valor de este trabajo y la importancia del estudio de los sitios.

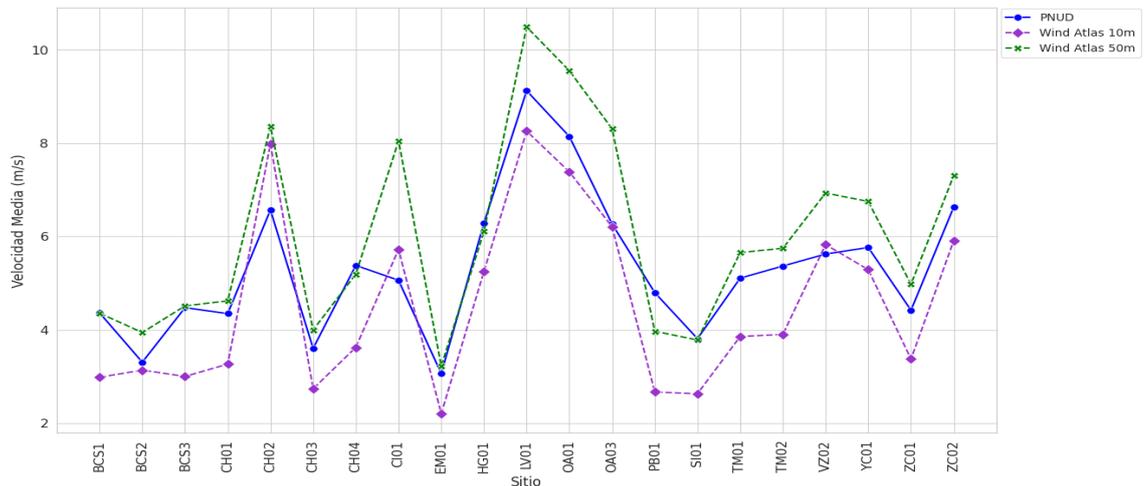


Figura 4.25: Comparación de datos de velocidad media μ

Existen tres observaciones principales en esta comparación. Para empezar, para algunas estaciones se puede observar la sobre estimación del atlas eólico para la altura de 10 m, evaluando el recurso a $8 \frac{m}{s}$, mientras que el valor real es de $6.57 \frac{m}{s}$, tal es el caso de la estación CH02; aunque en otro sentido, el sitio a comparar es a 16 m de altura y no a 10 m. Se puede incluir en este comportamiento a la estación a CI01 que se encuentra a 20 m. En segundo lugar, el 76.19% de los sitios PNUD se encuentran en una subestimación de la velocidad media en comparación al Atlas; este es un comportamiento ideal esperado debido a que la altura de las estaciones es mayor, a excepción del sitio EM01, que coincide con tener exactamente la misma altura comparada, lo que representa una subestimación real. Por último, se observan 3 sitios con una mínima diferencia real y estimada en el sitio que comparten valores, se trata de BCS2, OA03 y VZ02.

4.4 Análisis Estacional de la Intensidad de Turbulencia

La evaluación estacional permitirá identificar si es que existen patrones en las regiones propuestas para poder predecir comportamientos que faciliten el acceso al recurso eólico. Las escalas de longitud del tiempo, sistemas a nivel global por debajo de la capa límite de la superficie aerodinámica de un aerogenerador, escalas de tiempo estacionales, fluctuaciones en el clima y equilibrio de la generación eléctrica y la demanda son factores que deben ser entendidos y manejados (58).

Al realizar un análisis estacional se pueden encontrar valores extremos de rapidez e intensidad turbulenta. Es por eso que en la siguiente sección se clasificó a la IT en cuatro intervalos: **bajo**, **medio**, **alto** y **extremo**. El intervalo bajo considera una IT porcentual que abarca de $10-30 \frac{\sigma_a}{U(z)}$ mientras que el intervalo extremo considera $70-90 \frac{\sigma_a}{U(z)}$. Con respecto a la rapidez del viento los valores son: 3 a $5 \frac{m}{s}$, 5 a $7 \frac{m}{s}$, 7 a $9 \frac{m}{s}$ y 9 a $10 \frac{m}{s}$

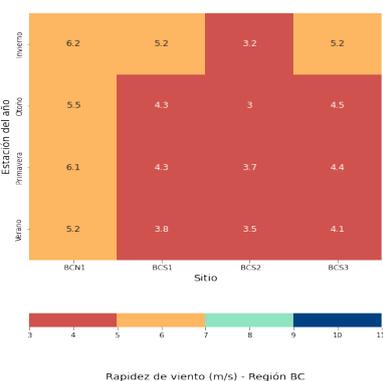


Figura 4.26: Rapidez de viento- Región BC

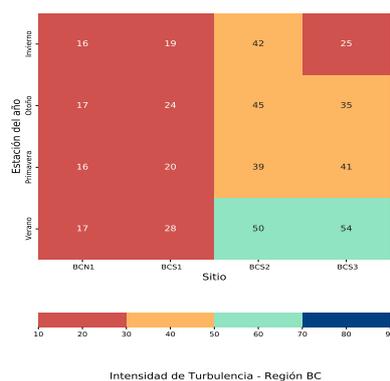


Figura 4.27: Intensidad de Turbulencia- Región BC

• Región BC

Por lo que se refiere a la rapidez promedio de las regiones, el comportamiento que se encontró para la región BCN1 a lo largo de las cuatro estaciones fue un valor IT **medio**, manteniéndose en un rango de $5.2 \frac{m}{s}$ a $6.2 \frac{m}{s}$ como se observa en la figura 4.26. Por consiguiente, al hablar de intensidad de turbulencia, es posible observar de igual forma un comportamiento constante **bajo** que no varía, con un valor de 16 para la primavera e invierno y de 17 en otoño y verano, como se puede observar en la figura 4.27.

BCS1 y BCS3 se superponen, en ambos el valor máximo es en invierno con $5.2 \frac{m}{s}$, y el valor mínimo coincide ser en verano con $3.8 \frac{m}{s}$ y $4.1 \frac{m}{s}$, respectivamente. Otro rasgo relevante es que los valores de velocidad tanto en primavera como otoño se mantienen constantes. En lo que respecta a la intensidad para el sitio BCS1, este cuenta con el

menor valor en invierno y el mayor en verano; en contraste con el sitio BCS3, en donde la IT es más compleja y varía a lo largo de las estaciones con un valor mínimo de 25 en invierno, que va aumentando hasta llegar al valor máximo de 54 en verano y vuelve a descender.

El último en la lista es el sitio BCS2, que muestra tener valores de velocidad bajos a excepción de la primavera, siendo ese mismo valor el menor para IT y aumentando en verano con un valor de 50.

De manera general, BCN1, BCS1 y BCS3 coinciden en tener sus menores valores IT en invierno y las cuatro estaciones cuentan con sus valores máximos en verano.

Morales Acuña et al. (43) identificaron las velocidades predominantes en verano a 100 m de altura y encontraron que las intensidades altas ($> 7 \frac{m}{s}$) están a 27° a $30^\circ N$ con un chorro estacionario a 30° . Las rapideces bajas ($< 2 \frac{m}{s}$) son distribuidas en tres zonas: $23^\circ N$, $26^\circ N$ y $31^\circ N$, que están asociadas a las elevaciones orográficas más altas ($> 800m$). Y los vectores de viento indican que la dirección predominante del viento es hacia el este.

- **Región NO**

A diferencia de Baja California, las altas velocidades de viento ocurren en primavera, seguidas del invierno, coincidiendo el verano en tener las velocidades de viento para la mitad de las estaciones (CH01, CH02, CH05) y el otoño para la otra mitad (CH03, CH05 y SI01).

Para la región NO, es visible observar que el sitio CH03 cuenta con las más altas intensidades de turbulencia mientras que CH02 tiene las más bajas, ver figura 4.28.

CH03 y SI01 coinciden en tener valores bajos ($3.1 \frac{m}{s}$ y $3.6 \frac{m}{s}$) en otoño, mientras que las estaciones CH01, CH02, CH04 y CH05 tienen sus valores mínimos en verano con $3.6 \frac{m}{s}$, $5.6 \frac{m}{s}$, $4.9 \frac{m}{s}$ y $3.5 \frac{m}{s}$, respectivamente. Ya que en invierno ocurren los valores altos de velocidad para las estaciones CH01, CH02, CH03, CH04 ($\frac{4}{6}$ de las estaciones), por lo que encontrar valores mínimos de intensidad en esta época del año sería comprensible.

El comportamiento de la IT para $\frac{4}{6}$ de las estaciones (CH02, CH04, CH05, SI01) se mantiene en el rango **bajo**, coincidiendo con tener sus valores máximos en el verano y los valores mínimos en invierno, como se puede observar en la figura 4.28, diferente de CH01 que comparte el rango bajo de turbulencia tanto en primavera como en invierno. En cambio, CH01 tiene **bajas** turbulencias en primavera e invierno y **altas** en otoño e invierno. Por otra parte, CH03 es la única estación que se encuentra en el rango **medio** durante todo el año.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

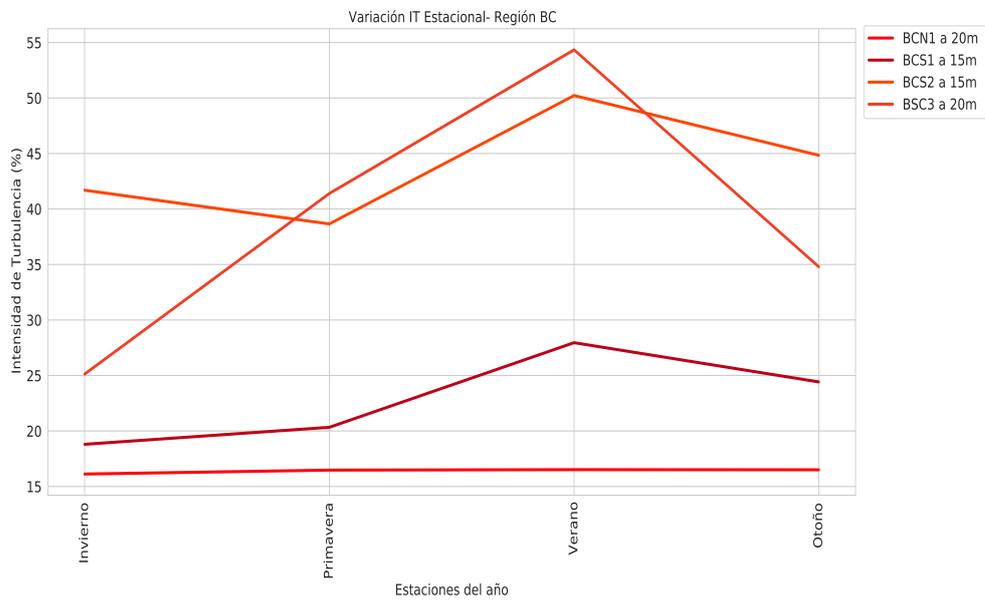


Figura 4.27: Gráfica estacional- Región BC

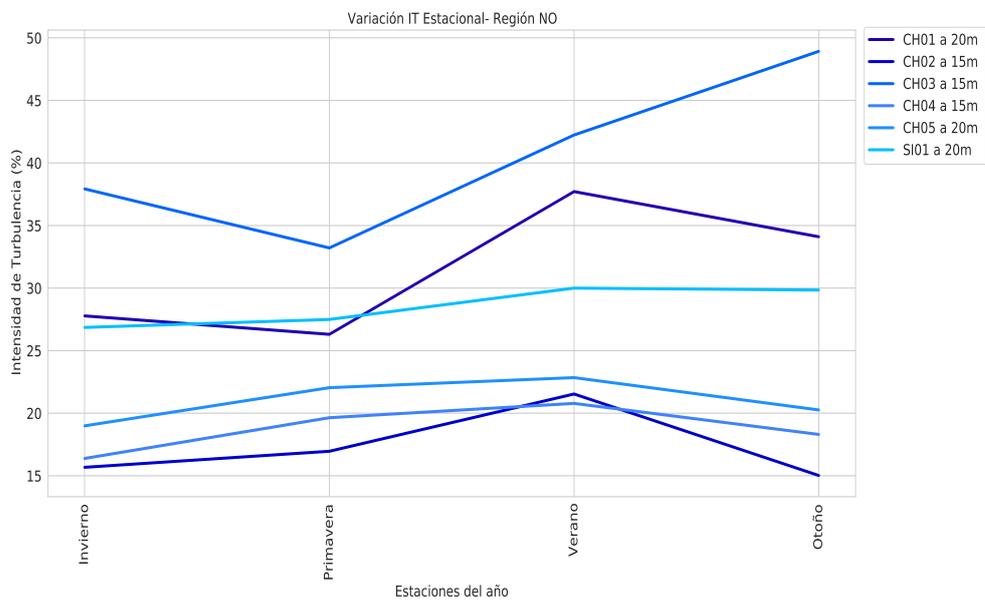


Figura 4.28: Gráfica estacional- Región NO

• **Región NC**

De la misma forma, la región NC tiene sus velocidades bajas en verano mientras que las altas varían considerablemente según el sitio. Por ejemplo, para el sitio ZC01, se mantiene constante un rango velocidad promedio de $4 \frac{m}{s} - 4.6 \frac{m}{s}$, teniendo la máxima rapidez tanto en primavera como en verano y un comportamiento similar en verano y otoño dentro del rango **bajo** a lo largo del año. A la inversa, su intensidad de turbulencia se encuentra dentro del rango **medio** todo el año, teniendo sus IT máximas en verano y otoño con 37%.

Ahora, ZC02, se encuentra en el rango medio con velocidades considerables que aumentan $6 \frac{m}{s}$ para el verano, siendo este menor valor, hasta $7.7 \frac{m}{s}$ para el invierno, valor representativo de una velocidad de viento alta. A su vez, la intensidad de turbulencia máxima se encuentra en primavera en 18% y se muestra un comportamiento similar en otoño e invierno. Por su parte, JAL1 que tiene su velocidad máxima ($5.1 \frac{m}{s}$) en primavera dentro de una velocidad **media** y coincide en tener intensidades de turbulencia **bajas** y su máxima en verano. Debido a estas mismas características, se confirman valores a destacar para el sitio VZ02 dentro de la región.

En principio, no es posible distinguir un patrón que contenga un comportamiento claro de la intensidad de turbulencia, ver figura 4.30; sin embargo, para dos sitios el otoño e invierno se podrían determinar como las épocas de intensidades mínimas (ZC02 y JAL1) y las intensidades altas en verano para $\frac{2}{3}$ de las estaciones (ZC01 y JAL1).

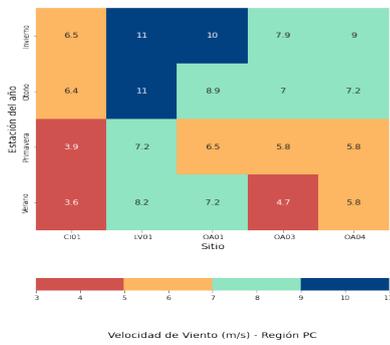


Figura 4.29: Gráfica estacional - Región PC

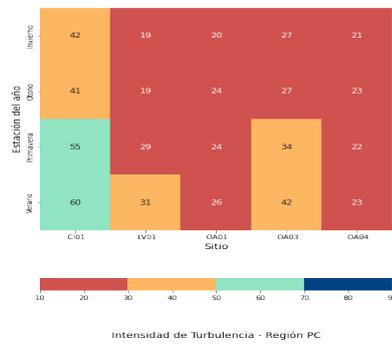


Figura 4.30: Gráfica estacional IT - Región PC

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

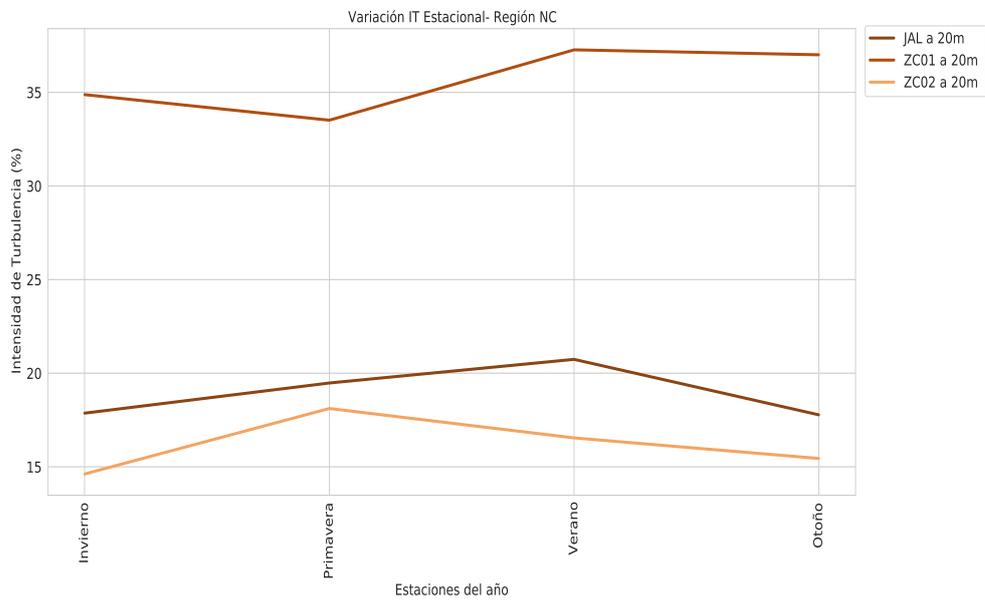


Figura 4.30: Gráfica estacional- Región NC

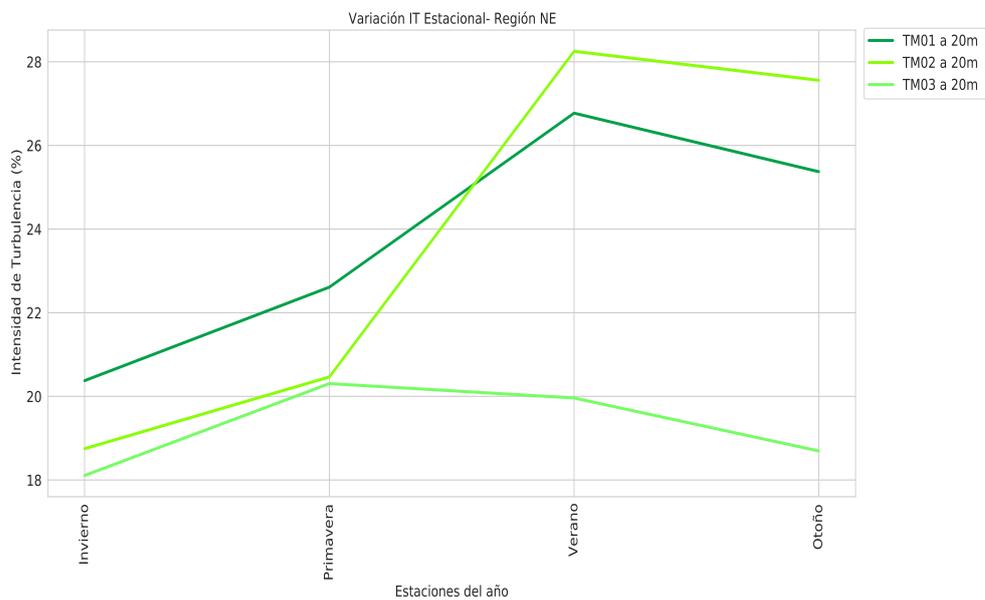


Figura 4.31: Gráfica estacional- Región NE

- **Región NE**

En la figura 4.31 es posible observar un aumento de la intensidad de turbulencia de invierno al verano, siendo el sitio TM02 el que cuenta con un mayor valor y con una clara disminución de verano a otoño, siendo TM03 el sitio con el menor valor.

Ambas estaciones se encuentran muy cercanas por lo que se esperaría que tanto el comportamiento de velocidad de viento como la intensidad de turbulencia sean muy semejantes. TM02 y TM03 muestran un rango de velocidad **medio** a excepción del otoño, que se encuentra en un rango **bajo**, el cual, por ende, representa los valores más pequeños a $4.8 \frac{m}{s}$. El verano y el otoño representan los valores máximos para TM02 con 28, y el verano y la primavera son los valores máximos para TM03. Esto quiere decir que, aunque el comportamiento de la velocidad del viento en estos dos sitios es muy parecido, el comportamiento de la intensidad de turbulencia puede ser diferente, pues es mucho más complejo.

Para el sitio TM01 existen dos valores menores en verano y otoño que se mantienen constantes y dos valores en primavera e invierno con valores de $5.6 \frac{m}{s}$. En contraparte, la intensidad de turbulencia es variante en las cuatro estaciones, con el valor máximo en verano y el mínimo en invierno siempre en el rango **bajo**.

En general, se puede mencionar que es en el verano y otoño cuando ocurren las mayores intensidades de turbulencia; y a la inversa, es en invierno que ocurren las velocidades más altas de viento.

- **Región PC**

En la figura 4.31 es posible observar que al comparar el comportamiento de los cuatro sitios, el sitio OA04 ubicado en Certe es el sitio que presenta la menor de las intensidades; y CI01, ubicado en Progreso, es el sitio que mayor presenta intensidad de turbulencia, incluso dentro del rango de valores **altos**.

A pesar de las diferencias en la intensidad de turbulencia entre los sitios, en esta región es posible observar un patrón consistente de intensidades más altas en verano, seguidas de primavera, otoño y, finalmente, invierno. Estos resultados se corresponden directamente con las velocidades del viento más altas registradas que se pueden observar en la figura 4.29. Es en invierno cuando se producen estas diferencias de presión debido al aire frío y seco del norte del océano Atlántico que choca con el aire cálido y húmedo del sur, lo que resulta en la canalización de los vientos hacia el océano Pacífico a través del Paso de Chivela.

Este patrón estacional de intensidad de turbulencia y velocidad del viento se relaciona con los cambios meteorológicos estacionales, específicamente con la migración de sistemas de alta presión en la región, como se describió anteriormente en el contexto de la estacionalidad.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

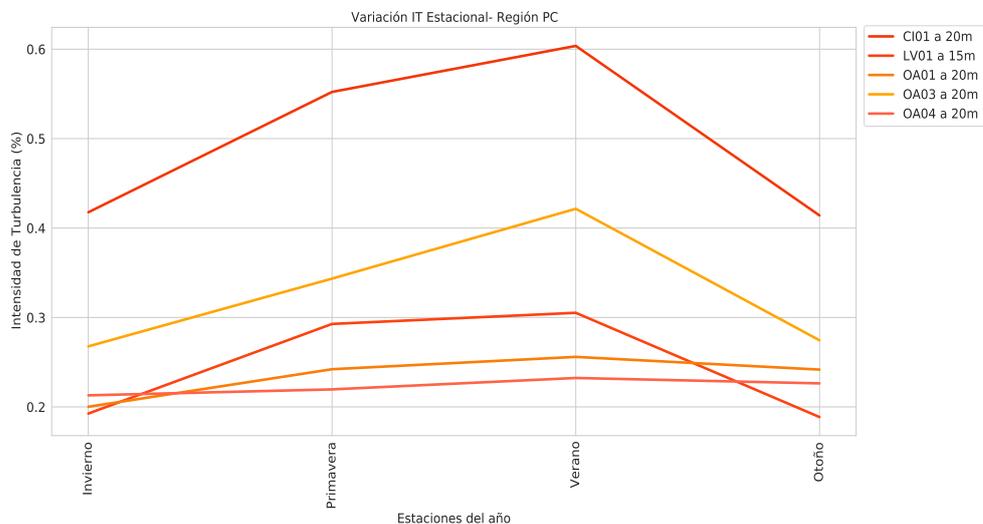


Figura 4.31: Gráfica estacional- Región PC

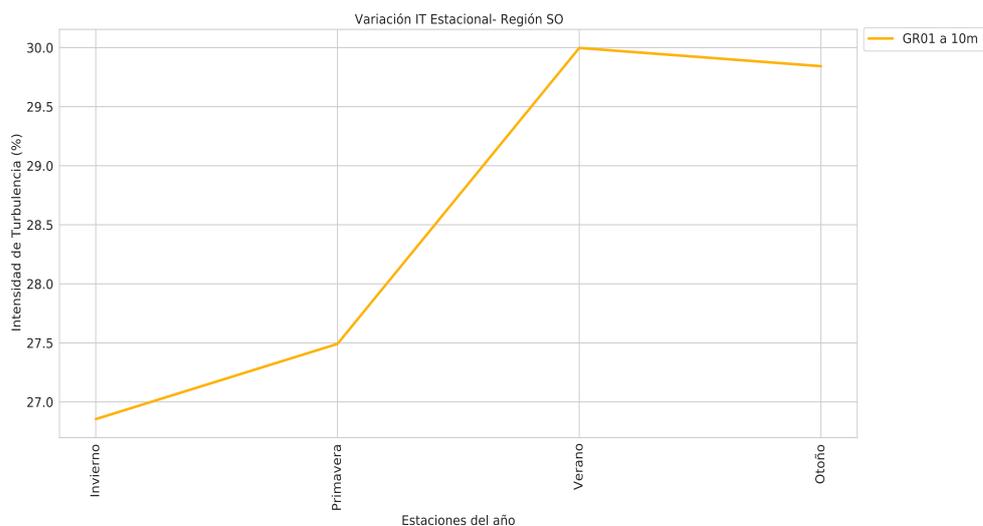


Figura 4.32: Gráfica estacional- Región SO

- Región CVT

Es claro observar que en la figura 4.32 EM01 es el sitio con la mayor intensidad de turbulencia, distinto de HG01 que cuenta con la menor intensidad. El comportamiento de HG01 y de PB01 en general se observa constante en las 4 estaciones, mientras que hay un claro incremento en una época del año en los sitios VZ01 y EM01 específicamente en verano.

Entre los comportamientos irregulares se encuentra el de la región CVT en el que definir

valores máximos y mínimos será de mayor complejidad. PB02 se encuentra en un rango **bajo** con pocas variaciones a lo largo del año en un rango de velocidades promedio que va desde $3.1 \frac{m}{s}$ hasta $3.7 \frac{m}{s}$, siendo el verano el valor mínimo de velocidad promedio; en cuanto a la IT, verano e invierno se mantienen a 28% y el otoño e invierno a 25%.

PB01 y VZ01 se encuentran en su mayoría con rangos **bajos** a excepción de una sola estación del año. Por una parte PB01, tiene su valor máximo en Verano dentro del rango **Medio**; no obstante, su intensidad de turbulencia es uno de los comportamientos más variados que se encuentran en la zona. Tanto en primavera como en invierno es posible encontrar valores **extremos** mientras que el otoño es **Alto** y únicamente el Verano se mantiene con un valor bajo. Por otra parte, VZ01 tiene su valor alto en Invierno y su valor mínimo en Verano, mismo comportamiento que describe al sitio PB02. HG01 tiene un comportamiento similar con valores pequeños en primavera y en invierno dentro del rango **medio** y con el valor máximo en Verano. Siempre manteniéndose en el rango **medio**.

- **Región YC**

En la figura 4.33 el sitio YC02 tiene un aumento de IT en primavera mientras que desciende drásticamente hasta otoño. Entre tanto, el comportamiento de YC02 es similar a lo largo del año con un claro aumento en primavera.

En un inicio se encuentra el sitio YC01 en el que la mayor parte del año en cuanto a la velocidad del viento se encuentra en el rango de **medio** y siendo verano el menor de los valores con $4.7 \frac{m}{s}$. En cambio, la IT máxima es en primavera 36% y la menor es en otoño con 14%.

Para la estación YC02 tanto la rapidez promedio de viento como la intensidad de turbulencia se mantienen dentro del rango **bajo** presentando un comportamiento de viento parecido en verano y otoño ($3 \frac{m}{s}$) manteniéndose ambas épocas de menor rapidez promedio y siendo primavera la mayor rapidez promedio con $4.1 \frac{m}{s}$ de manera paralela, la mayor intensidad de turbulencia es en primavera y la menor en otoño.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

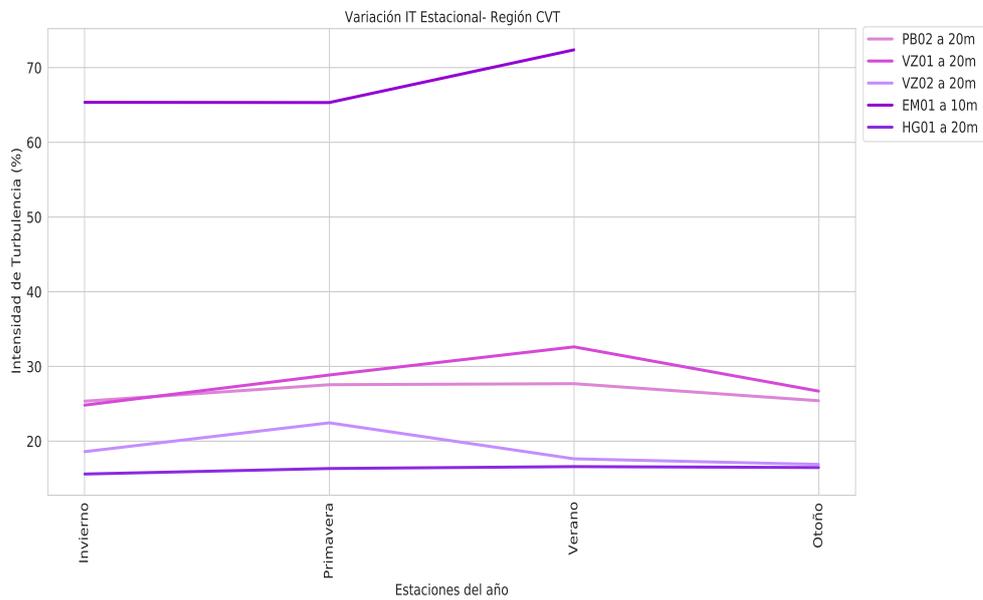


Figura 4.32: Gráfica estacional- Región CVT

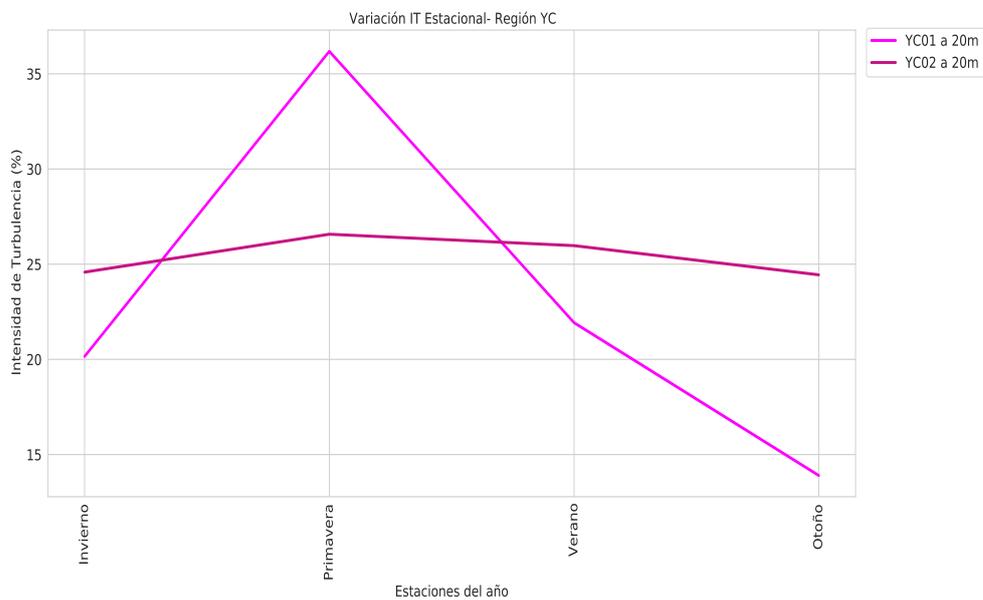


Figura 4.33: Gráfica estacional- Región YC

4.5 Variación diaria de la Intensidad de Turbulencia

Por lo que se refiere a un análisis diario de la intensidad de turbulencia es posible observar que BCN1 comienza a tener un aumento a partir de las 7 a.m. disminuyendo a las 19 h.

BCS1 presenta el mismo aumento a las 7 a.m. pero comienza a tener un cambio más drástico al disminuir a las 8 a.m. y se mantiene dentro de un rango estable el resto de las 24 h.

Es visible ver que el sitio BCS2 tiene una alta turbulencia a lo largo del día y se observa un aumento sumamente grande a partir de las 7 a.m. llegando a tener una intensidad de turbulencia del 90% a las 10 a.m. y comenzando a disminuir radicalmente hasta llegar y mantenerse por dos horas dentro del porcentaje 20%. El comportamiento en la noche comienza a aumentar a partir de las 20 h de 20% a 50% hasta las 4 a.m..

El sitio BSC3 es definitivamente el que muestra el comportamiento más lábil, lo más estable que se puede observar es la noche debido a que en el día a las 5 a.m. existe un decremento de 60% hasta el 10% al que se llega en tan solo 5 horas. A las 17 h el porcentaje de intensidad comienza a aumentar aproximadamente 10% cada hora hasta llegar al 70% con pequeños aumentos a las 2 a.m..

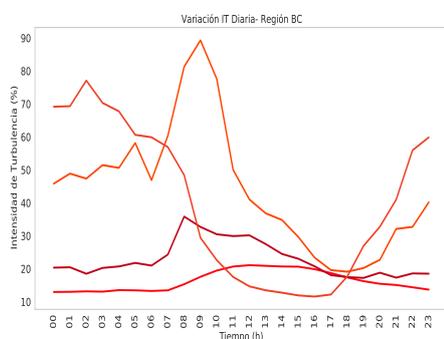


Figura 4.34: Variación diaria IT-Región BC

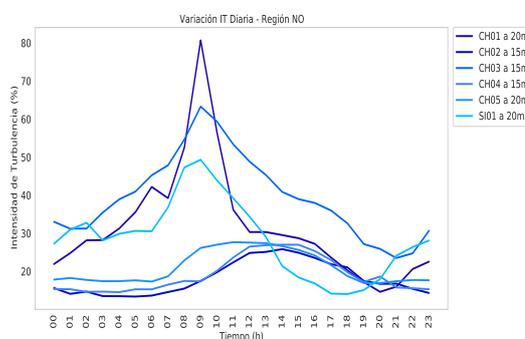


Figura 4.35: Variación diaria IT-Región NO

- **Región NO**

CH01-A partir de las 7 a.m. - 11 a.m. es posible encontrar un pico de intensidad de turbulencia que va de 40%-80% teniendo su mayor porcentaje a las 9 a.m. que valdría la pena comprender. El comportamiento comienza a disminuir hasta las 20 h en donde aumentará sigilosamente en búsqueda de estabilidad hasta las 6 a.m. .

El pico de la estación CH03 coincide con los horarios de CH01; no obstante, se mantiene en un intervalo de intensidad de turbulencia de 60%. Y en el que la intensidad no está

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

en la búsqueda de la estabilidad sino de un decremento a partir de las 10 a.m. hasta las 22 p.m. en donde aumenta hasta llegar al pico máximo de IT que ocurre a las 9 a.m..

El comportamiento de la estación CH02 a lo largo del día es en forma de campana de 9 a.m. hasta 19 h es incluso muy semejante al comportamiento que CH05 tiene. En el que la intensidad de igual forma, es mínima en la noche.

La estación CH04 también tiene una forma de campana solo que el aumento se comienza a presentar a partir de las 8 a.m. manteniéndose por debajo de 30% y disminuyendo desde las 15 h. para mantenerse dentro de una IT estable por la madrugada hasta las 6 a.m. en donde comenzará a aumentar nuevamente.

SI01-Es importante mencionar que al encontrarse en Sinaloa, el estado se encuentra dentro del tiempo del Pacífico el cual considera una hora de más. Dicho esto, comparar los picos de este sitio junto con los de CH02 sería mucho más visible de lo que se puede observar en la figura 4.32 en la que existe un aumento a partir de las 6 a.m , un pico máximo a las 8- 9 a.m. y una disminución el resto del día aumentando nuevamente de las 20 h a las 2 h . La diferencia en el patrón de variación diaria entre SI01 y los otros sitios puede deberse a la dirección del viento, que suele ser más variable en la costa.

• Región NC

Al examinar detalladamente las curvas diarias de variación de la intensidad de turbulencia, se destaca una notable similitud en los comportamientos de ZC01 y ZC02, ambos mostrando patrones de curvas similares. El comportamiento de estas dos estaciones se caracteriza por una forma de campana, donde se observa una clara tendencia creciente desde las 9 a.m. hasta su punto máximo alrededor de las 19 h, seguida de una disminución gradual. Durante este intervalo, la intensidad de turbulencia se mantiene en un rango constante, con pequeños incrementos que se perciben hasta el inicio de la fase descendente de la curva.

En cambio, la estación ZC01 aumenta de a.m. y llega a un pico a las a.m. Existe una clara disminución a lo largo del día hasta la 1 de la madrugada en donde comienza a haber un aumento de intensidad.

• Región NE

Esta región está compuesta de 3 sitios. Dos sitios de esta región muestran un pico mayor que se muestra de 7-9 a.m. y comienza a disminuir el resto del día. De 16-18 h. TM01 aparece su intensidad de turbulencia más baja del 15% y comienza a subir junto con TM02 a partir de las 19 h.

Entonces, el comportamiento de ambas estaciones es el aumento en las primeras horas de la mañana, disminuir el resto del día y recuperar la intensidad de turbulencia hasta la siguiente mañana.

En comparación con TM01 y TM02, TM03 San Fernando presenta una variación diaria

consistente en la intensidad de turbulencia. La tendencia muestra un aumento gradual durante las primeras horas del día, alcanzando su punto máximo, seguido de una disminución gradual a lo largo del día.

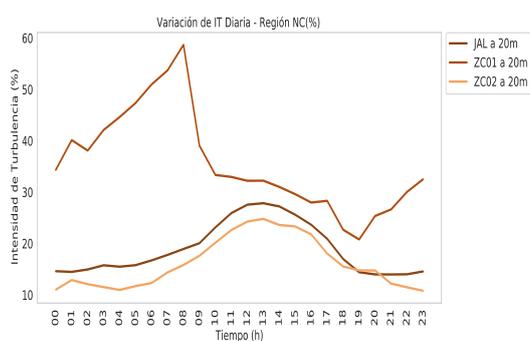


Figura 4.36: Variación diaria IT-Región NC

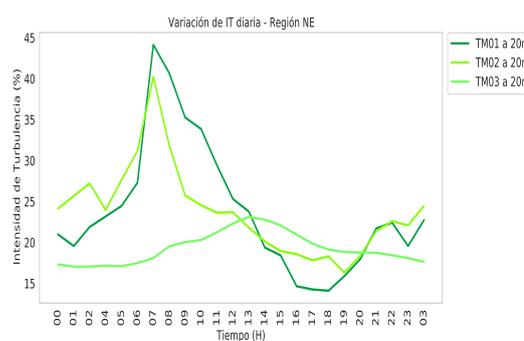


Figura 4.37: Variación diaria IT-Región NE

- **Región PC**

Esta región muestra tres tipos de comportamientos que se encontrarán relacionados con la rugosidad del terreno, así como con los cambios de temperatura de superficie. OA01, OA03 y LV01 muestran un comportamiento similar en el que existe un pequeño pico e intensidad de turbulencia a las 8 a.m., un decremento a partir de la misma hora y un aumento a las 6 p.m. que se mantiene dos horas hasta tener un pico a las 2 a.m., este comportamiento se han encontrado en diversas estaciones. Hemos observado al momento que de 6 a 9 a.m. es común observar picos de intensidad de turbulencia y CI01 también los tiene, disminuyendo hasta las 2 p.m., solo que en esta ocasión aumentan hasta tener otro pico a las 8 p.m.

Algo interesante de esta región es que, si bien en la madrugada se muestran altos porcentajes de turbulencia del 60 % en el caso de CI01 o del 30%, en el caso de las estaciones OA01 y OA03, estos valores no son representativos de la menor intensidad.

Además, OA04 muestra un comportamiento casi constante aumentando de 6 a 8 a. m., y disminuyendo ligeramente unos decimales a lo largo del día.

- **Región SO**

El comportamiento de este sitio es semejante al que podíamos observar en Baja California, con un pico al iniciar el día, comenzando a las 7 a.m., teniendo su máximo a las 10 a. m. y disminuyendo drásticamente hasta las 5 p.m., cuando vuelve a subir hasta la búsqueda de ser estable en la madrugada. Vale la pena mencionar que se observa un pico de 12 a 2 a.m., cuando puede que existan cambios de temperatura drásticos que provoquen este comportamiento.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

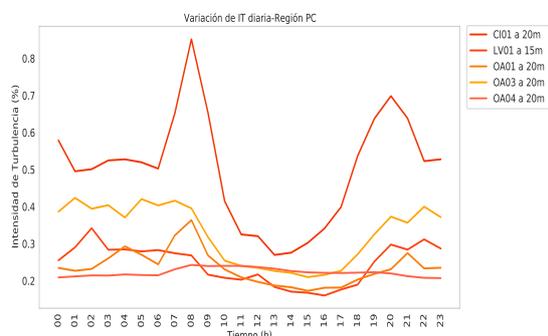


Figura 4.38: Variación diaria IT-Región PC

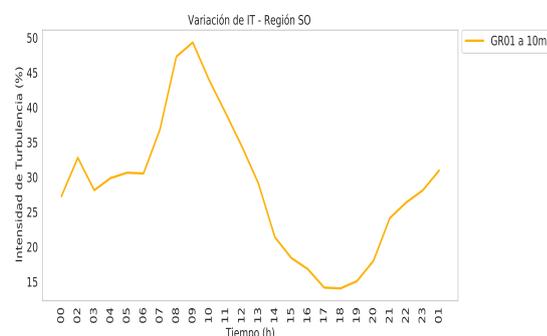


Figura 4.39: Variación diaria IT-Región SO

• Región CVT

También hay tres tipos diferentes de comportamiento en esta área. Por un lado, PB01 y EM01 muestran drásticos picos de 6 a 9 a.m. en un intervalo de intensidad de turbulencia que sobrepasa los cálculos porcentuales con 140% y 180%. Esto puede deberse a las bajas rapideces que existen en el sitio en ese horario y que desestabilizan el comportamiento, disminuyendo hasta las 4 p.m. y volviendo a aumentar en una curva inversa y se sigue manteniendo un aumento toda la madrugada hasta las 3 a.m., cuando existe un pico de disminución que se recupera rápidamente en una hora y mantiene el curso en aumento hasta el amanecer.

Por otro lado, PB02 y HG01 se mantienen la mayor parte del día constantes a excepción de una curvatura que va en aumento desde las 8 a.m y disminuye a las 6 p. m., cuando comienza a estabilizarse hasta la mañana siguiente. Además, VZ01 y VZ02, ubicadas ambas al nivel del mar en Veracruz, muestran un comportamiento de intensidad de turbulencia similar en donde existe un pico de intensidad entre las 5 y las 8 a.m., cuando disminuye el resto del día hasta la 1 p.m., luego vuelve aumentar y se mantiene constante por la madrugada.

• Región YC

La intensidad de esta región muestra los dos comportamientos más comunes en la variación de la intensidad. YC01 presenta un pico de intensidad de 5 a 9 a.m.

Posteriormente, existe un decremento hasta las 4 p.m. y se vuelve a generar un aumento hasta las 11 p.m. Esto quiere decir que las intensidades más bajas ocurren por la tarde (de 12 p.m. a 6 p.m.), mientras que las máximas suceden en la mañana. En cambio, YC02 muestra sus menores valores por la madrugada y es a partir de las 6 a.m. que aumenta su intensidad de turbulencia hasta el mediodía, cuando desciende moderadamente.

4.5 Variación diaria de la Intensidad de Turbulencia

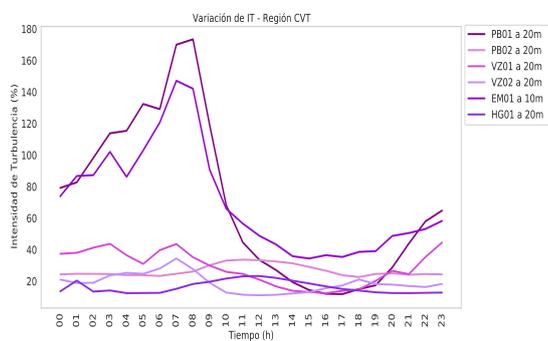


Figura 4.40: Variación diaria IT-Región CVT

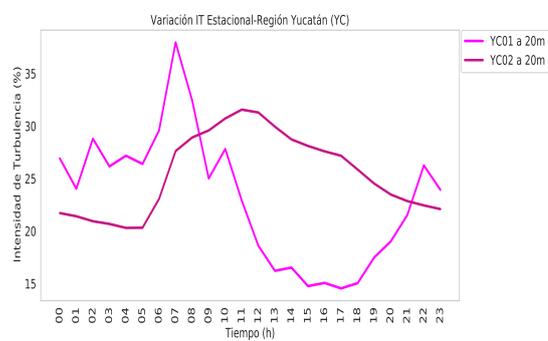


Figura 4.41: Variación diaria IT-Región YC

Conclusiones

La caracterización de la intensidad de turbulencia en 28 sitios constituye un análisis integral de las diversas condiciones meteorológicas presentes en la República Mexicana, crucial para el diseño estructural de las turbinas eólicas. La observación en torno a la intensidad de turbulencia se centra en factores tanto físicos como orográficos inherentes a cada ubicación. La extensa geografía de México, situada entre tres placas tectónicas, introduce una complejidad orográfica que resalta la importancia de considerar la rugosidad, factor determinante que influye directamente en los resultados de la intensidad de turbulencia presentados en este trabajo, clasificados con precisión en cuatro categorías distintas: baja, media, media alta y alta. Estos resultados aportan una base sólida y detallada para la toma de decisiones en el diseño de infraestructuras eólicas en el contexto mexicano. En cuanto al análisis regional BC, BCN1 destaca por sus óptimas características, presentando una variabilidad de velocidad mínima que favorece el aprovechamiento de energía eólica. Sin embargo, la limitación en la modelación de vientos de baja intensidad, evidenciada especialmente en sitios como BCS3, resalta la necesidad de considerar aspectos específicos en la planificación de proyectos eólicos en esta región.

A lo largo de la investigación, se observaron parámetros de IT similares entre BCN1 y BCS1, mientras que el resto de los sitios mostraron variaciones. En comparación, BCN1 y BCS1 comparten similitudes en su comportamiento diario de intensidad de turbulencia, demostrando estabilidad a lo largo del día. Mientras BCN1 mantiene una constancia a lo largo del año, BCS1 exhibe fluctuaciones significativas en diferentes estaciones, subrayando la diversidad de patrones climáticos en la región. BCS2 y BCS3 muestran un patrón similar en la intensidad de turbulencia: esta es elevada en las primeras horas de la mañana y presenta una marcada disminución en las horas de la tarde. Este comportamiento podría estar vinculado a la influencia de la temperatura del aire en estas zonas desérticas.

La complejidad atmosférica en la Región NO se destaca por la variabilidad en la dirección del viento, así como los patrones específicos en la planificación de proyectos

5. CONCLUSIONES

eólicos. Al analizar factores estadísticos, se identifica un patrón común en CH01, CH03, CH05 y SI01. La ubicación montañosa de estos sitios contribuye a un comportamiento diario similar, con picos de IT en las primeras horas de la mañana y disminución posterior, relacionada con la temperatura del aire y la estabilidad atmosférica. En contraste, SI01 en la región costera de Sinaloa presenta un patrón distinto, con un pico de IT en las primeras horas de la tarde, posiblemente influenciado por la variabilidad de la dirección del viento en la costa. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la ubicación geográfica y los patrones climáticos específicos en la evaluación de recursos eólicos en la Región Noroeste.

En el análisis comparativo de las intensidades de turbulencia en la Región NC, se destaca un patrón estacional evidente. Las intensidades tienden a ser más bajas en otoño e invierno, alcanzando niveles superiores durante la primavera y el verano. ZC01 y ZC02 exhiben respuestas más uniformes y suaves en la variación diaria de la turbulencia, indicando consistencia en la estabilidad atmosférica a lo largo del día. Contrariamente, JAL1 se distingue por su respuesta más variable, manifestando cambios distintivos en diferentes periodos del día. Es relevante subrayar que, en cuanto a la intensidad de turbulencia, JAL1 sobresale como la estación con los niveles más elevados en la región. Al observar el potencial eólico de la región, ZC02 emerge como un sitio destacado debido a sus valores superiores en el ajuste estadístico. Este hallazgo respalda la idea de que ZC02 podría ser la ubicación más propicia para la implementación de proyectos eólicos en el NC.

En la Región NE, se observa una marcada inversión estacional entre la intensidad de turbulencia y la velocidad del viento. Las mayores intensidades de turbulencia se registran en verano y otoño, mientras que las velocidades más altas del viento predominan en invierno, indicando una relación inversa a lo largo del año. TM01 se destaca al exhibir la intensidad de turbulencia más baja en invierno, a diferencia de TM02 y TM03, donde se registra un aumento generalizado en esta estación. Además, TM01 y TM02 presentan un patrón diario consistente en la intensidad de turbulencia, señalando una regularidad en sus perfiles atmosféricos. Ambas estaciones están expuestas tanto a vientos del sureste como del noroeste. En contraste, TM03, expuesta principalmente a vientos del noroeste, podría experimentar una menor intensidad de turbulencia. El análisis estadístico concluye que TM01 y TM02 son los sitios más propicios para la generación de energía eólica en esta región, respaldando así su elección estratégica para futuros proyectos renovables.

En cuanto a la Región PC, se observa un patrón predominante de viento hacia el norte y noroeste. La región central, destacando LV01, presenta un notable potencial eólico, seguido por otras estaciones como OA01, OA03 y OA04, a pesar de la menor altitud de LV01, cuyo comportamiento de escala sugiere una afinidad única que favorece su capacidad eólica. OA04 muestra la menor IT, mientras que CI01 en Progreso registra la mayor intensidad y la menor velocidad del viento, lo que podría afectar negativamente su capacidad de generación de energía. La variación diaria en la Región PC exhibe un patrón constante de IT, con picos tanto en la madrugada como en la tarde. La variación

estacional destaca patrones consistentes, con intensidades más altas en verano y más bajas en invierno, vinculadas a las velocidades del viento.

La región CVT se destaca como la mayor distribución de datos en este estudio. A nivel diario, se identificaron tres patrones distintivos junto con un comportamiento estacional en las diferentes ubicaciones. PB02 y HG01 exhiben patrones diarios estables, manteniéndose constantes durante la mayor parte del día con una curva ascendente por la mañana y estabilizándose hasta la siguiente jornada. Tanto HG01 como PB01 presentan comportamientos estacionales relativamente constantes a lo largo del año, con un notorio aumento en verano, especialmente destacado en EM01. En el caso de VZ01 y PB02, se observan patrones similares con máximos en invierno y mínimos en verano. El sitio HG01 presenta una variabilidad significativa en las velocidades del viento, pero también tiene la velocidad media más alta de la región. Esto podría indicar un mayor potencial eólico para este sitio.

En cuanto a la región YC, YC01 exhibe picos tempranos en la intensidad de turbulencia por la mañana, a diferencia de YC02, donde se observa un incremento gradual hasta el mediodía. Ambos lugares comparten un aumento en la intensidad de turbulencia durante la primavera, pero presentan divergencias en las variaciones estacionales subsiguientes. La topografía local puede estar influyendo en las variaciones diarias de la IT en YC01. Aunque se logró determinar la IT en YC01, la incapacidad para analizar la dirección del viento sugiere una falla específica en la estación meteorológica.

En virtud de lo expuesto, la investigación del recurso eólico, tanto a nivel local como regional, posibilita el análisis de una correlación con los parámetros de intensidad de turbulencia. Este representa una contribución novedosa a la investigación en el estudio del recurso eólico al establecer una metodología novedosa para mejorar la practicidad en el análisis de estos parámetros, optimizando las campañas experimentales utilizadas para la caracterización del viento. La observación principal de la intensidad de turbulencia se centra en factores tanto físicos como en la orografía de los sitios. Este enfoque se posiciona como una valiosa herramienta para avanzar en la comprensión y eficiencia en la evaluación del recurso eólico, facilitando un análisis más profundo del mismo.

5.1 Recomendaciones y trabajo a futuro

Se proyecta extender este estudio para abordar el análisis de la intensidad de turbulencia en tecnologías de alta potencia. Se contempla la inclusión del cálculo de la producción de energía, un aspecto que no fue abordado en la presente investigación, con el fin de obtener una visión más completa y precisa de la influencia de la turbulencia en la eficiencia de la generación de energía eólica. Este enfoque ampliado contribuirá a enriquecer el conocimiento en el campo y ofrecerá nuevas perspectivas para el diseño y la optimización de sistemas eólicos de alta potencia.

5. CONCLUSIONES

La incorporación del análisis de la rugosidad del terreno podría potenciar la solidez de esta investigación al proporcionar una comprensión más profunda de la intensidad de turbulencia en el contexto específico de México. Este nuevo elemento no solo permitiría considerar con mayor precisión las características del entorno, sino también ampliar el análisis de la capacidad predictiva de las mediciones de intensidad de turbulencia. En conjunto, estos enfoques fortalecerían significativamente la integralidad de la investigación, contribuyendo así a un conocimiento más holístico de la influencia del parámetro en el ámbito de las energías renovables.

5.2 Apéndice

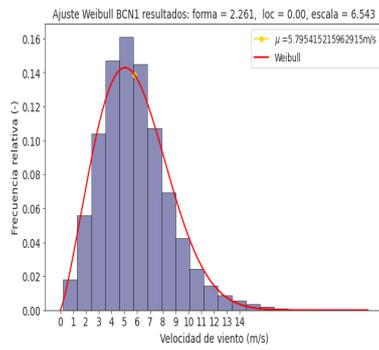


Figura 5.1: Distribución de Weibull BCN1

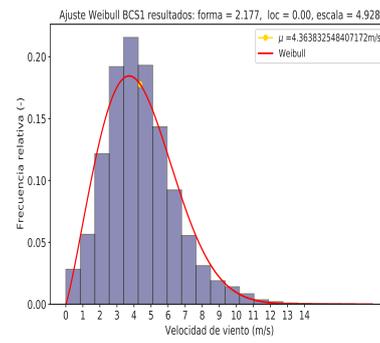


Figura 5.2: Distribución de Weibull BCS1

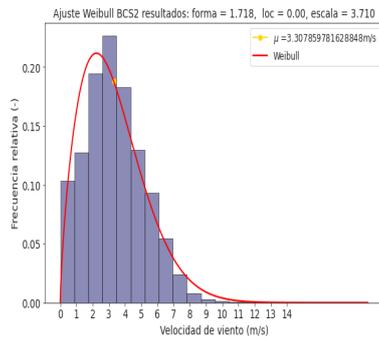


Figura 5.3: Distribución de Weibull BCS2

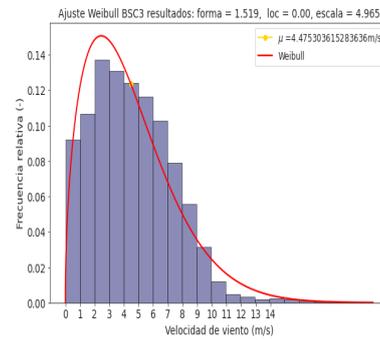


Figura 5.4: Distribución de Weibull BCS3

5. CONCLUSIONES

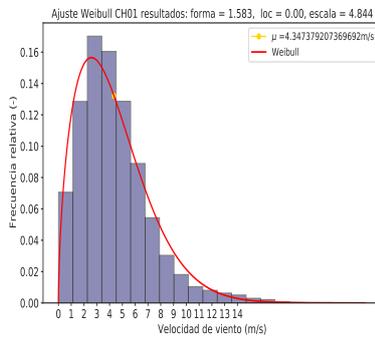


Figura 5.5: Distribución de Weibull CH01

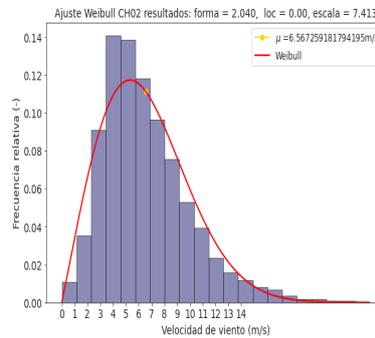


Figura 5.6: Distribución de Weibull CH02

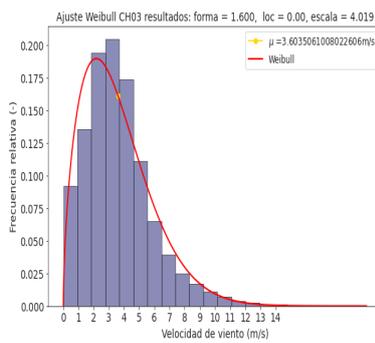


Figura 5.7: Distribución de Weibull CH03

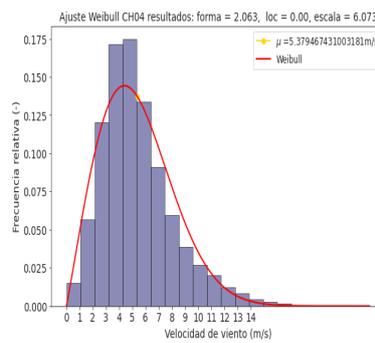


Figura 5.8: Distribución de Weibull CH04

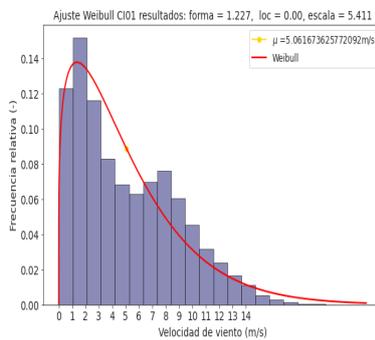


Figura 5.9: Distribución de Weibull CI01

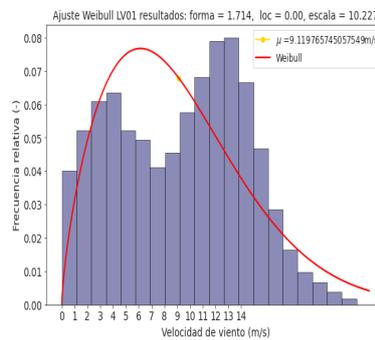


Figura 5.10: Distribución de Weibull LV01

Análisis estacional de todas las estaciones

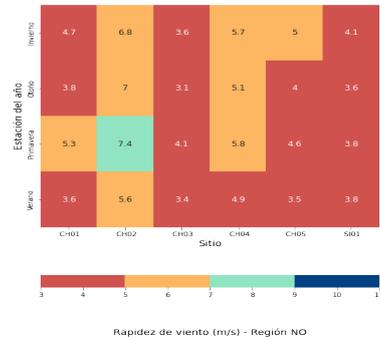


Figura 5.11: Mapa de calor de rapidez del viento- Región NO

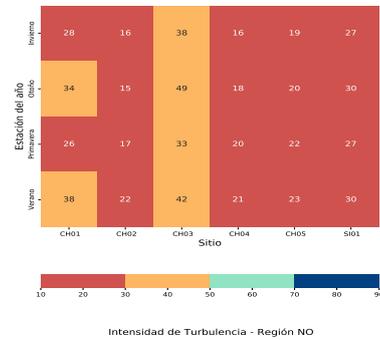


Figura 5.12: Mapa de calor IT-Región NO

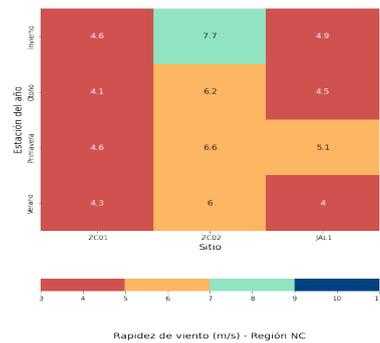


Figura 5.13: Mapa de calor de rapidez del viento- Región NC

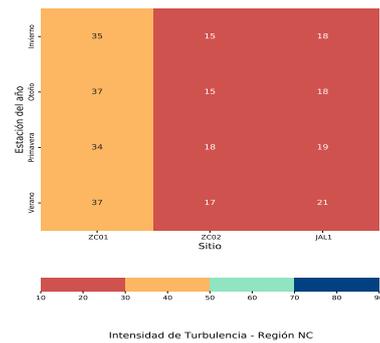


Figura 5.14: Mapa de calor IT-Región NC

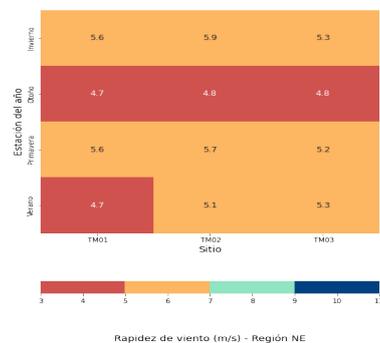


Figura 5.15: Mapa de calor de rapidez del viento-Región NE

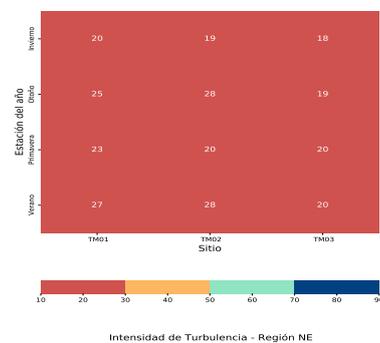


Figura 5.16: Mapa de calor IT-Región NE

5. CONCLUSIONES

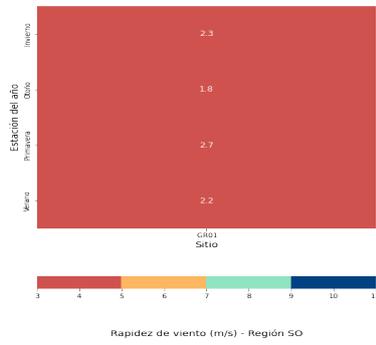


Figura 5.17: Mapa de calor de rapidez del viento- Región SO

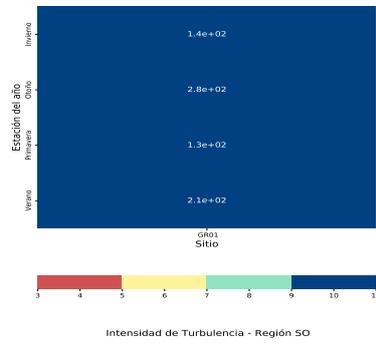


Figura 5.18: Mapa de calor IT- Región SO

Región CVT

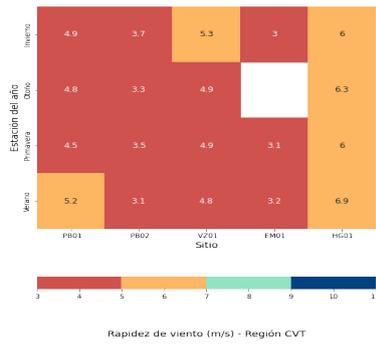


Figura 5.19: Mapa de calor de rapidez del viento- Región CVT

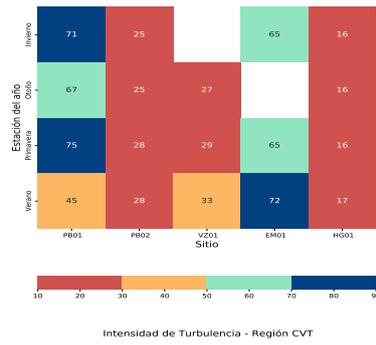


Figura 5.20: Mapa de calor IT- Región CVT

Región YC

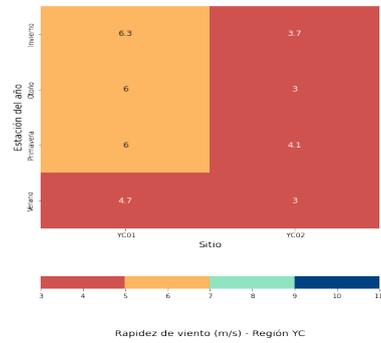


Figura 5.21: Mapa de calor de rapidez del viento- Región YC

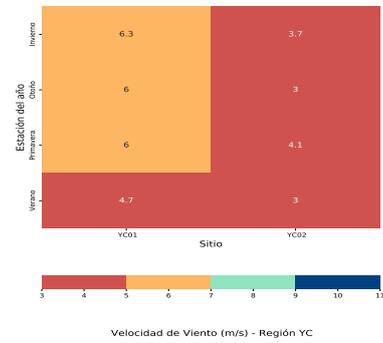


Figura 5.22: Mapa de calor IT-Región YC

A continuación se muestran los valores de intensidad de turbulencia obtenidos en los 3 procesos realizados.

5. CONCLUSIONES

	Media	a	b	c	IT	IT_mensual	IT_estacional
BC							
BCN1	5.80	0.28	1.00	0.15	15.50	15.50	15.50
BCS1	4.36	1.13	1.72	0.16	15.80	15.80	15.80
BCS2	3.31	0.67	1.03	0.15	17.60	17.50	17.50
BCS3	4.48	0.56	0.91	0.12	12.50	12.40	12.40
CVT							
VZ02	5.62	0.50	0.99	0.10	10.20	10.20	10.20
VZ01	1.05	0.83	1.10	0.12	37.70	11.90	11.90
PB02	3.41	0.16	0.34	0.20	24.60	24.70	24.70
PB01	4.80	0.92	0.76	0.11	13.70	13.70	13.70
EM01	3.06	0.69	0.69	0.15	23.50	23.40	23.40
HG01	6.29	0.42	0.59	0.10	11.60	11.50	11.50
NC							
ZC01	4.42	0.70	0.75	0.14	16.30	16.30	16.30
JAL1	4.75	0.25	0.66	0.16	16.80	16.90	16.90
ZC02	6.63	0.60	0.62	0.11	11.60	11.50	11.50
NE							
TM01	5.11	1.44	1.84	0.14	13.90	13.90	13.90
TM03	5.17	0.29	1.33	0.17	17.30	17.30	17.30
TM02	5.37	0.61	1.29	0.14	13.60	13.60	13.60
NO							
CH05	4.34	0.26	0.69	0.16	17.70	17.70	17.80
CH01	4.35	0.60	0.85	0.13	14.50	14.50	14.50
CH02	6.57	0.50	0.42	0.09	12.20	12.00	12.00
CH04	5.38	0.62	0.80	0.13	13.50	13.60	13.60
CH03	3.60	0.85	1.09	0.16	17.50	17.70	17.60
PC							
CI01	5.06	1.04	1.70	0.23	22.80	22.80	23.00
OA04	7.06	1.13	2.74	0.21	20.80	20.80	20.80
OA03	6.27	0.37	0.78	0.18	18.30	18.30	18.30
OA01	8.14	0.64	1.21	0.16	16.40	16.40	16.40
LV01	9.12	0.46	0.62	0.13	13.10	13.10	13.10
SO							
SI01	3.81	1.06	1.65	0.14	14.00	14.00	14.00
GR01	2.43	0.83	0.78	0.11	23.70	24.30	25.70
YC							
YC01	5.76	0.92	0.61	0.10	13.10	13.10	13.10
YC02	3.48	-0.09	0.35	0.29	26.30	26.20	26.20

Created with Datawrapper

Figura 5.23: Valores Intensidad de Turbulencia

Bibliografía

- [1] Agency, I. R. E. (2022). Renewable capacity statistics 2022. Technical report, IRENA. URL:[978-92-9260-428-8](https://www.irena.org/publications/2022/01/renewable-capacity-statistics-2022). 5, 6
- [2] Agency, U. C. I. (2012). Shaded relief archive. Technical report, CIA. URL:http://shadedreliefarchive.com/Mexico_CIA.html. vii, 25
- [3] Barton ED, A. M. e. a. (1993). Supersquirt: Dynamics of the gulf of tehuantepec, mexico. *Oceanography*, 6:23–30. 36
- [4] Borja.D, M. A. (2003). Proyecto Eólico. *Boletín IIE*. URL: <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/206.pdf>. 18
- [5] Borunda, M., de la Cruz, J., Garduno-Ramirez, R., and Nicholson, A. (2020). Technical assessment of small-scale wind power for residential use in mexico: A bayesian intelligence approach. *PLoS ONE*, 15(3). 6
- [6] Canul Reyes, D. A. and Rodríguez Hernández, O. (2020). *Feasibility study of offshore wind energy in the Gulf of Mexico*. PhD thesis, UNAM. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt02029a&AN=tes.TES01000802750&lang=es&site=eds-live>. 6
- [7] Celik, A. N. (2003a). Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5). 7
- [8] Celik, A. N. (2003b). Energy output estimation for small-scale wind power generators using weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, 91(5):693 – 707. url: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S0167610502004713&lang=es&site=eds-live>. 11
- [9] Clausen, P. D. and Wood, D. H. (1999). Research and development issues for small wind turbines. *Renewable Energy*, 16(1-4 -4 pt 2):922–927. 8

BIBLIOGRAFÍA

- [10] Commission, I. E. (2009). Wind Turbines-Part 2: Small Wind Turbines. *International Standard IEC 61400-2*. ISSN: 9782832212844. 7, 15
- [11] Craig MacEachern, Y. (2018). Wind energy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pages 665–701. 15
- [12] D Elliot, M. S. e. a. (2004). Atlas de recursos eólicos del estado de Oaxaca. Technical report, Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), USA. URL: <https://www.worldgbc.org/news-media/WorldGBC-embodied-carbon-report-published>. 36
- [13] danesa de la industria eólica, A. (2003). Efecto de la estela. *Asociación danesa de la industria eólica*. URL: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/wake.htm>. 14, 15, 53
- [14] de Electricidad y Energías Limpias(INEEL), I. N. (2020). Descarga de datos del aem. *Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias(INEEL)*. URL: <https://aems.ineel.mx/aemdata/Account/Login.aspx?ReturnUrl=%2faemdata%2fMemberPages%2fDownload.aspx>. vii, 18, 19, 20, 22
- [15] Department, S. R. (2021). Países de América Latina con el mayor territorio. *Statista Research Department*. url:<https://es.statista.com/estadisticas/1169398/paises-mas-grandes-america-latina-por-superficie/#:~:text=M%C3%A9xico%20se%20ubica%20en%20tercer,pa%C3%ADs%20m%C3%A1s%20grande%20del%20Caribe>. 24
- [16] Division, U. N. S. (2006). Population by sex, rate of population increase, surface area and density. *Population and Vital Statistics Report*. URL: <https://unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb/dyb2006/Table03.pdf>. 24
- [17] DTU (2023). *Global Wind Atlas*. Energydata.info, Chihuahua. URL: <https://globalwindatlas.info/en/about/dataset>. viii, 42, 65
- [18] Ernesto, P. C. (2021). *Análisis de la dinámica de estados viento-demanda en el sistema eléctrico mexicano*, page Capítulo 1. Universidad Nacional Autónoma de México(UNAM), Tokyo, Japan. URL:<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt02029a&AN=tes.TES01000820825&lang=es&site=eds-live>. 9
- [19] Escalona.Alcázar, Suarez Plascencia, P.-R. (2003). La secuencia volcánica terciaria del cerro de la Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada zacatecas guadalupe. *GEOS*, 23:2–16. url:<https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos03-1/Escalona03-1.pdf>. 31
- [20] Flores-Vidal, X., Durazo, R., Chavarme, C., and Flament, P. (2011). Circulación costera en ausencia de viento en el golfo de Tehuantepec, MÃ: Observaciones con radares de alta frecuencia. *Ciencias marinas*, 37:493 –

-
512. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802011000400009&nrm=iso. 35
- [21] Hernandez-Escobedo, Q. (2016). Wind energy assessment for small urban communities in the baja california peninsula, mexico. *Energies*, 9(10). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/10/805>. 6, 26
- [22] Huang, H., Luo, J., and Li, G. (2023). Study on the optimal design of vertical axis wind turbine with novel variable solidity type for self-starting capability and aerodynamic performance. *Energy*, 271:127031. 52
- [23] Hui, M. C., Larsen, A., and Xiang, H. F. (2009). Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part I-Mean wind and turbulence intensities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(1). 15
- [24] IEA (2020). Report extract renewables. Technical report, International Energy Agency, Paris, France. URL:<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>. 2
- [25] IEA (2022a). How Europe can cut natural gas imports from Russia significantly within a year. *Press Release*. URL: <https://www.iea.org/news/how-europe-can-cut-natural-gas-imports-from-russia-significantly-within-a-year>. 1
- [26] IEA (2022b). Report extract renewables. Technical report, International Energy Agency, Paris, France. URL:<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>. 1
- [27] Irena (2019). Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. *Irena*, pages 17–19. URL:https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf. 2
- [28] Jain, P. (2010). *Wind Energy Engineering*, pages 76–80. McGraw-Hill Professional Publishing, New York, USA. URL:<https://ebookcentral.proquest.com/lib/unam/reader.action?docID=4653351e>. 9
- [29] Jaramillo, O. and Borja, M. (2004). Wind speed analysis in la ventosa, mexico: a bimodal probability distribution case. *Renewable Energy*, 29(10):1613–1630. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104000618>. 11
- [30] Joaquín, E. A. (1996). Geodinámica de México y Minerales del Mar. *Ciencia para todos*. ISBN: 968-16-4535-9. 34
- [31] Joaquín, M. A. (2001). *Curso de energía eólica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. 9
-

- [32] Kazda, J. and Mann, J. (2020). Mitigating impact of spatial variance of turbulence in wind energy applications. *Wind Energy Science*, 5(2):439–450. 15
- [33] Kim, J.-Y., Oh, K.-Y., Kim, M.-S., and Kim, K.-Y. (2019). Evaluation and characterization of offshore wind resources with long-term met mast data corrected by wind lidar. *Renewable Energy*, 144:41 – 55. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S0960148118307493&lang=es&site=eds-live>. 38
- [34] Leyla, O. and Onder, O. (2006). Exergy and reliability analysis of wind turbine systems: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1811 – 1826. URL:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.004>. 8
- [35] Li, F., Ren, G., and Lee, J. (2019). Multi-step wind speed prediction based on turbulence intensity and hybrid deep neural networks. *Energy Conversion and Management*, 186. 2
- [36] Lissaman, P. B. (1983). Low-Reynolds-Number Airfoils. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15:223–239. 8
- [37] López Villalobos, C. A., Campos Amezcua, R., and Rodríguez Hernández, O. (2019). *Caracterización de la intensidad de turbulencia y energía contenida en ráfagas para aplicaciones en energía eólica*. PhD thesis, UNAM. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000790534&lang=es&site=eds-live>. 2, 14
- [38] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley and Sons. 8, 10, 11, 12
- [39] Mark Z. Jacobson¹, *, G. B. (2014). 100% wind, water, sunlight (wws) all-sector energy plans for the 50 united states. *Renewable Energy*, page 38. doi: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.doi.....4baf91b1f0adc58a883837035eb4c96b&lang=es&site=eds-live>. 1
- [40] Mathew, S. (2006). *Wind energy : fundamentals, resource analysis and economics*. Springer. URL:<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02025a&AN=lib.MX001001263220&lang=es&site=eds-live>. vii, 11
- [41] MetOffice (2023). National meteorological library archive. *Asociación danesa de la industria eólica*. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/who>. 42
- [42] Miguel, R. R. (2016). Diseño y análisis financiero de una instalación eólica onshore 99mw. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*. URL: https://oa.upm.es/42996/1/PFC_Miguel_Ramos_Rodriguez.pdf. 7

-
- [43] Morales-Acuña, E., Torres, C. R., and Linero-Cueto, J. R. (2019). Surface wind characteristics over baja california peninsula during summer. *Regional Studies in Marine Science*, 29:100654. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100654>. 27, 53, 67
- [44] Morales-Ruvalcaba, C., Rodríguez-Hernández, O., Martínez-Alvarado, O., Drew, D., and Ramos, E. (2020). Estimating wind speed and capacity factors in mexico using reanalysis data. *Energy for Sustainable Development*, 58:158 – 166. url: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S0973082620302878&lang=es&site=eds-live>. 22, 27, 38
- [45] ORDONEZ, E. (1941). Las provincias fisiográficas de méxico. *Revista Geográfica*, 1(2/3):133 – 181. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsjsr&AN=edsjsr.40996155&lang=es&site=eds-live>. 27, 56
- [46] Portig, W. H. (1959). Air masses in central america. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 40(6):301 – 304. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/40/6/1520-0477-40_6_301.xml. 36
- [47] Prósper, M. A., Sosa Tinoco, I., Otero-Casal, C., and Miguez-Macho, G. (2019). Downslope windstorms in the isthmus of tehuantepec during tehuantepecer events: a numerical study with wrf high-resolution simulations. *Earth System Dynamics*, 10(3):485 – 499. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=139250481&lang=es&site=eds-live>. 35
- [48] REN21 (2020). Global status report. Technical report, REN21, México. 5
- [49] REN21 (2022). Global status report. Technical report, REN21, México. 5, 6
- [50] Riemann Gonzalez, H. and Ezcurra Real de Azua, E. M. (2001). *Flora vascular endemica de la Peninsula de Baja California, patrones de distribucion y escenarios de conservacion*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). URL:<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000298160&lang=es&site=eds-live>. 25
- [51] Rosen, A. and Sheinman, Y. (1994). The average output power of a wind turbine in a turbulent wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(3). 2
- [52] Sansón, L. Z. (2022). *Turbulencia*. PhD thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. URL: https://usuario.cicese.mx/~lzavala/lectures/Apuntes_Turbulencia.pdf. 13
-

- [53] Schultz, D. M., Bracken, W. E., Bosart, L. F., Hakim, G. J., Bedrick, M. A., Dickinson, M. J., and Tyle, K. R. (1997). The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Monthly weather review*, 125(1):5 – 39. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edscal&AN=edscal.2530452&lang=es&site=eds-live>. 37
- [54] Singh, R. K. and Ahmed, M. R. (2013). Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50, 7, 8
- [55] Suwarno, S. and M. Fitra, Z. (2021). The probability density function for wind speed using modified weibull distribution. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(6):544 – 550. url: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.3eb4c1b8412d4a158f3265db4e1fea3b&lang=es&site=eds-live>. 12
- [56] Thamhain, M. (2012). Implications of the weibull k factor in the resource assessment. Technical report, Congreso Latinoamericano de Ingenieria de Vientos (CLIV), Argentina. 11
- [57] Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., and Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. 7
- [58] Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C. L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., Holttinen, H., Laird, D., Lehtomäki, V., Lundquist, J. K., Manwell, J., Marquis, M., Meneveau, C., Moriarty, P., Munduate, X., Muskulus, M., Naughton, J., Pao, L., Paquette, J., Peinke, J., Robertson, A., Rodrigo, J. S., Sempreviva, A. M., Smith, J. C., Tuohy, A., and Wiser, R. (2019). Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464). 66
- [59] Velázquez-Muñoz, F. A., Martínez, J. A., Chavanne, C., Durazo, R., and Flament, P. (2011). Wind-driven coastal circulation in the gulf of tehuantepec, mexico. *Ciencias Marinas*, 37(4):443 – 456. URL: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=69796706&lang=es&site=eds-live>. 37
- [60] Wen, T. W., Palanichamy, C., and Ramasamy, G. (2019). Small wind turbines as partial solution for energy sustainability of Malaysia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(2). 7
- [61] y Lauri Bob, L. G. (2000). Desierto del vizcaíno. *Guia de Campo*. URL: <https://www.sdnhm.org/oceanoasis/fieldguide/vizcainodesert-sp.html>. 56
- [62] Y. Sheinman, A. R. (1992). A dynamic model of the influence of turbulence on the power output of a wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 39(3). 13

- [63] Yunus A.Cengel, J. M. C. (2018). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. Mc Graw Hill Education, 4 edition. 13
- [64] Zalewska, J., Damaziak, K., and Malachowski, J. (2021). An energy efficiency estimation procedure for small wind turbines at chosen locations in Poland. *Energies*, 14(12). 7
- [65] Zamora Machado, S. L. e. a. (2017). Cartografía de uso de suelo y vegetación de chihuahua. *Dirección de Desarrollo Forestal*, 1:50,000:13–17. URL: <https://chihuahua.gob.mx/attach2/sdr/uploads/informeFinalCartografia.pdf>. 28
- [66] Zamora Machado, S. L. e. a. (2/02/2010). Recurso eólico en baja california. *Revista Digital Universitaria*, 11:6–7. URL: www.revista.unam.mx/vol.11/num2/art24/int24.html. 26